

Erosão em Borda de Reservatório

*Maurício Martines Sales
José Camapum de Carvalho
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Marta Pereira da Luz
Newton Moreira de Souza
Renato Resende Angelim*

Organizadores



Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção
www.eec.ufg.br/gecon



*Erosão em Borda
de Reservatório*

Série GECON
Universidade Federal de Goiás
Volume 3

Erosão em Borda de Reservatório

Organizadores

Maurício Martines Sales
José Camapum de Carvalho
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Marta Pereira da Luz
Newton Moreira de Souza
Renato Resende Angelim

Goiânia, junho de 2017
Escola de Engenharia Civil e Ambiental

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia,
Estruturas e Construção Civil

Escola de Engenharia Civil e Ambiental/UFG
Av. Universitária, 1488, Qd. 86
Lote Área, St. Universitário.
Goiânia - GO 74605-220
Fone: +55(62)3209-6099
email: geconec@gmail.com
Site: <https://gecon.eec.ufg.br>

Capa
Ana Cláudia Lélis

Revisão
MM Coutinho Auditoria Ltda. ME

Editoração Eletrônica
Cir Gráfica e Editora Ltda.
Fernando Manoel das Neves

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. É proibida a reprodução parcial ou integral deste livro, por qualquer meio ou processo, sem prévia autorização do Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás. A Violação de direitos autorais é punível como crime.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S163e Sales, Maurício Martines
Erosão em borda de reservatório / Maurício Martines Sales;
José Camapum de Carvalho; Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
(Org.). [et al.]. – Goiânia: Gráfica UFG, 2017.
xxxiv, 584 p. – (GECON; v. 3)

ISBN: 978-85-495-0118-9

1. Solos. 2. Processos erosivos. 3. Engenharia civil e ambiental.
I. Título.

CDU 332.36/332.368

Projeto P&D - ANEEL

“Monitoramento e Estudo de Técnicas Alternativas na Estabilização de Processos Erosivos em Reservatórios de UHEs”

Coordenação

Maurício Martines Sales

Convênio

Eletrobras Furnas – Concedente
Universidade Federal de Goiás – Conveniente
Fundação de Apoio à Pesquisa - Interveniente

Equipe Executora

Eletrobras Furnas – Financiadora
Universidade Federal de Goiás – Executora
Universidade de Brasília – Participante



Apoio

Associação Brasileira de Mecânica dos Solos - ABMS
Instituto Geotécnico de Reabilitação do Sistema Encosta-Planície – REAGEO

Cartilhas publicadas no âmbito do Projeto P&D



Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado que Influenciaram direta ou indiretamente o Projeto P&D

Dissertações de Mestrado

ALEX VAZ DE MENEZES. Proposta metodológica para estudo de perda de massa de solos situados em bordas de reservatório devido ao efeito de ondas por meio de um canal hidráulico. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Orientadora: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha. Coorientador: Maurício Martines Sales. 2016.

MARLON SCHLIEWE. Perda de massa de solos situados na bordado reservatório da UHE – Itumbiara. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Orientadora: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha. Em Andamento.

RAFAEL DE OLIVEIRA NASCIMENTO. Estabilização de solos para mitigação de processos erosivos. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Orientadora: Márcia Maria dos Anjos Mascarenha. Coorientador: Renato Resende Angelim. Em Andamento.

TANIA MARIELA MATAMOROS SEVILLA. Estudo de processos erosivos: análise geotécnica de áreas degradadas no entorno do reservatório de Batalha GO/MG. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: Newton Moreira de Souza, Coorientadora: Patrícia de Araújo Romão. 2016.

Tese de Doutorado

ANDRELISA SANTOS DE JESUS. Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares: estudo de caso da cidade de Anápolis – GO. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: José Camapum De Carvalho. 2013.

GISLAINE CRISTINA LUIZ. Influência na relação solo/atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso-município de Goiânia/GO. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: Luis Fernando Martins Ribeiro. Coorientador: Jose Camapum de Carvalho. 2012.

JANAÍNA TATTO. Comportamento de filtros geotêxteis em taludes sujeitos a impactos de ondas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: Ennio Marques Palmeira. 2014.

MARIA TEREZA DA SILVA MELO. Geossintéticos como proteção contra mecanismos de erosão superficial. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Orientador: Ennio Marques Palmeira. Em Andamento.

Prefácio

Quando fui convidado para contribuir com o prefácio deste livro me senti honrado e orgulhoso por fazer parte desta história e por contribuir para esta importante etapa de disponibilização do conhecimento à sociedade. Os motivos são vários.

A história deste livro é o coroamento de um somatório de experiências e conhecimentos acumulados ao longo de anos.

Começo destacando os estímulos recebidos para o desafio do projeto. Este estímulo veio pela provocação construtiva de colegas de FURNAS, dedicados e comprometidos com um futuro melhor para nossa sociedade e para a empresa em que trabalhamos. Esses profissionais apontaram a anseio de um novo olhar sobre a questão dos reservatórios, e suas relações com o entorno, para algo além da tradicional à engenharia de infraestrutura que o nosso país construiu ao longo das últimas décadas.

Para ilustrar o quanto a questão é relevante para a empresa que trabalhamos, registro que o perímetro de parte dos reservatórios de FURNAS é da ordem de 2 vezes a costa brasileira. Grande é a empresa. Grande é a responsabilidade. Grandes são os desafios. Igualmente grande é o histórico de competência e dedicação pelo bem fazer que os técnicos de FURNAS e seus parceiros tem tido.

A partir dos estímulos iniciais, com a integração dos conhecimentos acumulados por esses profissionais, ao conhecimento e atuação da equipe da área de tecnologia de FURNAS, começamos uma jornada juntamente com os nossos parceiros tecnológicos da Universidade Federal de Goiás e Universidade de Brasília. Destino: a construção deste novo olhar para a interação de nossos reservatórios com o seu entorno. Olhar mais abrangente e mais evoluído com os estudos e a tecnologia empenhada pela preciosa atividade de pesquisa e desenvolvimento, alavanca do crescimento e do desenvolvimento.

Acreditar sempre. Melhorar sempre. Evoluir continuamente. Esta é a nossa crença. Nosso País pode e também faz. A produção do conhecimento e da tecnologia gerada por intermédio deste projeto é um exemplo disto. É mais um tijolo que colocamos para a construção de um País melhor.

A relevância disto? Simples. A conjugação da produção de energia para o desenvolvimento econômico e social, com sustentabilidade econômica, social e ambiental pode ser considerado como o desafio do século. Este trabalho objetivou (e conseguiu) prestar algumas contribuições nesse sentido. A sua leitura e utilização poderá prover a cada um a condição de sua própria avaliação sobre esse quesito.

Importante destacar o relevante instrumento existente em nosso País que propiciou as condições necessárias para o acontecimento deste projeto - o programa de inovação tecnológica do setor elétrico estabelecido pela lei 9.991/2000. A condição criada por essa política pública tem gerado, há mais de 15 anos, importantes contribuições ao desenvolvimento e aperfeiçoamento dos serviços de energia elétrica em nosso país. Mais uma vez, devemos, sempre, acreditar, trabalhar e contribuir para o desenvolvimento de nosso País. Há caminhos, meios, oportunidades, instituições e pessoas que fazem isto continuamente.

Por intermédio da leitura e do estudo deste livro passamos por áreas como a gestão social e educacional dos proprietários lindeiros, importantes atores no controle dos processos erosivos. Mas passamos também pela inovação de métodos de ensaios, testes e modelagem, tudo com a finalidade de prover a todos os agentes, sejam do poder público ou do setor privado, instrumentos para avaliar, prevenir, mitigar e administrar este fenômeno natural que pode (caso não seja bem cuidado) ocorrer também nas margens dos reservatórios, sejam naturais ou artificiais.

Enfim, convido a todos os profissionais que se interessam pelo tema a utilizarem este livro, pois consolida um conhecimento que é fruto de cinco a seis anos de trabalho e dedicação de uma equipe qualificada e comprometida com o crescimento da engenharia e de nosso País.

Ricardo André Marques, *M.Sc.*

Gerente de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica (GST.E) – Eletrobras Furnas

Mestre em Gestão Tecnológica – Unicamp

Apresentação

As erosões antrópicas ocorrem com grande intensidade em todos os países de clima tropical. Entretanto, na região central do Brasil, onde predomina um espesso manto de solo e distribuição desigual de chuvas, com a concentração de um grande volume de precipitações em poucos meses do ano, a combinação desses fatores propicia uma maior probabilidade de ocorrência de processos erosivos.

O problema causado por uma erosão pode ser analisado por diferentes ângulos, mas certamente dois chamam a atenção: O impacto ambiental e/ou socioambiental causado no local da erosão e a deposição dos sedimentos arrancados em local mais a jusante da posição de origem, e quase sempre dentro de um curso d'água ou reservatório. Pensando assim, os reservatórios, grandes ou pequenos, geralmente convivem com ambos os impactos. Por este motivo surgiu o interesse em pesquisar sobre ocorrências de erosões nas áreas marginais de reservatórios.

O presente livro faz parte de um projeto P&D proposto por Furnas para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que acatou e lançou o edital de pesquisa. O projeto foi desenvolvido por uma parceria da Eletrobras Furnas/ Universidade Federal de Goiás e Universidade de Brasília, com a coordenação administrativa da FUNAPE (Fundação de Apoio a Pesquisa da UFG), no período de 2011/2016. A ideia de se publicar o livro veio do interesse dos pesquisadores apresentarem os resultados alcançados, mostrando particularidades desse problema (erosões) num contexto de obras com imensos perímetros.

Além da equipe participante do projeto, muitos outros renomados profissionais foram convidados a contribuir com experiências de outras regiões, a fim de deixar o texto mais rico e mais continental. Somos 72 autores, distribuídos em 25 capítulos, que trataram desde os aspectos filosóficos, psicossociais e socioambientais do problema, passando de forma profunda pela parte técnica, e destacando a importância da educação ambiental. Destaca-se que nenhum dos capítulos passou por revisão de seus conteúdos técnicos, sendo, portanto, de total mérito e responsabilidade dos autores.

Os Organizadores gostariam de agradecer e enaltecer o trabalho de produção da capa pela artista, e já uma “*expert* em erosões”, Ana Cláudia Lelis, que há vários anos vem participando e enriquecendo os produtos finais, desde a primeira cartilha no tema.

Agradecimentos também são direcionados aos diversos profissionais de Furnas que acolheram e colaboraram com todas as campanhas em campo pelas UHEs de Batalha, Furnas e Itumbiara. Sem eles, o acesso a pontos tão remotos, por terra e por água, seria impossível.

A primeira edição será disponibilizada, de forma eletrônica e gratuita, pelos sítios de Furnas, UFG e UnB. Em breve uma edição impressa será produzida para que um público maior, incluindo bibliotecas e escolas, seja alcançado.

A Comissão Organizadora agradece a todos autores e àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a finalização deste livro, que busca socializar o conhecimento, mas principalmente discutir a importância e o papel de toda a sociedade nas ações de prevenção a processos erosivos no entorno dos reservatórios.

Goiânia, dezembro de 2016.

Maurício Martines Sales
José Camapum de Carvalho
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Marta Pereira da Luz
Newton Moreira de Souza
Renato Resende Angelim
Comissão Organizadora

Autores do Livro

- Ada Cristina Scudelari** Engenheira Civil, doutora em Engenharia Civil. Professora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
Autoria: capítulo 16.
- Adriano Elísio de Figueirêdo** Engenheiro civil, doutor em Engenharia de Processos.
Lopes Lucena Professor da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande.
Autoria: capítulo 23.
- Agustina Rosa Echeverria** Bacharel, licenciada e mestra em Química, doutora em Educação. Professora do Instituto de Química, do Programa de Pós-graduação em Educação em Ciências e Matemática e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 2.
- Alex Vaz de Menezes** Engenheiro civil. Mestrando do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás e gerente de obras da Sete Engenharia.
Autoria: capítulo 11.
- Aline de Arvelos Salgado** Bióloga, mestra em Engenharia do Meio Ambiente. Doutoranda em Ciências Ambientais do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 2.
- Ana Cláudia Lelis** Arquiteta, Profissional liberal.
Autoria: capa

- André Luís Brasil Cavalcante** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia, professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: capítulo 20.
- Andreliisa Santos de Jesus** Geógrafa, doutora em Geotecnia. Professora adjunta do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 8.
- Anna Karina Chaves Delgado** Engenheira civil e de segurança do trabalho, Doutora em Geotecnia. Analista de infraestrutura do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão e lotada no Ministério dos Transportes.
Autoria: capítulo 19.
- Arlam Carneiro Silva Júnior** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Professor titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, Aparecida de Goiânia.
Autoria: capítulo 22.
- Carlos Alberto Lauro Vargas** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 11.
- Cezar Augusto Burket Bastos** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil. Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande.
Autoria: capítulo 5.
- Cyntia Bernardes de Sousa Arroyo** Tecnóloga em Gestão Ambiental e bacharel em Direito. Advogada de Furnas Centrais Elétricas S.A.
Autoria: capítulo 1.
- Diego Tarley Ferreira Nascimento** Geógrafo, doutor em Geografia. Professor da Universidade Estadual de Goiás – Campus Iporá e da Pontifícia Universidade Católica de Goiás.
Autoria: capítulos 8 e 15.

- Diógenes Mortari** Bacharel em Geologia, mestre em Geotecnia. Funcionário da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal.
Autoria: capítulo 4.
- Eder Carlos Guedes dos Santos** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil de Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 21.
- Eleudo Esteves de Araújo
Silva Junior** Arquiteto, mestre em Arquitetura e Urbanismo. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.
Autoria: capítulo 14.
- Ennio Marques Palmeira** Engenheiro Civil, PhD em Engenharia Civil, professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: capítulo 21.
- Eufrosina Terezinha Leão
Carvalho** Engenheiro civil, doutora em Geotecnia. Engenheira na Solo e Água Engenharia e Serviços.
Autoria: capítulo 22.
- Fernanda Posch Rios** Engenheira civil, doutora em Ciências Ambientais. Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia; Núcleo de Estudos e Pesquisas em Engenharia Civil e Meio Ambiente – Encima IFG/GO.
Autoria: capítulo 2.
- Fillipe de Paula Almeida** Acadêmico do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulos 6 e 15.
- Gilson de Farias Neves
Gitirana Junior** Engenheiro civil, PhD em Engenharia Civil. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulos 5, 6 e 22.

- Gislaine Cristina Luiz** Geógrafa, doutora em Geotecnia. Professora do Instituto de Estudos Socioambientais e do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 6.
- Glacielle Fernandes Medeiros** Tecnóloga em Agrimensura, mestra em Engenharia Civil. Professora adjunta do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos.
Autoria: capítulo 4.
- Heloisa Helena A. B. da Silva** Geóloga, mestre em Mineralogia e Petrologia. Geóloga da divisão de Tecnologia em Engenharia Civil da Eletrobras Furnas.
Autoria: capítulo 10.
- Janaina Tatto** Engenheira civil, doutora em Geotecnia. Engenheira da Dynatest Engenharia Ltda.
Autoria: capítulo 11.
- Janaína Teixeira Camapum de Carvalho** Bacharel em Direito e Administração. Auditora do Tribunal de Contas do Distrito Federal e advogada.
Autoria: capítulo 1.
- João Guilherme Rassi Almeida** Engenheiro ambiental. Mestre em Engenharia Civil. Professor adjunto do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos e professor assistente da Pontifícia Universidade Católica de Goiás.
Autoria: capítulo 4.
- Joel Roberto Guimarães Vasco** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Elétrica, professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulos 11 e 12.
- Jonny Dantas Patricio** Engenheiro civil, mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Doutorando em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco.
Autoria: capítulo 23.

- José Camapum de Carvalho** Bacharel em Engenharia Civil, Administração e Direito, doutor em Engenharia Civil, professor titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: apresentação e capítulos 1, 3, 4, 8, 10, 14, 16, 17, 19, 20 e 25.
- José Felipe Ribeiro** Bacharel em Biologia, doutor em Ecologia. Pesquisador da Embrapa Cerrados.
Autoria: capítulo 9.
- Karlla Kristina Silva Cavalcante** Engenharia Agrônoma. Profissional Liberal
Autoria: capítulo 22.
- Katerine da Cruz Leal Sonoda** Psicóloga, doutora em Psicologia Clínica e Cultura. Pesquisadora da Universidade de Brasília.
Autoria: capítulo 3.
- Klebber Teodomiro Martins Formiga** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento, professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 12.
- Leandro Olivio Nervis** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil, professor da Universidade de Santa Cruz do Sul.
Autoria: capítulo 19.
- Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena** Engenheira civil, doutora em Engenharia Civil. Professora da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande.
Autoria: capítulo 23.
- Lenildo Santos da Silva** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Professor da Universidade de Brasília.
Autoria: capítulo 14.
- Lilian Ribeiro de Rezende** Engenheira civil, doutora em Geotecnia. Professora associada da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 19.

- Lucas Espíndola Rosa** Bacharel em Geografia, especialista em Gestão e Planejamento Ambiental. Técnico do Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 18.
- Luís Edmundo Prado de Campos** Engenheiro civil, mestre em Engenharia Civil. Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal da Bahia.
Autoria: capítulo 16.
- Marcelo Buras** Engenheiro civil, M.Sc. Pesquisador dos Institutos Lactec.
Autoria: capítulo 24.
- Márcia Dieguez Leuzinger** Bacharel em Direito, doutora em Desenvolvimento Sustentável. Procuradora do Estado do Paraná e professora dos cursos de graduação e pós-graduação em Direito do Centro Universitário de Brasília.
Autoria: capítulo 1.
- Márcia Maria dos Anjos Mascarenha** Engenheira civil, doutora em Geotecnia. Professora da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: apresentação e capítulos 4, 11 e 25.
- Márcio Henrique de Campos Zancopé** Bacharel em Geografia, doutor em Geografia. Professor do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 18.
- Maria Cristina de Oliveira** Bacharel em Ciências Biológicas, doutora em Engenharia Florestal. Professora adjunta da Universidade de Brasília, Faculdade UnB Planaltina.
Autoria: capítulo 9.
- Mariana dos Santos Diniz** Bacharel em Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília (UnB).
Autoria: capítulo 14.
- Marisaides Cruz Lima** Engenheira civil, doutora em Geotecnia. Engenheira geotécnica da empresa Ginger CEBTP.
Autoria: capítulo 4.

- Marlon Silva Schlieve** Engenheiro civil. Engenheiro da Gerência de Pesquisas, Serviços e Inovação Tecnológica da Eletrobras Furnas e mestrando em Engenharia Civil no Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 11.
- Marluce Silva Sousa** Geógrafa, mestra em Geografia. Professora do Instituto Federal de Goiás – Campus Jataí.
Autoria: capítulo 8.
- Marta Pereira da Luz** Engenheira civil, doutora em Ciências Ambientais. Coordenadora de P&D na Eletrobras Furnas e professora da Pontifícia Universidade Católica de Goiás.
Autoria: apresentação e capítulos 2, 18 e 25.
- Mauricio Martines Sales** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil de Universidade Federal de Goiás.
Autoria: apresentação e capítulos 15, 16, 21 e 25.
- Maximiliano Bayer** Bacharel em Geologia, doutor em Ciências Ambientais. Professor do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 18.
- Miguel Cooper** Engenheiro agrônomo, doutor em Agronomia. Professor do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas no Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
Autoria: capítulo 17.
- Newton Moreira de Souza** Bacharel em Engenharia Civil, doutor em Engenharia Civil (Geotecnia). Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.
Autoria: apresentação e capítulos 7, 13, 14 e 25.
- Olavo Francisco dos Santos Jr.** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil, professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
Autoria: capítulo 16.

- Oswaldo de Freitas Neto** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia, professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
Autoria: capítulo 16.
- Patrícia de Araújo Romão** Geóloga, doutora em Geotecnia, professora do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulos 4, 6, 7, 8, 13 e 15.
- Patrícia Layne Alves** Arquiteta, doutora em Ciências Ambientais. Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia; Núcleo de Estudos e Pesquisas em Engenharia Civil e Meio Ambiente.
Autoria: capítulo 2.
- Renata Santos Momoli** Engenheira agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas. Professora do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 17.
- Renato Batista de Oliveira** Tecnólogo em Infraestrutura de Vias. Técnico da Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil da Empresa Eletrobras Furnas.
Autoria: capítulo 10.
- Renato Cabral Guimarães** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia, gerente da Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil da Empresa Eletrobras Furnas e professor da Universidade Estadual de Goiás.
Autoria: capítulo 10.
- Renato Resende Angelim** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: apresentação e capítulos 21 e 25.
- Ricardo André Marques** Engenheiro Civil, mestre em Engenharia com ênfase em gestão tecnológica. Gerente de Serviços e Inovação Tecnológica (GST.E) da empresa Eletrobrás-Furnas
Autoria: Prefácio.

- Ricardo Nascimento Flores Severo** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil, professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.
Autoria: capítulo 16.
- Rideci de Jesus da Costa Farias** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Sócio-proprietário da Reforsolo – Engenharia, Geotecnia e Meio Ambiente.
Autoria: capítulo 14.
- Rodrigo Moraes da Silveira** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil. Pesquisador dos Institutos Lactec e professor do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia dos Institutos Lactec e professor da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
Autoria: capítulo 24.
- Saul Barbosa Guedes** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil. Professor adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande.
Autoria: capítulo 23.
- Silvio Romero Melo Ferreira** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil, professor associado dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco.
Autoria: capítulo 23.
- Sofia Leão Carvalho** Bacharel em Engenharia Civil, mestra em Engenharia Civil. Projetista de microdrenagem urbana e Professora da Faculdade Paraíso do Ceará.
Autoria: capítulo 22.
- Tania Mariela Matamoros Sevilla** Bacharel em Engenharia Civil. Mestra em Geotecnia.
Autoria: capítulo 11.
- Tatiane Souza Rodrigues Pereira** Engenheira Ambiental, mestra em Engenharia do Meio Ambiente. Doutoranda em Ciências Ambientais do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás.
Autoria: capítulo 12.

- Terezinha de Camargo Viana** Psicóloga, doutora em Sociologia. Professora da graduação e da pós-graduação do Departamento de Psicologia Clínica do Instituto de Psicologia da Universidade de Brasília.
Autoria: capítulo 3.
- Vinicius de Oliveira Kühn** Engenheiro Sanitarista e Ambiental, mestre em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, na área de concentração em Geotecnia. Professor do Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias da Universidade Federal do Oeste da Bahia.
Autoria: Capítulo 5
- Wagner Santos de Almeida** Engenheiro mecânico, doutor em Desenvolvimento Sustentável e Tecnologias Ambientais. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília.
Autoria: capítulo 14.
- Washington Peres Núñez** Engenheiro civil, doutor em Engenharia Civil, professor associado do Departamento de Engenharia Civil e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Autoria: capítulo 19.
- Wilson Conciani** Engenheiro civil, doutor em Geotecnia. Professor do Instituto Federal de Brasília.
Autoria: capítulo 19.
- Wisley Moreira Farias** Bacharel e licenciado em Química, doutor em Geotecnia. Consultor independente.
Autoria: capítulo 10.
- Yamile Valencia González** Engenheira civil, doutora em Geotecnia. Professora associada do Departamento de Engenharia Civil e do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
Autoria: capítulo 10.

Sumário

CAPÍTULO 1

Aspectos legais relacionados à preservação ambiental das margens dos reservatórios

1	Introdução.....	1
2	Questões ambientais relacionadas aos reservatórios.....	2
3	Princípios de direito ambiental.....	4
4	Hierarquia das normas.....	11
5	Aspectos constitucionais.....	13
6	Legislação infraconstitucional.....	17
7	Os reservatórios no contexto do direito do consumidor.....	29
8	Considerações finais.....	30
	Referências.....	32

CAPÍTULO 2

Aspectos sociais e de Educação Ambiental emergentes dos processos de implantação de UHE's

1	Introdução.....	35
2	O impacto socioambiental das grandes represas.....	38
3	A matriz energética, a complexidade ambiental e a engenharia.....	39
4	A educação ambiental na perspectiva da participação social.....	41
5	Impactos socioambientais advindos da implantação e operação de reservatórios de usinas hidrelétricas no Brasil.....	42
6	Uma experiência de educação ambiental como meio de compreensão dos impactos ocasionados na implantação da UHE de Batalha.....	44
7	Considerações finais.....	49
	Referências.....	50

CAPÍTULO 3
Erosão em borda de reservatório: alguns aspectos psicossociais

1	Introdução.....	53
2	Contextualização do Problema	54
3	Notas sobre participação social e responsabilização	59
4	A educação e responsabilização como caminho possível	61
5	Considerações finais	62
	Referências	64

CAPÍTULO 4
Sulcos, ravinas e voçorocas

1	Introdução.....	65
2	Questões gerais.....	66
	2.1 Aspectos hidrológicos.....	66
	2.2 Processos erosivos.....	67
	2.2.1 Erosão laminar	70
	2.2.2 Erosão em sulcos.....	71
	2.2.3 Erosão em ravinas e voçorocas.....	71
	2.3 Bacia hidrográfica	72
	2.4 Morfologia do meio físico.....	73
	2.5 Características das chuvas.....	76
	2.6 Propriedades do solo	77
3	Processo evolutivo de ravinas e voçorocas.....	81
	Considerações finais.....	89
	Referências	90

CAPÍTULO 5
Solos Não Saturados e os Processos Erosivos

1	Introdução.....	91
2	O papel da não saturação na resistência ao cisalhamento de solos	91
	2.1 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados	92
	2.1.1 Fredlund, Morgenstern e Widger (1978).....	94
	2.1.2 Vanapalli et al. (1996)	95
	2.1.3 Fredlund et al. (1996)	96
	2.1.4 Bao et al. (1998).....	97
	2.1.5 Vilar (2006)	98
	2.2 Comentários sobre a resistência ao cisalhamento de solos não saturados e o processo erosivo.....	98
3	Previsão da erodibilidade em solos não saturados por fluxo superficial	98
	3.1 Dados preliminares.....	100

3.2	Investigação in situ do comportamento dos solos frente à erosão	100
3.3	Avaliação da erodibilidade.....	101
3.3.1	A avaliação direta da erodibilidade	101
3.3.2	A avaliação indireta da erodibilidade.....	108
3.3.2.1	1º nível–Avaliação da erodibilidade a partir de dados da caracterização geotécnica.....	110
3.3.2.2	2º nível – Avaliação da erodibilidade a partir de ensaios da Metodologia MCT	113
3.3.2.3	2º nível – Avaliação da erodibilidade a partir de ensaios de resistência ao cisalhamento.....	116
3.4	Roteiro e fluxograma do método proposto por Bastos (1999).....	117
4	Comentários Finais	119
	Bibliografia	120

CAPÍTULO 6

Interação solo-atmosfera e a sua relação com erosão em borda de reservatórios

1	Introdução.....	127
2	Dinâmica climática e os diferentes níveis escalares do clima no entendimento dos processos erosivos de borda de reservatório.....	130
2.1	Variações espacial e temporal da temperatura, microclima e erosões de borda de reservatórios.....	133
2.2	Radiação solar e a escala microclimática	140
3	Aplicação dos estudos climáticos aos estudos de erosão de borda.....	141
3.1	Influência regional do clima na determinação das características climáticas nos Estados de Goiás e Minas Gerais.....	141
3.2	Influência do clima na erosividade dos reservatórios de Itumbiara/GO, de Furnas/MG e de Batalha/MG	145
	Referências	148

CAPÍTULO 7

Aspectos geológicos e hidrogeológicos na deflagração e evolução da erosão hídrica em margens de reservatórios

1	Introdução.....	153
2	Condicionantes geológicos da erodibilidade e da suscetibilidade à erosão hídrica laminar.....	154
3	Condicionantes geológicos e hidrogeológicos da deflagração e/ou evolução da erosão linear hídrica e processos associados.....	159
3.1	Suscetibilidade à erosão hídrica linear – Deflagração e evolução quanto à litologia e perfil de alteração	160
3.2	Suscetibilidade à Erosão hídrica linear – Deflagração e Evolução quanto às Estruturas geológicas	160

3.3 Nível d'água freático e deflagração/evolução dos processos erosivos lineares de voçorocamentos.....	161
4 Processos erosivos hídricos no Entorno da UHE de batalha, Furnas e Itumbiara, segundo a Geologia e a Hidrogeologia.....	163
5 Considerações finais	168
Referências	169

CAPÍTULO 8

A influência de aspectos geomorfológicos, de cobertura do solo e climáticos no surgimento e evolução de processos erosivos no entorno de reservatório

1 Introdução.....	171
2 Aspectos geomorfológicos	171
2.1 Dinâmica da bacia hidrográfica	172
2.2 Influência de aspectos morfométricos e morfológicos	176
2.3 Condições geomorfológicas das margens.....	179
3 Aspectos de cobertura do solo.....	180
3.1 A cobertura vegetal natural	183
3.2 A influência da cobertura antropizada.....	184
4 Aspectos climáticos.....	187
4.1 Interação entre os aspectos climáticos e a geomorfologia	188
4.2 Interação entre os aspectos climáticos e a cobertura do solo.....	190
5 Considerações finais	191
Referências	192

CAPÍTULO 9

Impactos na vegetação em área de implantação de reservatório no bioma cerrado

1 Introdução.....	195
2 As fisionomias do bioma cerrado e seus condicionantes naturais.....	197
3 Impactos na vegetação nativa advindos da implantação de reservatórios	198
4 Recuperação vegetal pós-inundação de reservatórios.....	201
4.1 Métodos de restauração.....	203
5 Considerações finais	205
Referências	206

CAPÍTULO 10

A micromorfologia no contexto das erosões de borda de reservatórios

1 Introdução.....	209
-------------------	-----

2	Micromorfologia dos perfis de solos tropicais e os processos erosivos de bordas de reservatórios.....	210
3	Aspectos químico-mineralógicos e as erosões de borda de reservatório	220
4	Aspectos biológicos e a erosão de borda de reservatório.....	222
5	Considerações finais	225
	Referências	226

CAPÍTULO 11

Ensaio aplicado ao estudo de erosões nas bordas e áreas do entorno de reservatórios

1	Introdução.....	229
2	Erosões em bordas de reservatório	229
2.1	Erosões devido ao impacto das ondas nas bordas dos reservatórios.....	230
2.1.1	Processo de formação das ondas.....	230
2.1.2	Canal hidráulico para estudo das ondas	233
2.1.2.1	Ondas irregulares.....	233
2.1.2.2	Leis de semelhança	234
2.1.3	Ensaio de erosão por impactos de ondas	235
2.2	Erosões devido à variação do nível do reservatório	239
3	Erosões em áreas do entorno de reservatórios	242
3.1	Ensaio de Inderbitzen.....	243
3.1.1	Procedimento de ensaio	244
3.1.2	Discussão dos resultados.....	246
3.2	Ensaio Pinhole.....	247
3.2.1	Procedimento de ensaio	248
3.2.2	Discussão dos resultados.....	249
3.3	Ensaio de avaliação de critério de erodibilidade mediante metodologia MCT.....	250
3.3.1	Procedimento de ensaio	251
3.3.2	Discussão dos resultados.....	251
3.4	Considerações finais	253
4	Comentários finais	253
	Referências	254

CAPÍTULO 12

Monitoramento e modelagem de ondas em reservatório

1	Introdução.....	257
2	Classificação das Ondas.....	258
3	Características físicas das Ondas.....	259
3.1	Altura da onda.....	260
3.2	Período de onda	261

4	Técnicas de Observação das Ondas	262
4.1	Medições diretas.....	262
4.1.1	Boias.....	262
4.1.2	Estruturas instaladas no fundo (Fonte: www.navcon.com.br).....	263
4.1.2.1	Correntômetros ou medidores pontuais	264
4.1.2.2	Perfiladores de corrente	264
4.2	Sensoriamento remoto	266
4.2.1	Uso de imagens.....	266
4.2.2	Altimetria.....	267
5	Modelos de Propagação de Ondas	268
5.1	Energia das ondas	268
5.2	Equações básicas da cinética das ondas	270
5.3	Transporte de sedimentos.....	272
5.4	Avalanche.....	274
	Referências	275

CAPÍTULO 13

Cartografia geotécnica e a preservação ambiental das bordas dos reservatórios

1	Introdução.....	277
2	Princípios da Cartografia Geotécnica.....	279
3	Uso de Sistemas de Informações Geográficas para a Cartografia Geotécnica	280
4	Cartografia Geotécnica Aplicada a Estudos de Borda de Reservatórios.....	281
5	Considerações Finais	284
	Referências	284

CAPÍTULO 14

Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas

1	Introdução.....	287
2	Vulnerabilidade ambiental.....	289
3	Modelagem ambiental	292
3.1	Dinâmica EGO	292
4	Área de estudo	293
5	Materiais e métodos.....	295
5.1	Materiais	295
5.1.1	Softwares	295
5.1.2	Produtos cartográficos.....	295
5.1.3	Dados de pluviometria	296
5.1.4	Imagens de sensores remotos	296
5.2	Metodologia	297
5.2.1	Mapas temáticos de uso e cobertura do solo.....	297
5.2.2	Mapa de vulnerabilidade ambiental	299

5.2.2.1 Mapa de suscetibilidade a processos erosivos laminares	300
5.2.2.2 Mapa de suscetibilidade a processos erosivos lineares.....	302
5.2.2.3 Mapa de suscetibilidade à inundação	303
5.2.2.4 Mapa de suscetibilidade às ações antrópicas	304
5.2.3 Cenário prospectivo de uso e cobertura do solo	304
6 Apresentação e análise dos resultados obtidos.....	308
6.1 Mapas temáticos de uso e cobertura do solo.....	308
6.2 Mapa de vulnerabilidade ambiental (VA).....	309
6.2.1 Mapa de Suscetibilidade à erosão laminar.....	309
6.2.2 Mapa de suscetibilidade à erosão linear.....	314
6.2.3 Mapas de suscetibilidades à inundação e às ações antrópicas.....	315
6.2.4 Obtenção do mapa de vulnerabilidade ambiental	315
6.3 Dinâmica ambiental: cenário prospectivo do mapa de uso e ocupação do solo	316
7 Considerações finais	319
Referências	321

CAPÍTULO 15

Mapeamento de cobertura do solo em bordas de reservatório e processos erosivos associados

1 Introdução.....	323
2 Mapeamentos de cobertura do solo.....	324
2.1 Definições e escopo.....	324
2.2 Metodologias e tipos de dados empregados.....	324
2.3 Sistemas de classificação de referência internacional e nacional.....	326
3 Mapeamento da cobertura do solo para o caso de bordas de reservatórios.....	332
3.1 Procedimentos metodológicos para proposta de mapeamento integrado da cobertura do solo em bordas de reservatórios	332
3.2 Exemplos do mapeamento da cobertura do solo realizado para bordas de reservatórios.....	334
4 Processos erosivos associados à cobertura do solo em bordas de reservatórios.....	338
4.1 Rebaixamento temporário do reservatório.....	340
4.2 Ocupação das margens de reservatório	341
5 Considerações finais	343
Referências	344

CAPÍTULO 16

Erosão continental, costeira e de bordas de reservatórios

1 Introdução.....	345
2 Erosão hídrica: ocorrências e impactos gerados	346
3 Erosão hídrica – estrutura conceitual.....	348

3.1 Fatores disponentes e predisponentes	348
3.2 Desencadeamento de processos erosivos.....	349
4 Processos continentais.....	351
4.1 Erosão laminar, sulcos, ravinas e voçorocas	351
4.2 Movimentos de massas em encostas	352
5 Erosão costeira.....	355
5.1 Aspectos conceituais.....	355
5.2 Mecanismos de recuo da linha de costa em áreas de falésias.....	356
6 Erosão em bordas de reservatórios.....	360
7 Mecanismos de evolução das erosões com origem hídrica	364
8 Considerações finais	365
9 Agradecimentos.....	365
Referências	365

CAPÍTULO 17

Erosão hídrica em solos cultivados

1 Introdução.....	369
2 Problemática da erosão no mundo	370
3 Iniciativas para mitigação da degradação dos solos	372
4 Origem e evolução da erosão hídrica em solos cultivados	373
4.1 Conceitos.....	373
4.2 Processos hidrológicos de Superfície e Subsuperfície	376
4.3 Fatores condicionantes dos Processos erosivos hídricos	378
4.3.1 Clima	378
4.3.2 Topografia e morfologia	379
4.3.3 Cobertura vegetal e uso do solo	381
4.3.4 Interação solo-atmosfera.....	385
4.3.5 Atributos intrínsecos dos solos	385
5 Dendrogeomorfologia – perspectivas e tendências de monitoramento dos processos erosivos hídricos.....	392
6 Considerações finais	393
Referências	394

CAPÍTULO 18

Aporte de sedimentos de redes de drenagem tributárias de reservatórios de usinas hidrelétricas

1 Princípios do transporte de sedimentos fluviais	399
2 O transporte de sedimentos em redes de drenagem	406
3 O potencial de transferência de sedimentos das bacias contribuintes da UHE Itumbiara: estudo de caso.....	411
3.1 Potencial de transferência de sedimentos.....	413

3.2 Concentração de sólidos em suspensão (CSS) e descarga sólida em suspensão (QSS).....	416
4 Considerações finais	419
Referências	420

CAPÍTULO 19

Erosão em vias não pavimentadas e em obras de engenharia e suas consequências para os reservatórios

1 Introdução.....	423
2 Obras de engenharia e os processos erosivos como fontes de assoreamento de cursos d'água e reservatórios.....	423
3 Ações preventivas e mitigadoras dos processos erosivos.....	425
3.1 Obras civis.....	425
3.2 Áreas de empréstimo	428
3.3 Rodovias não pavimentadas.....	429
3.3.1 Traçado.....	430
3.3.2 Drenagem.....	433
3.3.3 Revegetação	435
4 Materiais de construções das vias	436
4.1 Exemplos de especificações para a camada de revestimento	436
4.1.1 A especificação do DNIT e a prescrição da classificação MCT	436
4.1.2 A especificação da República da África do Sul	438
4.2 O uso de solos finos	439
4.3 O uso de solos finos estabilizados.....	449
4.4 O uso de materiais granulares.....	451
5 O problema de erosão superficial em pavimentos com revestimento primário.....	451
5.1 A erodibilidade em solos.....	451
5.2 Estudo de caso	454
5.2.1 Ensaios laboratoriais para a avaliação da erodibilidade.....	456
5.2.2 Ensaios de cisalhamento direto.....	458
5.2.3 Cálculos para a estimativa da erosão do trecho experimental proposto no estudo de caso	459
5.2.4 Avaliação da erosão ocorrida no trecho experimental	462
6 Considerações finais	464
Referências	465

CAPÍTULO 20

Probabilidade de ruptura transiente de taludes não saturados em bordas de reservatórios

1 Introdução.....	469
-------------------	-----

2	Infiltração de água da chuva	470
3	Resistência cisalhante não saturada	473
4	Estabilidade de talude não saturado	474
5	Estudo de caso: infiltração e ruptura do talude na borda do reservatório.....	476
6	Análise paramétrica do fator de segurança transiente	479
7	Método do ponto de estimativa de rosenblueth.....	482
8	Análise estocástica do fator de segurança transiente.....	484
9	Considerações finais	486
10	Agradecimentos.....	487
	Referências	487

CAPÍTULO 21

Prevenção e controle de processos erosivos de borda de reservatório

1	Introdução.....	489
2	Ensaio de campo para o estudo da erodibilidade de solos.....	492
3	Intervenções visando à prevenção contra processos erosivos.....	498
4	Ações de controle e recuperação de erosões.....	451
5	Aplicação de geossintéticos em recuperação e prevenção de erosões.....	504
6	Comentários finais	507
	Referências	507

CAPÍTULO 22

Infiltração de águas pluviais para o controle de erosão e assoreamento de reservatórios de hidreléticas

1	Introdução.....	511
2	O papel da infiltração de água no controle de erosão	512
3	Sistemas mais utilizados para o controle das águas pluviais.....	515
	3.1 Poços de infiltração.....	516
	3.2 Trincheiras de infiltração	517
	3.3 Bacia de retenção e bacias de detenção	519
	3.4 Valos ou valas de infiltração	520
	3.5 Reservatórios de amortecimento	520
	3.6 Estruturas associadas.....	521
	3.7 Remoção de poluentes.....	524
4	Controle de erosão próximo aos reservatórios.....	525
5	Parâmetros de dimensionamento para os sistemas de infiltração	525
	5.1 Volume de aporte	525
	5.2 Taxa de infiltração.....	526
	5.3 Ensaio de laboratório	527

5.4 Nível do lençol freático.....	527
5.5 Interpretação dos resultados.....	527
5.6 Dimensionamento dos sistemas de infiltração.....	528
6 Considerações finais	528
Bibliografia	529

CAPÍTULO 23

Estudo de casos de reservatórios no estado da Paraíba

1 Introdução.....	531
2 Área de estudo	534
2.1 Barragem Saulo Maia – Areia.....	534
2.2 Barragem José Rodrigues - Campina Grande	535
2.3 Barragem de Vaca Brava – Areia.....	536
2.4 Barragem de Milhã – Puxinanã.....	536
2.5 Barragem Sindô Ribeiro – Massaranduba	537
3 Diagnóstico visual da erodibilidade e possíveis impactos ambientais	538
3.1 Características Gerais	538
3.2 Características de proteção	538
3.3 Características estruturais.....	539
4 Aspectos físicos.....	540
4.1 Textura.....	540
4.2 Plasticidade	542
4.3 Ensaio de desagregação	543
5 Considerações finais	543
Bibliografia	544

CAPÍTULO 24

Processo erosivo em borda de reservatório de UHE – Estudo de Caso

1 Introdução.....	547
2 Área de estudo	547
2.1 Localização da área de estudo e aspectos físicos da bacia hidrográfica	547
2.2 Características quanto à erosão.....	548
3 Inspeção de campo.....	550
4 Ensaio de laboratório	554
4.1 Resultados dos ensaios de laboratório.....	554
4.2 Ensaio de caracterização geotécnica	555
4.3 Índices físicos.....	555
4.4 Limites de Atterberg	555
4.5 Massa específica dos grãos.....	556
4.6 Ensaio de dispersão SCS (Soil Conservation Service).....	556

4.7 Pinhole test.....	561
4.8 Crumb Test	563
4.9 Inderbitzen	565
4.9.1 Equipamentos.....	567
4.9.2 Preparação da amostra	567
4.9.3 Execução do ensaio	568
4.9.4 Resultados obtidos.....	569
5 Considerações finais	570
Referências	571

CAPÍTULO 25

Considerações sobre erosões em borda de reservatório

1 Introdução.....	573
2 Aspectos sociais no contexto das erosões de borda de reservatório.....	573
3 Aspectos educacionais e legais no contexto das erosões de borda de reservatório	574
4 Disciplinaridade, multidisciplinaridade e as erosões de borda de reservatório.....	578
5 A erosividade da água, a erodibilidade do solo e as erosões de borda de reservatório..	579
6 Aspectos físicos e as erosões de borda de reservatório	581
7 Aspectos biológicos e as erosões de borda de reservatório.....	581
8 O monitoramento espacial e as erosões de borda de reservatório.....	582
9 Considerações finais	582
Agradecimento	583
Referências	583

CAPÍTULO 1

Aspectos legais relacionados à preservação ambiental das margens dos reservatórios

José Camapum de Carvalho
Janaína Teixeira Camapum de Carvalho
Cynthia Bernardes de Sousa Arroyo
Márcia Dieguez Leuzinger

Palavras-chave: Princípios de Direito Ambiental. Erosão. Assoreamento. Contaminação.

1 Introdução

Os reservatórios de água são construídos para atenderem a diferentes finalidades, sejam elas econômicas, de consumo, de lazer ou simplesmente para o controle de vazões em períodos chuvosos, evitando alagamentos e inundações. Diante de tantas finalidades, a relação interativa entre os reservatórios e a sociedade é ampla, envolvendo várias questões relacionadas ao Direito.

À primeira vista, falar da relação entre o reservatório e a sociedade pode parecer surrealismo, e talvez até o seja, no que tange a uma certa libertação da lógica e da razão para ir além da consciência convencional, dentro de uma nova perspectiva com percepções voltadas para o desenvolvimento sustentável, no qual o meio físico e os seres vivos, entre os quais está o homem, devem interagir de modo permanente e equilibrado. Sociedade, meio ambiente e economia constituem os pilares sobre os quais deve-se operar o desenvolvimento qualificado como sustentável, permitindo não apenas um incremento na qualidade de vida das pessoas, mas também o respeito aos elementos naturais, dentre os quais a água, com suas multifuncionalidades. Como base para o desenvolvimento sustentável, a educação ambiental assume papel de grande relevância (CAMAPUM DE CARVALHO, J., 2009).

Voltando o olhar para as questões relacionadas ao Direito, o capítulo tratará inicialmente, embora de modo resumido, de questões ambientais afetas aos reservatórios. Em seguida abordará questões ligadas à hierarquia das leis, apresentando uma visão na qual, ao se integrar o meio físico e o tecido social, inverte-se a pirâmide, que passa a ter como fundamento de sustentação esses dois elementos. Depois, serão apresentados os princípios que orientam o Direito Ambiental, com foco na questão dos reservatórios, passando-se, em seguida, aos aspectos constitucionais e infraconstitucionais relacionados à construção e manutenção dos reservatórios. Finalmente, far-se-á uma breve análise relacionada aos direitos dos consumidores e serão apresentadas as considerações finais.

2 Questões ambientais relacionadas aos reservatórios

As questões ambientais devem integrar os reservatórios artificiais desde o seu nascimento, ou seja, desde quando se começa a planejar a sua construção, pois elas geralmente afetam diretamente o meio ambiente, intervindo em cursos d'água, na fauna e na flora, dentre outros recursos naturais disponíveis, e ao afetarem o meio ambiente interferem na própria vida da sociedade e dos seres humanos em si.

Na fase de planejamento do empreendimento, as preocupações iniciais devem voltar-se para estudos de viabilidade técnica, econômica e socioambiental. Deve ser estudada e analisada a relação reservatório-sociedade, solucionando preventivamente eventuais problemas socioambientais previstos para o futuro em consequência da implantação do reservatório. É necessário que se planeje a preservação da fauna e da flora e se avaliem os danos ambientais inevitáveis. Deve-se ainda planejar a remoção das riquezas naturais exauríveis que serão recobertas pela água, sendo que muitas delas, caso permaneçam no local, poderão ser prejudiciais à saúde da vida nas águas do reservatório e à própria vida útil do empreendimento. Quanto aos elementos bióticos, espécies endêmicas ou ameaçadas de extinção, por exemplo, devem receber especial atenção, a partir da elaboração de estratégias e planos específicos para sua preservação.

A fase construtiva deve prever a remoção efetiva da fauna e da flora, implantar vias de acesso ambientalmente seguras sem grandes riscos de erosão e planejar e executar a exploração das áreas de empréstimo, de modo a evitar danos ambientais na fase de construção e pós-construção. A Figura 1A ilustra o caso da área de empréstimo usada para a construção da UHE de Itumbiara, onde se gerou, *a posteriori*, graves problemas de erosão com elevado custo de recuperação da área degradada (Figura 1B).



Figura 1. Área de empréstimo, UHE de Itumbiara: antes da recuperação (a); depois de recuperada (b).
Fotos: Maurício Martines Sales (2012).

Na fase de enchimento do reservatório, deve-se ter atenção especial para com a fauna, pois durante o enchimento são formadas ilhas que se tornarão submersas ou isoladas de fontes de alimentos para os animais que ficaram aprisionados, devendo-se promover a sua remoção para *habitats* seguros e, na medida do possível, semelhantes àquele que ocupavam antes e que fora inundado.

Construído o reservatório, passa-se à necessidade de preservá-lo ambientalmente, protegendo-o contra erosões de borda e nas bacias de contribuição, pois as erosões nelas geradas conduzirão sedimentos ao reservatório, reduzindo sua vida útil. A melhor forma de propiciar a preservação ambiental do reservatório é conscientizar e educar a sociedade para práticas sustentáveis, como, por exemplo, não desmatar as margens, evitar o movimento de embarcações junto às margens sensíveis ao impacto de ondas, construir vias de acesso que evitem processos erosivos, não lançar águas servidas e lixo nas margens e no próprio reservatório, adotar técnicas de manejo nas áreas rurais que evitem processos erosivos e contaminação das águas e dos solos.

A ineficácia ou inexistência de educação ambiental não está atrelada a classes sociais. Por exemplo, a imagem mostrada na Figura 2 apresenta uma drenagem de águas pluviais que desembocam junto a um dos cartões-postais do Distrito Federal, a Ponte JK. Observa-se que, em pleno período de seca, a água está a fluir pelo sistema de drenagem, ficando a pergunta: qual a origem dessa água? A análise da água proveniente do córrego que nasce e atravessa uma área com presença de ocupantes de médio a alto poder aquisitivo, desembocando no mesmo local da drenagem de águas pluviais, mostrou-se com elevada carga de coliformes totais e fecais (AQUINO et al., 2016). Logo, essa situação conduz a algumas questões prévias: a população, ou parte dela, que ocupa o entorno do córrego e da drenagem de águas pluviais foi ou está sendo ambientalmente educada? Estaria essa população respeitando o artigo 225 da Constituição Federal? A solução para o problema estaria na punição dos responsáveis pela poluição ou em tornar efetiva a educação ambiental da sociedade? Certamente a solução não está no “vigiar e punir”, mas sim no educar, vigiar e só então punir em caso de desrespeito. Além disso, outros instrumentos, e não apenas os de “comando e controle”, podem ser pensados para auxiliar na preservação do meio ambiente.



Figura 2. Curso d'água e galeria de águas pluviais lançados no lago Paranoá.

Foto: José Camapum de Carvalho, 3 out. 2016.

Como se verá, as questões ambientais relacionadas à construção de reservatórios aqui indicadas e muitas outras não realçadas podem encontrar resposta no conhecimento e aplicações dos princípios de Direito Ambiental, que serão tratados no próximo item.

3 Princípios de direito ambiental

O Direito Ambiental traz uma série de preceitos norteadores da atuação humana e estatal frente à necessidade de proteção ambiental.

A Constituição Brasileira de 1988 traz, em seu artigo 225, o **direito à sadia qualidade de vida** e o **direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado**, os quais constituem o direito fundamental ao meio ambiente equilibrado introduzido em 1972 pela Declaração de Estocolmo. As erosões de margem dos reservatórios representam uma agressão a esses direitos, ao primeiro por atingirem o bem-estar social, e mesmo, em certos casos extremos, colocarem em risco a própria vida, e, ao segundo, por elas representarem o próprio desequilíbrio ambiental. O uso dos princípios de Direito Ambiental é de grande relevância para assegurar o respeito a tais direitos e ao direito fundamental ao meio ambiente equilibrado.

Primeiramente, no âmbito dos princípios de Direito Ambiental, cabe destaque ao **princípio da ubiquidade**, segundo o qual o meio ambiente ecologicamente equilibrado enquanto macrobem, ou seja, bem de todos, não encontra qualquer fronteira, seja espacial, territorial ou temporal. Assim, acontecimentos ambientais de um lado do planeta refletem em diversos ecossistemas e não só naquele em que se deu o evento, bem como perduram no tempo, podendo as manifestações reflexas ocorrerem em curto ou longo prazo. Não havendo a barreira temporal, cabe destacar que, quando a questão envolve o meio ambiente, passa a inexistir o direito adquirido. Por exemplo, um produtor rural que praticava agricultura em uma determinada área, onde parte fora ocupada por um reservatório construído para fins de abastecimento humano, poderá perder o direito de continuar a explorá-la na zona com risco de contaminação da água do reservatório por insumos agrícolas e/ou defensivos agrícolas, ou ainda na zona em que, com o enchimento do reservatório, passe a sofrer processos erosivos, requerendo a sua revegetação, pois tal prática tem consequências ambientais negativas reflexas. Nesses casos, a poluição da água com os insumos e defensivos agrícolas, assim como os processos erosivos, mesmo que oriundos da construção do reservatório, representam danos ao meio ambiente, inclusive ameaçando a vida humana e fazendo que o proprietário rural perca o direito ao uso que fazia da área. Não se pode, por isso, invocar o instituto do direito adquirido à exploração econômica da área.

Em reconhecimento a essa onipresença do bem ambiental, manifestou-se o Superior Tribunal de Justiça:

ADMINISTRATIVO E AMBIENTAL. AÇÃO CIVIL PÚBLICA. DESASSOREAMENTO DO RIO ITAJAÍ-AÇU. LICENCIAMENTO. COMPETÊNCIA DO IBAMA. INTERESSE NACIONAL.

[...] 2. O confronto entre o direito ao desenvolvimento e os princípios do direito ambiental deve receber solução em prol do último, haja vista a finalidade que este tem de preservar a qualidade da vida humana na face da terra. O seu objetivo central é proteger patrimônio pertencente às presentes e futuras gerações.

3. Não merece relevo a discussão sobre ser o Rio Itajaí-Açu estadual ou federal. A **conservação do meio ambiente não se prende a situações geográficas ou referências históricas, extrapolando os limites impostos pelo homem. A natureza desconhece fronteiras políticas. Os bens ambientais são transnacionais** [...] (STJ, 1ª Turma, REsp 588.022/SC, rel. Min. José Delgado, DJ 5/4/2014) (Grifou-se)

Ora, se o bem ambiental não encontra fronteiras, assim como o dano ambiental decorrente de sua degradação, torna-se complexa a tentativa de delimitação da extensão de um dano, seja no espaço ou no tempo, pois acontecimentos dessa natureza, mesmo quando isolados, possuem reflexos, por vezes desconhecidos, no meio ambiente como um todo. O dano ambiental possui características que o distinguem de outros danos e demandam, por isso prevenção. Exemplificam-se como características do dano ambiental: não respeitar fronteiras políticas, prolongar-se por tempo desconhecido, atingir uma pluralidade indefinida de vítimas, ser de difícil ou de impossível reparação e valoração (LEUZINGER; CUREAU, 2013). Diante disso, ocorrendo um dano ambiental, é razoável que sua reparação seja a mais ampla possível, buscando proteger não só o ecossistema diretamente afetado, mas todos aqueles sujeitos a consequências negativas reflexas (RODRIGUES, 2016, p. 309). Além disso, essa reparação deve ser capaz de atender não apenas às gerações contemporâneas ao dano, mas também às que estão por vir, garantindo um meio ambiente ecologicamente equilibrado para as gerações futuras, em atenção ao que dispõe o art. 225, *caput*, da Constituição Federal.¹

Vale mencionar, ainda, que o princípio da ubiquidade (onipresença) possui uma segunda faceta, dentro da qual, regra geral, todos os direitos subjetivos, em especial os de natureza privada, se submetem aos preceitos do Direito Ambiental (RODRIGUES, 2016, p. 309). É nesse diapasão que a decisão supratranscrita acertadamente dispõe que “O confronto entre o direito ao desenvolvimento e os princípios do direito ambiental deve receber solução em prol do último, haja vista a finalidade que este tem de preservar a qualidade da vida humana na face da terra”.

Nesse ponto, posto o conflito entre desenvolvimento e proteção ambiental, cabe fazer um elo com o **princípio do desenvolvimento sustentável**. Este preceitua que o desenvolvimento deve procurar “satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades” (ONU, 1987). Tal conceito remete à manutenção, ou mesmo incremento, da qualidade de vida, sob condição de conservação dos bens ambientais, na medida em que a Constituição Federal prevê o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado também para as próximas gerações.

A defesa do meio ambiente, contida no princípio do desenvolvimento sustentável, é de tanta importância que não ficou adstrita ao Direito Ambiental, tendo sido também exaltada como princípio da ordem econômica, nos termos do art. 170, inciso VI, da CF/88.² Desse modo, não se deve realizar atividade com impacto negativo no meio ambiente sem que antes sejam estudadas a viabilidade ambiental e – sendo indispensável a sua realização e, portanto, a produção do dano – medidas compensatórias ou soluções mitigadoras, o que não exclui posterior responsabilidade civil, ou seja, dever de repará-lo ou indenizá-lo.

Nesse contexto, a jurisprudência do Superior Tribunal de Justiça considera o princípio do desenvolvimento sustentável, aliado ao princípio da prevenção, como guia às interpretações relativas ao bem ambiental:

1 Constituição Federal de 1988, Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

2 Brasil, CF, art. 170: “A ordem econômica, fundada na valorização do trabalho humano e na livre iniciativa, tem por fim assegurar a todos existência digna, conforme os ditames da justiça social, observados os seguintes princípios: [...] VI – defesa do meio ambiente, inclusive mediante tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação”.

AGRAVO REGIMENTAL EM RECURSO ESPECIAL. PENAL. CRIME AMBIENTAL. PRINCÍPIOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DA PREVENÇÃO. POLUIÇÃO MEDIANTE LANÇAMENTO DE DEJETOS PROVENIENTES DE SUINOCULTURA DIRETAMENTE NO SOLO EM DESCONFORMIDADE COM LEIS AMBIENTAIS. ART. 54, § 2º, V, DA LEI N. 9.605/1998. CRIME FORMAL. POTENCIALIDADE LESIVA DE CAUSAR DANOS À SAÚDE HUMANA EVIDENCIADA. CRIME CONFIGURADO. AGRAVO REGIMENTAL PROVIDO. RECURSO ESPECIAL IMPROVIDO.

I. Os princípios do desenvolvimento sustentável e da prevenção, previstos no art. 225, da Constituição da República, devem orientar a interpretação das leis, tanto no direito ambiental, no que tange à matéria administrativa, quanto no direito penal, porquanto o meio ambiente é um patrimônio para essa geração e para as futuras, bem como direito fundamental, ensejando a adoção de condutas cautelosas, que evitem ao máximo possível o risco de dano, ainda que potencial, ao meio ambiente.

II. A Lei n. 9.605/1998, ao dispor sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente e dar outras providências, constitui um divisor de águas em matéria de repressão a ilícitos ambientais. Isto porque ela trouxe um outro viés, um outro padrão de punibilidade em matéria de crimes ambientais, trazendo a figura do crime de perigo.

III. O delito previsto na primeira parte do art. 54, da Lei n. 9.605/1998, possui natureza formal, porquanto o risco, a potencialidade de dano à saúde humana, é suficiente para configurar a conduta delitiva, não se exigindo, portanto, resultado naturalístico. Precedente.

IV. A Lei de Crimes Ambientais deve ser interpretada à luz dos princípios do desenvolvimento sustentável e da prevenção, indicando o acerto da análise que a doutrina e a jurisprudência têm conferido à parte inicial do artigo 54, da Lei n. 9.605/1998, de que a mera possibilidade de causar dano à saúde humana é idônea a configurar o crime de poluição, evidenciada sua natureza formal ou, ainda, de perigo abstrato [...]. (AgRg no REsp 1.418.795/SC, rel. Min. Marco Aurélio Bellizze, rel. p/ Acórdão Min. Regina Helena Costa. 5ª Turma, julgado em 18/6/2014, DJ 7/8/2014. Grifou-se)

Nesse ponto, cabe trazer à tona o conceito do **princípio da precaução**, que se fundamenta na necessidade de evitar qualquer risco de dano ao meio ambiente, mesmo em se tratando de risco mínimo. Assim, diante da incerteza científica acerca da potencialidade do dano, incide o princípio da precaução para proteger o bem ambiental de um risco futuro, buscando evitar o próprio risco ainda imprevisível. Desse modo, pode-se dizer que, à luz do princípio da precaução, a dúvida opera a favor do meio ambiente.

Diante disso, a Declaração do Rio (ECO/92) proclamou o princípio 15, nos seguintes termos:

Com o fim de proteger o meio ambiente, o princípio da precaução deverá ser amplamente observado pelos Estados, de acordo com suas capacidades. Quando houver ameaça de danos graves ou irreversíveis, a ausência de certeza científica absoluta não será utilizada como razão para o adiamento de medidas economicamente viáveis para prevenir a degradação ambiental. (Grifou-se)

A primeira consequência é a inversão da ordem de atuação dos agentes envolvidos, isto é, em vez de os órgãos ambientais terem de provar a potencial lesividade de determinada atividade, é o empreendedor que deve evidenciar que a atividade proposta não apresenta qualquer risco de dano ambiental ou que a atividade é indispensável e que o dano será o menor possível. A construção dos reservatórios para abastecimento público de água exemplifica atividade muitas vezes indispensável. Alguns reservatórios com outras finalidades, como as de geração de energia e de controle de cheias no período chuvoso, assim como certas minas, são por vezes indispensáveis ou muito importantes, implicando na necessidade de licenciamento (BECHARA, 2009).

Uma vez constatado o dano, inverte-se ainda o ônus da prova. Corroborando esse entendimento, o Superior Tribunal de Justiça, por meio do Informativo nº 418, declara que:

DANO. MEIO AMBIENTE. PROVA. INVERSÃO.

Constatada a relação interdisciplinar entre as normas de proteção ao consumidor e as de defesa dos direitos coletivos nas ações civis por danos ambientais, o caráter público e coletivo do bem jurídico tutelado (e não a hipossuficiência do autor da demanda em relação ao réu) impõe a extensão de algumas regras de proteção dos direitos do consumidor ao autor daquela ação, pois ao final busca-se resguardar (e muitas vezes reparar) patrimônio público de uso coletivo. Dessa forma, **a aplicação do princípio da precaução pressupõe a inversão do ônus probatório: compete a quem se imputa a pecha de ser, supostamente, o promotor do dano ambiental a comprovação de que não o causou ou de que não é potencialmente lesiva a substância lançada no ambiente.** [...] (Precedente citado: REsp 1.049.822-RS, DJe 18/5/2009. REsp 1.060.753-SP, Rel. Min. Eliana Calmon, julgado em 1º/12/2009. Grifou-se)

Cabe salientar que o princípio da precaução não se confunde com o **princípio da prevenção**. Este impõe que, constatado o risco de uma atividade causar dano ao meio ambiente, tal atividade não poderá ser realizada ou deverá, quando indispensável, apresentar medidas mitigadoras, compensatórias e reparatórias, como dito. Já o primeiro é mais amplo, antecedendo a etapa de prevenção, posto que, mesmo diante da incerteza técnica e científica do risco, impõe-se a abstenção do agente, ou a realização de estudos que evidenciem os seus efeitos, como o estudo de impacto ambiental, em prol da segurança ambiental.

Ambos os princípios se fundamentam no risco de irreversibilidade do dano ao meio ambiente. Uma vez que a reparação efetiva é praticamente impossível, tendo em vista a ubiquidade do bem ambiental, busca-se evitar não só os danos que conhecidamente podem ocorrer (princípio da prevenção), mas especialmente os danos ainda desconhecidos (princípio da precaução).

Em meio à necessidade de prevenir a ocorrência de prejuízos ambientais, ganha cada vez mais destaque o **princípio da informação ambiental**. Genericamente, o direito à informação encontra-se previsto em diversos dispositivos constitucionais, em especial no art. 5º, que dispõe sobre as garantias individuais e coletivas. De forma mais específica, cabe destaque aos arts. 220 e 221 da Constituição Federal, segundo os quais a informação não deve sofrer nenhum tipo de restrição ou censura, cabendo às emissoras de rádio e televisão direcionar sua produção e programação, preferencialmente, a finalidades educativas e informativas. Dentro desse direito de ser informado e do dever de informar, inclui-se a informação ambiental, como instrumento essencial na proteção ao meio ambiente.

Aliado ao princípio da informação, está o **princípio da educação ambiental**, consubstanciado no art. 225, § 1º, VI, da CF/88:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

§ 1º Para assegurar a efetividade desse direito, **incumbe ao Poder Público:**

[...]

VI – **promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente;** (grifou-se)

A esse respeito, Rodrigues (2016, p. 320) esclarece que as expressões “educação ambiental” e “conscientização pública para a preservação do meio ambiente” possuem significados distintos, sendo a primeira o instrumento que viabiliza o alcance da segunda. Nas palavras do autor, a própria definição legal de educação ambiental explicita seu caráter instrumental para atingir um novo paradigma ético:

Lei nº 9.795/99

Art. 1º Entendem-se por educação ambiental os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade.

Em atenção ao princípio da educação ambiental, a Lei nº 9.795/99 estabelece ainda que:

Art. 2º A educação ambiental é um componente essencial e permanente da educação nacional, devendo estar presente, de forma articulada, em todos os níveis e modalidades do processo educativo, em caráter formal e não-formal.

Art. 3º Como parte do processo educativo mais amplo, todos têm direito à educação ambiental, incumbindo:

I – ao Poder Público, nos termos dos arts. 205 e 225 da Constituição Federal, definir políticas públicas que incorporem a dimensão ambiental, promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino e o engajamento da sociedade na conservação, recuperação e melhoria do meio ambiente;

II – às instituições educativas, promover a educação ambiental de maneira integrada aos programas educacionais que desenvolvem;

III – aos órgãos integrantes do Sistema Nacional de Meio Ambiente – Sisnama, promover ações de educação ambiental integradas aos programas de conservação, recuperação e melhoria do meio ambiente;

IV – aos meios de comunicação de massa, colaborar de maneira ativa e permanente na disseminação de informações e práticas educativas sobre meio ambiente e incorporar a dimensão ambiental em sua programação;

V – às empresas, entidades de classe, instituições públicas e privadas, promover programas destinados à capacitação dos trabalhadores, visando à melhoria e ao controle efetivo sobre o ambiente de trabalho, bem como sobre as repercussões do processo produtivo no meio ambiente;

VI – à sociedade como um todo, manter atenção permanente à formação de valores, atitudes e habilidades que propiciem a atuação individual e coletiva voltada para a prevenção, a identificação e a solução de problemas ambientais.

A educação ambiental é instrumento essencial na proteção ao meio ambiente, tanto que mereceu destaque na Declaração de Estocolmo/72, conforme consubstanciado no princípio nº 19:

É indispensável um esforço para a educação em questões ambientais, dirigida tanto às gerações jovens como aos adultos e que preste a devida atenção ao setor da população menos privilegiado, **para fundamentar as bases de uma opinião pública bem informada, e de uma conduta dos indivíduos, das empresas e das coletividades inspirada no sentido de sua responsabilidade sobre a proteção e melhoramento do meio ambiente em toda sua dimensão humana.** É igualmente essencial que os meios de comunicação de massas evitem contribuir para a deterioração do meio ambiente humano e, ao contrário, **difundam informação de caráter educativo sobre a necessidade de protegê-lo e melhorá-lo, a fim de que o homem possa desenvolver-se em todos os aspectos.** (Grifou-se)

Assim, é possível depreender que a educação ambiental é instrumento necessário não só para o desenvolvimento de uma nova consciência ética ambiental, mas também para garantir a participação social nessas questões, inclusive no que tange à aplicação dos princípios da prevenção e da precaução, que deve ser cotidiana.

Todos os princípios até aqui explicitados visam evitar a concretização do prejuízo ambiental ou a minimizá-lo, dada sua imensa chance de irreversibilidade. Entretanto, em última instância, não tendo sido possível obstar a ocorrência do dano, resta ao Poder Público invocar os **princípios do poluidor-pagador e do usuário-pagador**, de modo a buscar reparação, na medida do possível, dos efeitos provados (CAMAPUM DE CARVALHO, J.T., 2009).

Entretanto, cabe esclarecer que esses princípios não são, em sua essência, de natureza reparadora. Possuem, antes de tudo, caráter preventivo, uma vez que, dado o caráter difuso e esgotável do bem ambiental, impõem a quem o degrada o dever de arcar com o déficit causado à coletividade, internalizando o custo do prejuízo causado. Não sendo possível a internalização ou não trazendo esta, benefícios à sociedade, os produtos decorrentes da degradação ficam proibidos de serem fabricados ou comercializados. Portanto, a aplicação desses princípios objetiva, mais que reparar um dano já concretizado, desencorajar que novos venham a ocorrer.

O princípio do poluidor-pagador busca proteger o bem ambiental mediante prévia aferição da possibilidade de internalização de custos ambientais no preço do produto, seja tornando economicamente desvantajosa a produção/atividade, seja estimulando a adoção de tecnologias alternativas que não impactem a qualidade ambiental. Já o preceito do usuário-pagador traz a mesma ideia, porém voltada a quem utiliza o bem ambiental em seu proveito, ainda que não haja qualquer degradação, estabelecendo uma consciência racional do uso.

Desse modo é possível distinguir que, enquanto o princípio do poluidor-pagador volta-se para atividades poluentes, ocupando-se em garantir a qualidade do meio ambiente e evitar a degradação, o do usuário-pagador volta-se para atividades não poluentes, porém que

envolvem recursos escassos, buscando, portanto, proteger a quantidade dos recursos naturais. Justamente por se tratar de hipóteses de incidência distintas, não há que se falar em “*bis in idem*” quando ao mesmo agente forem imputados os custos pelo uso de recursos naturais e pela poluição do meio ambiente.

Assim, as expressões “poluidor-pagador” e “usuário-pagador” de modo algum traduzem a ideia de “pagar para poluir”, pois a ninguém é dada a possibilidade de comprar o direito de degradar o meio ambiente, tampouco, na maioria das vezes, o bem ambiental possui valoração pecuniária. O que esses princípios objetivam em primeiro lugar é o afastamento do dano, servindo de instrumento coercitivo para que os agentes busquem guiar suas ações pelos princípios da prevenção e da precaução, antes de tudo. Sob esse prisma, há quem defenda inclusive que a prevenção e a precaução são decorrências lógicas dos princípios do poluidor/ usuário-pagador.

Concluindo as discussões sobre os princípios de Direito Ambiental, vale a pena retornar ao primeiro deles aqui tratado, o princípio da ubiidade, lembrando que, segundo esse princípio, o meio ambiente ecologicamente equilibrado, enquanto bem de todos, não encontra qualquer fronteira, seja espacial, territorial ou temporal. Portanto, no caso dos reservatórios, o impacto ambiental que ele próprio pode gerar ou passar a se submeter não necessariamente ocorre em suas margens, como é o caso das eventuais erosões. Por exemplo, os processos de assoreamento que sofrem resultam, em sua grande maioria, de processos erosivos que ocorrem fora de suas margens. Igualmente, o excesso de impermeabilizações também longe de suas margens, ao prejudicar a recarga do aquífero, termina por contribuir para a redução do volume de água proveniente de nascentes de cursos d’água que alimentam os reservatórios. Vê-se, portanto, a inexistência de fronteiras espaciais nos impactos ambientais nos reservatórios, impactos esses, muitas vezes, de difícil recuperação, requerendo sobretudo ações mitigadoras que levem à recuperação ou regeneração, mesmo que parcial, do ambiente degradado. A melhor alternativa é, sempre que possível, a preservação das áreas naturais como indicam Camapum de Carvalho *et al.* (2012, p. 3) ao discutirem a questão da infiltração das águas pluviais:

A preservação ou a recuperação do equilíbrio ambiental em áreas impermeabilizadas ou em processo de impermeabilização deve objetivar a manutenção ou restauração das suas características originais de infiltração. Quase sempre essas ações não conseguem manter ou restabelecer as condições originais, embora até se possa conseguir infiltrar todo o volume de água precipitado na área impermeabilizada. Sendo assim, **o ideal é, sempre que possível, buscar-se preservar áreas naturais intactas.** (Grifou-se)

Deve-se considerar ainda que as construções dos reservatórios representam intervenções no meio físico, algumas locais e outras além de fronteiras definidas, que devem ser avaliadas à luz dos princípios de Direito Ambiental. Camapum de Carvalho *et al.* (2012, p. 8), ao discutirem a questão da infiltração, assim pontuam:

Essas intervenções no meio físico, no entanto, podem se dar de modo mais ou menos danoso ao meio ambiente, perturbando em maior ou menor intensidade o equilíbrio ambiental, favorecendo ou comprometendo o desenvolvimento sustentável, respeitando ou desrespeitando as diretrizes de ocupação e uso do solo. Apesar das várias

alternativas sempre presentes, não existem dois caminhos a serem ao mesmo tempo trilhados, pois, sendo a engenharia satisfativa, tornar-se-ia incoerente satisfazer as demandas da sociedade gerando-lhe problemas como os ambientais. **Isso torna necessária uma atuação planejada e preventiva por parte da engenharia.** (Grifou-se)

Uma análise cuidadosa dos danos ambientais que ocorrem nos reservatórios, como a poluição de suas águas, as erosões de margem e o seu assoreamento, demonstra que possuem raízes nas ações do próprio homem, no uso e ocupação indiscriminados do solo, nas mudanças climáticas de origem antrópica, inclusive, muitas vezes, com elo direto com o próprio reservatório. Por exemplo, a simples alteração da umidade relativa do ar e da temperatura ocasionada pelo reservatório em suas margens pode, ao impactar na interação solo-atmosfera, propiciar o desencadeamento de erosões de margem. Em um caso como esse, inicialmente, por precaução, devem ser feitas avaliações prévias e, diante da possibilidade do dano, desencadear ações preventivas como, por exemplo, estabilização do solo. Outro exemplo seria no caso da possibilidade de ocorrência de erosão de margem, provocada pelo movimento de embarcações. De modo preventivo, deve-se evitar tal movimento ou realizar a proteção das margens. Observa-se, portanto, que a adoção dos princípios de Direito Ambiental fundamentada em análise das causas e possíveis dimensões dos danos, sempre, ou quase sempre, conduz a que se evite ou reduza o comprometimento da estabilidade do meio físico e agressões ao **direito à sadia qualidade de vida e ao direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado.**

4 Hierarquia das normas

Existe uma hierarquia entre as normas que compõem o sistema jurídico brasileiro, sendo que as normas técnicas, mesmo não possuindo caráter jurídico propriamente dito, se submetem a esse ordenamento por envolverem direitos e deveres e muitas vezes intervirem diretamente em questões ambientais. As normas técnicas, além das eventuais limitações que apresentem, são, exceto os casos previstos em lei, de uso voluntário, requerendo assim disciplinamento que garanta a segurança pública, ou seja, elas se submetem ao ordenamento jurídico, mas não o integram diretamente com suas especificidades. Como exemplo de previsão legal cita-se o inciso VIII, art. 39 do Código de Defesa do Consumidor (CDC):

VIII – colocar, no mercado de consumo, qualquer produto ou serviço em desacordo com as normas expedidas pelos órgãos oficiais competentes ou, se normas específicas não existirem, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ou outra entidade credenciada pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro);

Cabe destacar, porém, que sendo a vida, a qualidade de vida e o meio ambiente bens maiores, apesar dessa imposição do CDC, faz-se necessária maior reflexão sobre a adoção das normas técnicas em casos específicos, pois quando alguém se submete cegamente ao ordenamento jurídico, pode gerar danos irreparáveis e por eles responder jurídica, civil, administrativa e mesmo, a depender do caso, criminalmente.

Retornando à questão do ordenamento jurídico, pode-se admitir que a hierarquia por ele estabelecida assumia a forma de uma pirâmide, com a Constituição Federal e as Emendas Constitucionais que a integram ocupando o seu topo (1) (Figura 3a). Logo abaixo estão as Leis Complementares, as Leis Ordinárias e, em caráter temporário, as Medidas Provisórias (MPs) (2). Em seguida estão os Decretos, as Instruções e as Orientações Normativas, as Deliberações e as Resoluções (3). Os Tratados Internacionais, se relacionados aos Direitos Humanos, têm hierarquicamente se colocado no nível da Constituição Federal (1') e, nos demais casos, no nível das Leis Complementares, Leis Ordinárias e MPs (2').

É de fácil percepção (Figura 3b) que, geometricamente, se essa pirâmide se inverter com a Constituição ocupando a sua base alicerçada na vontade do povo (4), pois na verdade é ela o elemento estruturante, pequenos desequilíbrios oriundos do descumprimento dos comandos constitucionais ameaçam o equilíbrio do todo piramidal. Ao mesmo tempo, a falta de elo entre a pirâmide e o povo torna o seu equilíbrio extremamente tênue. Destaca-se que o povo, por sua vez, depende diretamente do ambiente em que vive, ar, água, terra e demais seres vivos (5), não sendo possível esquecer que o Estado é formado por território, povo e governo e apresenta certa finalidade, como definida no Preâmbulo da Constituição Federal Brasileira. Então, essas duas imagens (Figuras 3a e 3b) devem ser vistas como complementares, pois em uma, **na hierarquia das normas jurídicas**, a Constituição ocupa o topo da pirâmide, indicando que todas as demais normas são a ela subordinadas e devem ser interpretadas segundo os seus princípios, e na outra, **na estrutura vivencial**, a Constituição, ao ocupar a base da estrutura, demonstra, apoiada na vontade do povo que expressa, ser ela o sustentáculo do todo, sendo que em ambas as disposições sobressai a importância de se observá-la e respeitá-la, assim como a necessidade de certa ligação entre as normas, o povo e o meio ambiente (linhas tracejadas indicando o elo), para maior estabilidade do equilíbrio do todo.

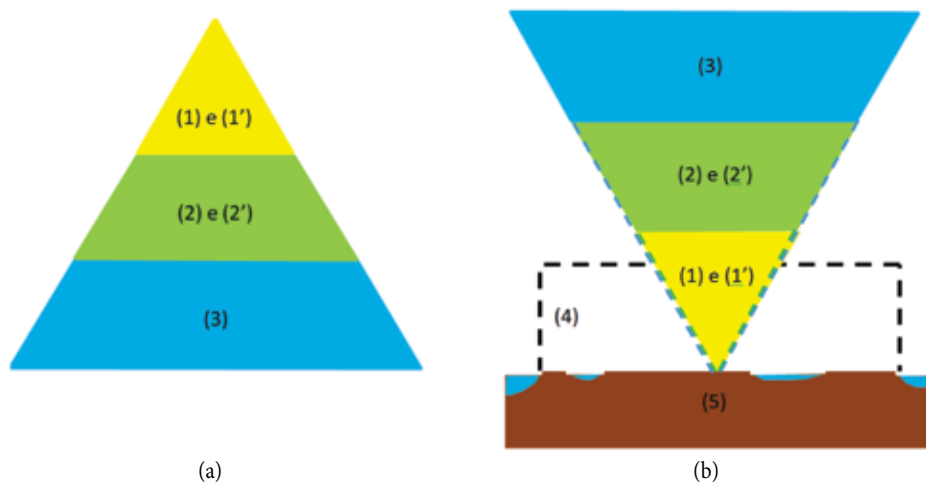


Figura 3. (a) Hierarquia das leis; (b) Estrutura vivencial.

Assim, apresentam-se duas características de grande relevância em relação às normas em sentido amplo: a da harmonia e a da subordinação. A harmonia corresponde à necessidade de respeito entre as normas, observando-se os princípios hierárquicos assim como o en-

treçamento com a vontade do povo e a necessidade de se preservar o equilíbrio ambiental. Já na subordinação, entende-se que uma determinada norma, ao estar juridicamente subordinada, deve respeito àquelas que lhe são superiores e que prevalecerão em caso de conflito. A questão da subordinação está relacionada à representatividade da norma. Por exemplo, a Constituição Federal representa a vontade de todo o povo brasileiro, estabelecendo princípios guardiões a serem observados pelas demais normas e pela sociedade como um todo, como estabelece o seu Preâmbulo:

Nós, **representantes do povo brasileiro**, reunidos em Assembleia Nacional Constituinte para instituir um Estado Democrático, **destinado a assegurar o exercício dos direitos sociais e individuais, a liberdade, a segurança, o bem-estar, o desenvolvimento, a igualdade e a justiça como valores supremos de uma sociedade fraterna, pluralista e sem preconceitos, fundada na harmonia social e comprometida, na ordem interna e internacional, com a solução pacífica das controvérsias**, promulgamos, sob a proteção de Deus, a seguinte CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. (Grifou-se)

A não observação da Constituição Federal pela legislação infraconstitucional dá azo a ações de inconstitucionalidade. Como exemplo, pode-se citar algumas Ações Diretas de Inconstitucionalidade (ADIs 4901, 4902 e 4903), em julgamento no Supremo Tribunal Federal (STF), as quais questionam dispositivos do novo Código Florestal brasileiro (Lei 12.651/12) relacionados às Áreas de Preservação Permanente em reservatórios artificiais, à redução da Reserva Legal e também à anistia para quem promoveu degradação ambiental até 22 de julho de 2008, com fundamento na violação de princípios constitucionais.

Diante dessa breve exposição, fica claro que as ações e práticas envolvendo a construção, manutenção e funcionamento dos reservatórios deve observar a legislação vigente e considerar o arcabouço hierárquico que apresenta em seu topo e, ao mesmo tempo, como base de sustentação, a Constituição Federal.

5 Aspectos constitucionais

As discussões apresentadas neste texto mostram que, em termos constitucionais, o meio ambiente de modo explícito só passou a integrar o texto constitucional na Constituição de 1988, sendo que as Constituições de 1824 e 1891 não o inserem nem mesmo de modo implícito.

Implicitamente, já na Constituição de 1934 aparecia a questão ambiental, pois por força da alínea j, inciso XIX, artigo 5º, competia privativamente à União legislar sobre “bens do domínio federal, riquezas do subsolo, mineração, metalurgia, **as águas, energia hidrelétrica, florestas, caça e pesca** e a sua exploração” (grifou-se), não excluindo, segundo o § 3º do mesmo artigo, a legislação estadual supletiva ou complementar sobre as mesmas matérias, ou seja, o Estado já assumia, naquela Constituição, a competência legislativa sobre questões ambientais, assim como sobre a energia hidrelétrica.

Aquela Constituição ainda previa, em seu artigo 119, que “o aproveitamento industrial das minas e das jazidas minerais, bem como **das águas e da energia hidráulica**, ainda que de propriedade privada, dependia de autorização ou concessão federal, na forma da lei” (texto

adaptado, grifou-se), ou seja, toda a política nacional de uso desses bens era de competência do Estado. A questão dos reservatórios de água situava-se, portanto, na alçada da União e dos estados, mas não se adentrava explicitamente em questões como a preservação e os danos ao meio ambiente.

Embora mantendo a essência da competência para legislar estabelecida na Constituição de 1934, a Constituição de 1937 introduziu, por meio do seu artigo 18, que, independentemente de autorização, “os Estados podiam legislar, no caso de haver lei federal sobre a matéria, para suprir-lhes as deficiências ou atender às peculiaridades locais, desde que não dispensassem ou diminuíssem as exigências da lei federal, ou, em não havendo lei federal e até que esta regulasse, sobre os seguintes assuntos:

a) riquezas do subsolo, mineração, metalurgia, **águas, energia hidrelétrica, florestas, caça e pesca** e sua exploração; (texto adaptado, grifou-se)

Observa-se, portanto, que a Constituição de 1937 atentou para as particularidades locais, e nelas se inserem questões como as sociais e as ambientais.

A Constituição de 1937 separa, por meio do artigo 143, as minas e demais riquezas do subsolo, assim como as quedas-d’água, como propriedades distintas da propriedade do solo para o efeito de exploração ou aproveitamento industrial e condiciona suas explorações à necessidade de autorização federal. Essa Constituição estabeleceu, ainda, ao contrário do que se passou a praticar mais recentemente, um processo de nacionalização da riqueza pátria conforme dispõe o seu artigo 144:

Art. 144 – A lei regulará a nacionalização progressiva das minas, jazidas minerais e quedas-d’água ou outras fontes de energia, assim como das indústrias consideradas básicas ou essenciais à defesa econômica ou militar da Nação.

Cabe salientar que, embora as questões ambientais não fossem tratadas de modo explícito e diretamente nas Constituições até a de 1937, o Código de Águas, Decreto 24.643/34, já discutia as matérias relativas à poluição das águas. Por exemplo, o seu artigo 110 define que “os trabalhos para a salubridade das águas serão executados à custa dos infratores, que, além da responsabilidade criminal, se houver, responderão pelas perdas e danos que causarem e pelas multas que lhes forem impostas nos regulamentos administrativos”. Essa previsão legal corresponde ao princípio do poluidor-pagador, já discutido neste capítulo e integrante do Direito Ambiental.

A Constituição de 1946 mantém a prerrogativa de a União legislar sobre “riquezas do subsolo, mineração, metalurgia, águas, energia elétrica, floresta, caça e pesca” (art. 5º, inciso XV, alínea l) e as minas e demais riquezas do subsolo, bem como as quedas-d’água como propriedades distintas das do solo, para efeito de exploração ou aproveitamento industrial (art. 152). Algo relevante dessa Constituição diz respeito ao fato de o uso da propriedade ficar condicionado ao bem-estar social, ou seja, é possível interpretar que agressões socioambientais não seriam toleradas (art. 147).

A Constituição de 1967 e a Emenda Constitucional de 1969 mantêm como competência da União legislar sobre águas e energia elétrica. Continuam estabelecendo, a não ser que se trate de aproveitamento de energia hidráulica de potência reduzida, a exigência de autoriza-

ção ou concessão, na forma da lei, para explorar tais riquezas, condicionando-as a que se dê por brasileiros ou sociedades organizadas no país. Ambas, a Constituição de 1967 e a Emenda Constitucional de 1969, mantêm a função social da propriedade como princípio social.

Apesar de nenhuma das Constituições, até a Emenda Constitucional de 1969, tratar de modo explícito de questões diretamente ligadas ao meio ambiente, cabe salientar, conforme já citado, que o Código de Águas, Decreto 24.643/34, estabelece que os trabalhos para a salubridade das águas serão realizados à custa dos infratores que, além da responsabilidade criminal, se houver, responderão pelas perdas e danos que causarem e por multas que lhes forem impostas pelos regulamentos administrativos. Destaca-se, ainda, conforme será discutido no item sobre legislação infraconstitucional, que a Lei 6.938/81 dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. No entanto, em termos de Constituição, só a de 1988 trata diretamente do tema ambiental, situando-o no topo da pirâmide relativa à hierarquia das leis (Figura 3a) e na base da pirâmide vivencial, por integrar uma necessidade da sociedade. Já no Título II, Dos direitos e garantias fundamentais, a Constituição Federal Brasileira de 1988 em seu artigo 5º, inciso LXXIII, dita:

LXXIII – qualquer cidadão é parte legítima para propor ação popular que vise a anular ato lesivo ao patrimônio público ou de entidade de que o Estado participe, à moralidade administrativa, ao meio ambiente e ao patrimônio histórico e cultural, ficando o autor, salvo comprovada má-fé, isento de custas judiciais e do ônus da sucumbência; (grifou-se)

A Constituição de 1988 insere, de modo taxativo, por meio do inciso III, artigo 20, os lagos, rios e quaisquer correntes de água como bens da União quando se tratar de terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais, cabendo privativamente à União legislar sobre as águas (inciso IV, art. 22). À União compete, ainda, explorar, diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão, os serviços e instalações de energia elétrica e o aproveitamento energético dos cursos de água em articulação com os Estados onde se situam os potenciais hidroenergéticos (art. 21, inciso XII, alínea b). Percebe-se, assim, que os Estados passam a integrar a exploração desses recursos, o que os torna também responsáveis pela gestão, sendo que o artigo 23 e seu inciso VI definem como competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios a proteção do meio ambiente e o combate à poluição em qualquer de suas formas. O artigo 26, inciso I, inclui entre os bens dos Estados “as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União”.

Em termos de competência legislativa, quando os temas estão ligados às florestas, caça, pesca, conservação da natureza, defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição (inciso VI, artigo 24) e responsabilidade por dano ao meio ambiente e a bens e direitos de valor, dentre outros, paisagístico (inciso VIII, artigo 24), atuam de modo concorrente a União, os Estados e o Distrito Federal.

Ao adentrar nas questões regionais, o caput do artigo 43 define que “para efeitos administrativos, a União poderá articular sua ação em um mesmo complexo geoeconômico e social, visando a seu desenvolvimento e à redução das desigualdades regionais”. Em seguida, é

definido no § 2º que os incentivos regionais compreenderão, na forma da lei, prioridade para o aproveitamento econômico e social dos rios e das massas de água represadas ou represáveis nas regiões de baixa renda, sujeitas a secas periódicas (inciso IV), ou seja, fica clara aqui a participação direta do Poder Público nos reservatórios existentes e a serem construídos.

O inciso III do artigo 129 define como funções institucionais do Ministério Público, dentre outras, “**promover o inquérito civil e a ação civil pública, para a proteção do patrimônio público e social, do meio ambiente** e de outros interesses difusos e coletivos” (grifou-se).

O inciso VI do artigo 170 define que a ordem econômica deve observar como princípio a “defesa do meio ambiente, inclusive mediante tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação”. Os reservatórios destinados à geração de energia elétrica e mesmo aqueles com finalidade de abastecimento público devem ser considerados como parte integrante de um processo destinado ao oferecimento de um produto ou serviço, a energia elétrica ou a própria água, conforme o caso.

O artigo 186 define que a propriedade rural cumpre sua função social quando atende, simultaneamente, segundo critérios e graus de exigência estabelecidos em lei, aos requisitos de aproveitamento racional e adequado (inciso I) e utilização adequada dos recursos naturais disponíveis e preservação do meio ambiente (inciso II). Por exemplo, erosões laminares ou lineares em meio rural, contribuindo para o assoreamento de cursos d’água e reservatórios, correspondem ao uso inadequado dos recursos naturais, geralmente atrelado a técnicas de manejo inapropriadas.

Os incisos VI e VIII do artigo 200 da Constituição de 1988, ao atribuírem ao Sistema Único de Saúde (SUS) competência para fiscalizar e inspecionar a água para consumo humano (inciso VI) e colaborar na proteção ao meio ambiente, reconhecem a questão ambiental como relevante para a saúde humana. Com isso, questões como a alteração degradadora da paisagem por meio da ocorrência de processos erosivos de margens de reservatórios e a condução aos reservatórios de insumos e defensivos agrícolas, por serem prejudiciais à saúde, são passíveis de fiscalização e inspeção por parte do SUS.

Em termos da comunicação social, o § 3º, inciso II, do artigo 220, capítulo V, da Constituição Brasileira de 1988, fixa que compete à lei federal estabelecer os meios legais que garantam à pessoa e à família a possibilidade de se defenderem de programas ou programações de rádio e televisão que contrariem o disposto no art. 221, bem como da propaganda de produtos, práticas e serviços que possam ser nocivos à saúde e **ao meio ambiente** (grifou-se).

A preocupação dos constituintes com o meio ambiente se deu, como se pode notar do que foi até aqui apresentado, ao longo de todo o texto da Constituição e culmina com o Capítulo VI, “Do Meio Ambiente”. O *caput* do artigo 225 desse capítulo dita:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Observa-se que esse artigo coloca o meio ambiente ecologicamente equilibrado como essencial à sadia qualidade de vida, impondo ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações, e exige, na forma da lei, por

meio do inciso IV desse artigo, que “para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente” faz-se necessário “estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade”. Pode-se entender, com base nos vários problemas relacionados às erosões de margem de reservatórios, que esse tipo de empreendimento é potencialmente causador de significativa degradação ambiental, requerendo planejá-lo, projetá-lo e executá-lo fazendo uso dos princípios da prevenção e da precaução.

Para a questão das erosões de margens de reservatórios, assim como para a questão do assoreamento que nelas ocorre, o inciso VI do artigo 225 assume grande importância, pois prevê a promoção da “educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente”. Problemas como o da remoção das vegetações de margem, movimento de embarcações junto a margens erodíveis, lançamento de água poluída nos cursos d’água e reservatórios, impermeabilização de áreas que deveriam ser mantidas com cobertura de vegetação ou que deveriam ser cobertas com pavimentos permeáveis, como é o caso da maioria dos estacionamentos, ciclovias e calçadas, são todos essencialmente ligados à deficiências na educação ambiental, à falta de uma consciência voltada para a preservação do meio ambiente.

Embora se deva, antes de punir, educar, o § 3º desse artigo fixa que “as condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados”.

Portanto, as questões ambientais ligadas ao combate às erosões de margens, assoreamento e poluição de reservatório possuem sede constitucional.

6 Legislação infraconstitucional

Não é objetivo deste item tratar de toda a legislação infraconstitucional sobre as questões ambientais e que guardem relação com os reservatórios, mas apenas trazer para discussão aspectos considerados relevantes, igualmente sem a pretensão de exauri-los.

Até por uma questão histórica, iniciar-se-á a discussão sobre a legislação infraconstitucional com o Código de Águas (Decreto 24.643/34 – 10/7/34, DOU 20/7/34), mantido e modificado pelo Decreto-Lei 852, de 11 de novembro de 1938. Esse decreto consubstanciou, até a edição da Lei nº 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), a legislação básica brasileira de águas; entretanto, alguns de seus dispositivos não foram recepcionados pela Constituição de 1988, tendo a maior parte sido posteriormente revogada pela PNRH. Atualmente, poucos continuam em vigor. O seu Livro III refere-se às Forças Hidráulicas – “Regulamentação da Indústria Hidro-Elétrica”, sendo que o aproveitamento industrial de quedas-d’água e outras fontes de energia hidráulica, quer do domínio público, quer do domínio particular, far-se-á pelo regime de autorizações e concessões instituído neste Código (Art. 139). Estabelece que a concessão ou a autorização deve ser feita sem prejuízo da navegação, salvo nos casos de uso para as primeiras necessidades da vida ou previstos em leis especiais. Ressalta ainda, em seu artigo 110, que os trabalhos para a salubridade das águas serão realizados à custa dos infratores que, além da responsabilidade criminal, se houver, responderão pelas perdas e danos que causarem e por multas que lhes forem impostas

pelos regulamentos administrativos o que se encontram em conformidade com o princípio do poluidor-pagador. A jurisprudência a seguir mostra que esse Decreto continua em vigor:

CONSTITUCIONAL. PENAL. PROCESSUAL. RECURSO EM SENTIDO ESTRITO: COMPETÊNCIA: CRIME AMBIENTAL PRATICADO EM ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE, ÀS MARGENS DE RIO INTERESTADUAL (RIO GRANDE): BEM DE DOMÍNIO PÚBLICO DA UNIÃO: ARTS 109, IV e 20, III, DA CONSTITUIÇÃO FEDERAL. ART. 29, I, F DO DECRETO 24.643/34 (CÓDIGO DE ÁGUAS). COMPETÊNCIA DA JUSTIÇA FEDERAL. I – Inquérito policial instaurado para apuração de prática de crime ambiental em área de preservação permanente, localizada às margens do “Rio Grande”, que abrange os Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. II – Aos juízes federais compete processar e julgar as infrações penais praticadas em detrimento de bens, serviços ou interesses da União: art. 109, IV, da CF. III – Os rios interestaduais integram o rol dos bens pertencentes à União: art. 20, III da CF. Tratando-se de rio federal, também deve ser considerado como bem da União o reservatório formado pela acumulação artificial de suas águas, assim como sua faixa marginal. Aplicação da regra de que o acessório segue o principal. IV – As águas públicas de uso comum, bem como o seu álveo, pertencem à União, quando percorrem parte dos territórios de dois ou mais Estados: Código de Águas (Decreto nº 24.643/34, art. 29, I, f). V – Evidente o interesse da União Federal na apuração da prática dos fatos, ainda que a área afetada pela ação do indiciado pertença a particular. VI – Recurso ministerial a que se dá provimento para determinar o regular processamento do inquérito policial em questão e de eventual ação penal perante a Vara Federal de Jales/SP. (TRF-3 – RSE: 1616 SP 2004.61.24.001616-1, Relator: Desembargador federal Henrique Herkenhoff, Data de Julgamento: 18/11/2008, Segunda Turma)

Dentre outros, cabe ainda destaque o artigo 109, segundo o qual “**a ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome**, com prejuízo de terceiros”; o artigo 111, segundo o qual “se os interesses relevantes da agricultura ou da indústria o exigirem, e **mediante expressa autorização administrativa, as águas poderão ser inquinadas**, mas os agricultores ou industriais deverão providenciar para que as se purifiquem, por qualquer processo, ou sigam o seu esgoto natural”; e o artigo 143 e sua alínea b, segundo os quais, “em todos os aproveitamentos de energia hidráulica serão satisfeitas exigências acauteladoras dos interesses gerais: [...] b) da **salubridade pública**” (grifou-se). Pelo menos três aspectos são, do ponto de vista ambiental, de grande relevância nesses artigos citados: a ilicitude da contaminação da água, embora implicitamente se admita a sua contaminação quando para uso próprio; a permissão para a poluição das águas pela agricultura ou indústrias, sendo, no entanto, praticamente impossível tratar as grandes frentes poluidoras das águas provenientes da chuva e que arrastam consigo os insumos e defensivos agrícolas para os cursos d’água, os reservatórios e as águas de subsuperfície, o que torna a previsão legal inconstitucional (por incompatível com a nova ordem constitucional, não tendo sido, assim, recepcionada); a questão da salubridade pública, a que deve fazer atenção os aproveitamentos da energia hidráulica.

A Lei 6.938/81 (31/8/81, DOU 2/9/81) dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Essa lei constitui o Sistema Na-

cional do Meio Ambiente (Sisnama) e institui o Cadastro de Defesa Ambiental (Art. 1º). Sem obstar a aplicação das penalidades previstas neste artigo, é o poluidor obrigado, independentemente da existência de culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros, afetados por sua atividade. O Ministério Público da União e dos Estados terá legitimidade para propor ação de responsabilidade civil e criminal, por danos causados ao meio ambiente (Art. 14, § 1º). Dentre outros, merece destaque nessa lei o seu artigo 15, por considerar a vida em sentido amplo ao colocar em igual nível a proteção humana, animal e vegetal:

Art. 15. O poluidor que expuser a perigo a incolumidade humana, animal ou vegetal, ou estiver tornando mais grave situação de perigo existente, fica sujeito à pena de reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos e multa de 100 (cem) a 1.000 (mil) MVR. (Redação dada pela Lei nº 7.804, de 1989)

A mesma lei define o poluidor em seu artigo 3º, inciso IV, como a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável, direta ou indiretamente, por atividade causadora de degradação ambiental, definição essa embasadora de jurisprudências como a apresentada a seguir:

APELAÇÃO CÍVEL. DIREITO CONSTITUCIONAL. DIREITO AMBIENTAL. AÇÃO CIVIL PÚBLICA. DESMATAMENTO EM ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE. VEGETAÇÃO DE RESTINGA. ART. 3º, IV, RESOLUÇÃO CONAMA 303/02. RESPONSABILIDADE CIVIL OBJETIVA. AÇÃO OU OMISSÃO DE IMPEDIR A DEGRADAÇÃO. RESPONSÁVEL DIRETO OU INDIRETO. SOLIDARIEDADE. INTELIGÊNCIA DO ART. 3º, IV DA LEI 6.938/81. NEXO DE CAUSALIDADE COMPROVADO. DANO AMBIENTAL CORRESPONDENTE À SUPRESSÃO IRREGULAR DE VEGETAÇÃO. RECOMPOSIÇÃO DO MEIO AMBIENTE DEGRADADO. PRINCÍPIO DA REPARAÇÃO INTEGRAL. MANUTENÇÃO DA SENTENÇA. Inequivoca constatação de dano ambiental, através do Inquérito Civil nº 045/05, consistente na supressão irregular de vegetação nativa, em área de preservação permanente (APP), de interesse do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba. Área desmatada correspondente a 5.000m², de vegetação nativa de Mata Atlântica. **A responsabilidade civil do dano ambiental assume grande amplitude em virtude da natureza difusa do interesse protegido, prescindindo da comprovação da culpa do agente causador do dano. Para o fim da apuração do nexos causal no dano ambiental, equiparam-se quem faz a quem deixa fazer, quando se tem o dever de guarda e conservação do bem.** A alegação de culpa exclusiva de terceiro, além de não comprovada no caso, não elide a responsabilidade do proprietário da área desmatada, que será obrigado a reflorestar a área, podendo, no máximo, identificar o poluidor direto e intentar ação regressiva. Obrigação propter rem reconhecida pelo STJ. Sentença correta e bem fundamentada que deve ser mantida em todos os seus termos. Conhecimento e desprovemento do recurso. (TJ-RJ – APL: 00007924720078190084 RJ 0000792-47.2007.8.19.0084, Relator: Des. Rogério de Oliveira Souza, Data de Julgamento: 01/04/2014, Vigésima Segunda Câmara Cível, Data de Publicação: 16/04/2014 17:41, grifou-se)

Com base em estudos desenvolvidos pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), buscando dar maior proteção aos reservatórios de acumulação de água para geração de energia elétrica, quanto ao assoreamento e à necessidade de disciplinar o uso das áreas marginais a esses reservatórios, privilegiando a destinação social, editou-se a Portaria MME 170/87 (4/2/87, DOU 10/02/87). Essa Portaria autoriza os concessionários de serviços públicos de energia elétrica e os titulares de Manifestos a celebrarem, com terceiros, contratos de concessão de direito de uso de áreas marginais a reservatórios, de glebas remanescentes de desapropriação e de outras áreas de sua propriedade, rurais e urbanas. Ela estabelece que fiquem definidas as restrições a serem observadas pelos usuários quanto à instalação de edificações; utilização do solo que contribua para o assoreamento do reservatório; obediência à legislação pertinente à Política Florestal e à Política Nacional do Meio Ambiente; utilização de produtos químicos que causem danos ao meio ambiente; observância às peculiaridades do ecossistema local. A celebração do contrato, no entanto, não isenta de responsabilidade o concessionário, que deve continuar fiscalizando a área objeto de concessão, como estabelece a Portaria em seu inciso III. E esse tem sido o entendimento jurisprudencial, como exemplificado a seguir:

AGRAVO DE INSTRUMENTO. AÇÃO CIVIL PÚBLICA. PRESERVAÇÃO AMBIENTAL. ÁREA DO RESERVATÓRIO DE USINA HIDRELÉTRICA. PRESERVAÇÃO DO ENTORNO. OBRIGAÇÃO DO CONCESSIONÁRIO DO SERVIÇO. PORTARIAS 1.415/1984 E 170/1987 DO MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. DETERMINAÇÃO DE DEMARCAÇÃO DA FAIXA DE SEGURANÇA. 1. A obrigação de preservação do entorno da área do reservatório de usina hidrelétrica cabe ao concessionário do serviço, nos termos do que dispõem as Portarias 1.415/1984 e 170/1987 do Ministério de Minas e Energia, bem como do contrato de uso de bem público, celebrado entre a União Federal, por intermédio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a agravante. Alegação de ilegitimidade para compor o polo passivo da lide afastada. 2. O Contrato de Concessão de Uso de Bem Público para geração de Energia Elétrica, firmado entre a agravante e a ANEEL, dispõe, entre outras obrigações, da observância da legislação ambiental no que se relaciona à área total, assim como no que diz respeito especificamente às áreas marginais, onde resta reconhecida a sua responsabilidade pelo descumprimento das normas e pelos danos causados, inclusive com obrigação de realizar vistorias permanentes nas áreas marginais. 3. A obrigação, decorrente da lei e do próprio contrato, se relaciona à preservação ambiental da área de responsabilidade da concessionária. Caso esta obrigação não seja cumprida, se torna viável a adoção de medidas práticas voltadas a assegurar o seu objetivo, sem prejuízo da eventual apuração de montante indenizatório. 4. Há plausibilidade na determinação de demarcação da faixa de segurança que fixa o limite da área de responsabilidade da agravante, tendo em vista a possibilidade de continuação das ações de devastação da área. 5. Em sede de agravo de instrumento tirado de provimento liminar concessivo cabe apenas análise prefacial e provisória dos requisitos da fumaça do bom direito e do periculum in mora. 6. A matéria de mérito em exame mais aprofundado tem seu leito processual próprio na ação civil pública que aguarda julgamento em primeiro grau e lá é que deve ser deslindada. 7. Agravo de instrumento parcialmente provido. (TRF-3 - AI: 24266 SP 0024266-17.2009.4.03.0000, Relator: Desembargador Federal Márcio Moraes, Data de Julgamento: 03/04/2014, Terceira Turma)

A Lei 8.171/91 (17/01/91, DOU 18/01/91 ret.12/03/91) dispõe sobre a política agrícola. As empresas que exploram economicamente águas represadas e as concessionárias de energia elétrica serão responsáveis pelas alterações ambientais por elas provocadas e obrigadas a recuperar o meio ambiente, na área de abrangência de suas respectivas bacias hidrográficas (Art. 23). O artigo 102 define que “o solo deve ser respeitado como patrimônio natural do País” e o parágrafo único desse artigo estabelece que “a erosão dos solos deve ser combatida pelo Poder Público e pelos proprietários rurais” atingindo as empresas que exploram economicamente águas represadas e as concessionárias de energia elétrica por meio do artigo 23. O Poder Público concederá incentivos ao proprietário rural que: conservar a cobertura florestal nativa; recuperar com espécies nativas ou ecologicamente adaptadas as áreas já devastadas; sofrer limitação ou restrição no uso de recursos naturais, para fins de proteção dos ecossistemas (Art. 103 e incisos). São isentas de tributação e do pagamento do ITR as áreas consideradas de preservação permanente, previstas na Lei 4.771/65 (Art. 104). Cabe destaque a previsão do artigo 19, inciso V, em que ao Poder Público cabe desenvolver programas de educação ambiental, em nível formal e informal, dirigidos à população. No que tange aos reservatórios, a jurisprudência a seguir é relevante por imputar ao adquirente de terras rurais a responsabilidade pela recomposição das matas nativas e o destaque ao fato da Lei 8.171/91 vigorar para todos os proprietários rurais, ainda que não sejam eles responsáveis por eventuais desmatamentos anteriores.

EMBARGOS DE DECLARAÇÃO CONTRA ACÓRDÃO PROFERIDO EM AGRAVO REGIMENTAL. DANOS AMBIENTAIS. AÇÃO CIVIL PÚBLICA. RESPONSABILIDADE. ADQUIRENTE. TERRAS RURAIS. RECOMPOSIÇÃO. MATAS. 1. A Medida Provisória 1.736-33 de 11/02/99, que revogou o art. 99 da lei 8.171/99, foi revogada pela MP 2.080-58, de 17/12/2000. 2. Em matéria de dano ambiental a responsabilidade é objetiva. O adquirente das terras rurais é responsável pela recomposição das matas nativas. 3. A Constituição Federal consagra em seu art. 186 que a função social da propriedade rural é cumprida quando atende, seguindo critérios e graus de exigência estabelecidos em lei, a requisitos certos, entre os quais o de “utilização adequada dos recursos naturais disponíveis e preservação do meio ambiente” 4. A lei 8.171/91 vigora para todos os proprietários rurais, ainda que não sejam eles os responsáveis por eventuais desmatamentos anteriores. Na verdade, a referida norma referendou o próprio Código Florestal (lei 4.771/65) que estabelecia uma limitação administrativa às propriedades rurais, obrigando os seus proprietários a instituírem áreas de reservas legais, de no mínimo 20% de cada propriedade, em prol do interesse coletivo. 5. Embargos de Declaração parcialmente acolhidos para negar provimento ao Recurso Especial (STJ - EDcl no AgRg no REsp: 255170 SP 2000/0036627-7, Relator: Ministro Luiz Fux, Data de Julgamento: 01/04/2003, T1 - Primeira Turma, Data de Publicação: DJ 22.04.2003 p. 197).

A Lei 9.433/97 (08/01/97, DOU 09/01/97) instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamentou o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e alterou o art. 1º da Lei 8.001/90, que modificou a Lei 7.990/89. Estabelece a referida lei, entre outros, como objetivo dessa política, assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de

qualidade adequados aos respectivos usos (Art. 2º); e como um de seus instrumentos, o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água (art. 5º). Um dos fundamentos dessa lei, contidos em seu artigo 1º, inciso VI, consiste na inserção do Poder Público, dos usuários e das comunidades na gestão dos recursos hídricos, ou seja, deve existir uma gestão participativa e solidária, lembrando que os objetivos da PNRH, fixados na Lei, são:

- I – assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- II – a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;
- III – a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

Cabe destacar, ainda, a diretriz da Política Nacional de Recursos Hídricos contida no inciso II do artigo 3º:

- II – a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País;

Ora, todos esses elementos aqui realçados mostram a necessidade de se evitar a degradação ambiental que ocorre com as erosões de borda de reservatório, assim como os assoreamentos que as atingem, sendo responsáveis pela gestão o Poder Público, os usuários e, portanto, também as concessionárias e as comunidades, ou seja, a sociedade. Merece aqui ser lembrado o artigo 23 da Lei 8.171/91, o qual estabelece que as empresas que exploram economicamente águas represadas e as concessionárias de energia elétrica serão responsáveis pelas alterações ambientais por elas provocadas e obrigadas à recuperação do meio ambiente, na área de abrangência de suas respectivas bacias hidrográficas. Em outras palavras, diante dessa responsabilidade e considerando a solidariedade na gestão dos recursos hídricos, torna-se inescusável a ocorrência de danos ambientais oriundos da implantação dos reservatórios, independentemente de sua finalidade.

A Lei 9.605/98 (12/02/98, DOU 13/02/98) dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Constitui crime: destruir ou danificar floresta considerada de preservação permanente, mesmo que em formação, ou utilizá-la com infringência das normas de proteção (Art. 38); cortar árvores em floresta de preservação permanente, sem permissão da autoridade competente (Art. 39); extrair, sem prévia autorização, pedra, areia, cal ou qualquer espécie de minerais de florestas de domínio público ou consideradas de preservação permanente (Art. 44); impedir ou dificultar a regeneração natural de florestas e demais formas de vegetação (Art. 48). Nos crimes previstos nesta seção, a pena é aumentada de um sexto a um terço se do fato resulta a diminuição de águas naturais, a erosão do solo ou a modificação do regime climático (Art. 53, I). Observa-se, portanto, que a implantação de sistemas de proteção das margens dos reservatórios e mesmo de gestão das bacias hidrográficas de modo a se evitar a ocorrência ou ampliação de processos erosivos e o assoreamento de cursos d'água e reservatórios, ao mesmo tempo que estabelece e compartilha responsabilidades (artigo 23 da Lei 8.171/91 c/c artigo 1º, inciso VI

da Lei 9.433/97), resguarda as ações voltadas para a preservação ambiental. A jurisprudência a seguir realça a importância dessa lei:

PROCESSO PENAL. AÇÃO PENAL. LEI 9.605/98, ART. 63. PROPRIEDADE EM ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE – APP. LAGO FORMADO PELO REPRESAMENTO DE RIO INTERESTADUAL. DESCARACTERIZAÇÃO DA ÁREA. SUPRESSÃO DE VEGETAÇÃO NATIVA. EROSIÃO DA ÁREA. ASSOAREAMENTO. DESFIGURAÇÃO DA BELEZA CÊNICA. 1. A supressão de vegetação nativa, plantio, em seu lugar de espécies de vegetais exóticos, compactação e impermeabilização de solo dando lugar à erosão das margens do lago em área de preservação permanente e o seu assoreamento, desfiguração da beleza cênica, constitui o tipo previsto no art. 63 da Lei Ambiental. 2. Não tem validade a licença ambiental expedida por órgão estadual em área sujeita a fiscalização do IBAMA. 3. Ação julgada procedente para condenar o réu Prefeito Municipal, à pena de um ano de reclusão e multa, e obrigá-lo, a em 120 (cento e vinte dias) a recuperar a APP. (TRF-1 – APN: 64619 DF 0064619-90.2008.4.01.0000, Relator: Desembargador Federal Tourinho Neto, Data de Julgamento: 13/06/2012, Segunda Seção, Data de Publicação: e-DJF1 p.17 de 28/06/2012)

O Decreto 6.514/2008 (22/07/08, DOU 23/07/08), ao dispor sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente e estabelecer o processo administrativo federal para apuração dessas infrações, soma-se à Lei 9.605/98 como suporte e ferramenta de controle na preservação ambiental.

Ainda como suporte à preservação ambiental, a Instrução Normativa Ibama nº 10/2003 (31/10/2003, DOU 03/11/2003) estabelece os procedimentos para a conversão de multa administrativa prevista na Lei 9.605/98 em serviços de preservação, melhoria e recuperação da qualidade do meio ambiente, suspendendo sua exigibilidade, com o objetivo de recuperar ou compensar a degradação ambiental, objeto da sanção administrativa. A conversão deverá ser solicitada pelo próprio infrator, por meio de requerimento junto ao Ibama. Se a solicitação de conversão for aceita pelo Ibama, o infrator deverá assinar um termo de compromisso, por meio do qual ficará obrigado a executar, no prazo estabelecido, os serviços previstos, cujo projeto técnico deverá ser previamente aprovado por aquela autarquia. Mesmo com a celebração do termo de compromisso, o infrator ainda deverá pagar 10% do valor da multa que foi convertida. A conversão da multa é importante, pois incentiva e até ajuda a viabilizar a recuperação da área e a manutenção de parte dela, e, mesmo que em pequena monta (10%), realça o caráter punitivo em relação ao dano ambiental gerado. A jurisprudência tem-se manifestado favorável à redução da multa quando do cumprimento do compromisso de reparação do dano ambiental gerado.

PROCESSUAL CIVIL E AMBIENTAL. VIOLAÇÃO DO ART. 535 DO CPC. AUSÊNCIA. LEI N. 9.605/98. INFRAÇÃO ADMINISTRATIVA. DECRETO FEDERAL N.3.179/99 (REVOGADO PELO DECRETO FEDERAL N. 6.514/08). APROVAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA ILEGALMENTE DESMATADA. REDUÇÃO DA EXIGIBILIDADE DA MULTA ADMINISTRATIVA. AUSÊNCIA DE DISCRICIONARIEDADE. REQUISITOS LEGAIS. 1. Quanto à alegada afronta ao art. 535, inc. II, do CPC, tal alegação não merece prosperar, porquanto nota-se que a corte a quo ofereceu conclusão conforme a prestação

jurisdicional solicitada, manifestou-se de forma clara e harmônica sobre a vigência do Decreto n. 3.179/99 e sua revogação pelo Decreto n. 6.514/2008.2. Acerca da violação aos arts. 153 e 154 do citado decreto e ao art. 60 do Decreto n. 3.179/99, sem razão o recorrente, porquanto ao tempo em que foi autuada a recorrida, ainda se encontrava em vigor o citado diploma. De fato, conforme a premissa de fato fixada pelo tribunal de origem, colhe-se que a autuação se efetuou em 5 de dezembro de 2005, período em que não se encontrava em vigor o Decreto n. 6.514/2008.3. Ademais, esta Corte já se manifestou sobre o cabimento da redução da multa nos casos em que há comprovação de que a autoridade administrativa competente verificou o cumprimento integral do PRAD e que a recuperação decorreu das ações tomadas pelo infrator e não devido a outros fatores. Precedentes. 4. Nesse contexto, correto o acórdão ao manter a redução da multa, haja vista o cumprimento integral das obrigações assumidas para a reparação do dano atestado pela FATMA, consoante constatado pelo juízo a quo.5. Recurso especial não provido. (STJ – REsp: 1248649 SC 2011/0082648-1, Relator: Ministro Mauro Campbell Marques, Data de Julgamento: 16/08/2011, T2 - Segunda Turma, Data de Publicação: DJe 24/08/2011)

A Lei 9.984/2000 (17/07/2000, DOU 18/07/2000) dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Cabe destaque o Art. 4º, que estabelece que a atuação da ANA obedecerá aos fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos e será desenvolvida em articulação com órgãos e entidades públicas e privadas integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, cabendo-lhe:

I – supervisionar, controlar e avaliar as ações e atividades decorrentes do cumprimento da legislação federal pertinente aos recursos hídricos;

Portanto, a ANA tem por força da própria lei que a criou grande responsabilidade sobre as questões ambientais envolvendo os reservatórios, como é o caso das erosões de margem e assoreamentos.

A Lei 9.985/2000 (18/07/2000, DOU 19/07/2000) regulamentou o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) e estabeleceu critérios e normas para a criação, a implantação e a gestão das unidades de conservação. Em seu art. 36 dispôs que, nos casos de licenciamento ambiental de empreendimentos de significativo impacto ambiental, com fundamento no EIA/RIMA, o empreendedor é obrigado a apoiar a implantação e manutenção de Unidade de Conservação (UC) do Grupo de Proteção Integral. O montante de recursos a ser destinado pelo empreendedor será fixado pelo órgão ambiental licenciador, de acordo com o grau de impacto ambiental causado pelo empreendimento (art. 36, § 1º). Quando o empreendimento afetar uma UC específica ou sua zona de amortecimento, o licenciamento só poderá ser concedido mediante autorização do órgão responsável por sua administração, e a unidade afetada, mesmo que não pertencente ao Grupo de Proteção Integral, deverá ser uma das beneficiárias da compensação definida nesse artigo (art. 36, § 3º). A ação ou omissão das pessoas físicas ou jurídicas que importem inobservância aos preceitos dessa Lei e a seus regulamentos ou resultem em dano à flora, à fauna e aos demais atributos naturais das Unidades

de Conservação, bem como às suas instalações e às zonas de amortecimento e corredores ecológicos, sujeitam os infratores às sanções nela previstas, assim como em outras normas, como na Lei de Crimes Ambientais (art. 38).

A Resolução Conama 302/2002 (20/03/2002, DOU 15/05/2002) dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. Essa resolução define, em seu artigo 2º, inciso I, um reservatório artificial como a “acumulação não natural de água destinada a quaisquer de seus múltiplos usos”. Constitui Área de Preservação Permanente (APP) a área com largura mínima no entorno dos reservatórios artificiais de: 30 metros para os situados em áreas urbanas consolidadas, 100 metros para os situados em áreas rurais e 15 metros para os de geração de energia elétrica com até 10 hectares (art. 3º, I e II). Os limites da APP poderão ser ampliados ou reduzidos, conforme estabelecido no licenciamento ambiental, e, quando houver, de acordo com o Plano de Recursos Hídricos da bacia (art. 3º, § 1º e § 2º). Estabelece a norma, também, a obrigatoriedade do empreendedor elaborar o Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório, em conformidade com o termo de referência expedido pelo órgão ambiental competente (art. 4º). Nos empreendimentos que são objeto de processo de privatização, até a data de publicação da referida resolução, aplicam-se as exigências ambientais vigentes à época da privatização (art. 5º). A resolução prevê ainda incidir sobre os processos de licenciamento ambiental em andamento à época de sua edição (art. 6º).

A Lei 12.651/12 (25/05/2012, DOU 28/05/2012) instituiu o novo Código Florestal. Para os efeitos dessa Lei, entende-se por interesse social: as atividades imprescindíveis à proteção da integridade da vegetação nativa, tais como prevenção, combate e controle do fogo, controle da erosão, erradicação de invasoras e proteção de plantios com espécies nativas (art.3º, IX, a).

No estudo dos processos erosivos de borda de reservatório merecem ser destacadas as seguintes definições contidas, respectivamente, nos incisos II e III do seu artigo 3º:

II – Área de Preservação Permanente – APP: área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, **com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade**, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas”;

III – Reserva Legal: área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, delimitada nos termos do art. 12, com a função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade, bem como o abrigo e a proteção de fauna silvestre e da flora nativa; [...] (grifou-se)

Em relação aos reservatórios, o inciso III do artigo 4º do Novo Código Florestal considera Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, “as áreas no entorno dos reservatórios d’água artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d’água naturais, na faixa definida na licença ambiental do empreendimento”. O inciso I do artigo 6º dessa lei considera como Área de Preservação Permanente as áreas cobertas com florestas ou outras formas de vegetação destinadas a “**conter a erosão do solo e mitigar riscos de enchentes e deslizamentos de terra e de rocha**” (grifou-se). Embora essa lei remeta ao licenciamento ambiental a definição da faixa ambiental no entorno dos reservatórios, o seu

artigo 5º determina que “na implantação de reservatório d’água artificial destinado à geração de energia ou abastecimento público, é obrigatória a aquisição, desapropriação ou instituição de servidão administrativa pelo empreendedor das Áreas de Preservação Permanente criadas em seu entorno, conforme estabelecido no licenciamento ambiental, observando-se a faixa mínima de 30 (trinta) metros e máxima de 100 (cem) metros em área rural, e a faixa mínima de 15 (quinze) metros e máxima de 30 (trinta) metros em área urbana”.

Em relação à Reserva Legal, ela não será exigida, conforme dispõe o artigo 12, §7º, quando “relativa às áreas adquiridas ou desapropriadas por detentor de concessão, permissão ou autorização para exploração de potencial de energia hidráulica, nas quais funcionem empreendimentos de geração de energia elétrica, subestações ou sejam instaladas linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica”. Assim, somente será exigida Reserva Legal referente à área remanescente do imóvel desapropriado, obrigação esta que recai sobre o proprietário do imóvel, por tratar-se de obrigação *propter rem*.

A nova legislação, ao revogar o antigo Código Florestal, passou a controlar a proteção das áreas de Reserva Legal por meio do Cadastro Ambiental Rural (CAR). Com plantas georreferenciadas, o novo controle deve mapear todo o território nacional, o que deverá tornar mais eficaz a proteção das áreas de Reserva Legal. O artigo 29 dessa lei criou o CAR, no âmbito do Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (Sinima), na forma de um “registro público eletrônico de âmbito nacional, obrigatório para todos os imóveis rurais, com a finalidade de integrar as informações ambientais das propriedades e posses rurais, compondo base de dados para controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico e combate ao desmatamento”. Além de possibilitar o planejamento ambiental e econômico do uso e ocupação do imóvel rural, a inscrição no CAR, acompanhada de compromisso de regularização ambiental, quando for o caso, é pré-requisito para acesso à emissão das Cotas de Reserva Ambiental e aos benefícios previstos nos Programas de Regularização Ambiental (PRA) e de Apoio e Incentivo à Preservação e Recuperação do Meio Ambiente, ambos definidos pela Lei 12.651/2012. A jurisprudência a seguir ilustra a aplicação do novo Código Florestal, Lei 12.651/2012, em relação à necessidade de demarcação de área de Reserva Legal e inscrição no CAR:

AGRAVO DE INSTRUMENTO. AÇÃO CIVIL PÚBLICA AMBIENTAL. TUTELA ANTECIPADA. INSTITUIÇÃO DE RESERVA LEGAL. APLICAÇÃO DO NOVO CÓDIGO FLORESTAL À ESPÉCIE (LEIS Nº 12.651/12 E 12.727/12 OBRIGAÇÃO DE INSCRIÇÃO NO CADASTRO AMBIENTAL RURAL. REGRAS AUTOAPLICÁVEIS. A instituição de 20% de área de reserva legal, exigência da então Lei nº 4.771/65, também é feita pela Lei nº 12.651/2012 que a revogou, devendo os réus, ora agravantes, apresentar junto ao órgão ambiental o projeto de demarcação de tal área de reserva legal para aprovação e recomposição nos prazos estabelecidos pela Lei nº 12.651/12, e providenciar ainda o registro da área de reserva legal no órgão ambiental competente por meio de inscrição do imóvel no Cadastro Ambiental Rural, previsto nos arts. 29 e seguintes do novo Código Florestal, perfeitamente aplicável à espécie, observado, ainda, após tal inscrição, o processo de recomposição de tal área em até dois anos por meio dos prazos estabelecidos no Programa de Regularização Ambiental de que trata o art. 59 da sobredita lei. (TJ-SP - AI: 00490010320138260000 SP 0049001-03.2013.8.26.0000, Relator: Paulo Ayrosa, Data de Julgamento: 29/08/2013, 2ª Câmara Reservada ao Meio Ambiente, Data de Publicação: 04/09/2013)

Conforme Caribé (2013), os assuntos envolvendo a interpretação e a aplicação do atual Código Florestal carecem de maiores estudos e análises, mesmo porque, diante da recente edição da lei, ainda não há consolidados entendimentos doutrinários e jurisprudenciais acerca das novas disposições legais em referência. As dificuldades de ordem prática têm surgido em razão da demanda pela compatibilização da aplicação da nova lei com a necessidade de se preservar os atos já consolidados na vigência da legislação anterior. Algumas mudanças na lei foram significativas para o setor elétrico, tais como as flexibilizações para as faixas de Áreas de Preservação Permanente e a não exigência de Reserva Legal para as áreas adquiridas ou desapropriadas para fins de exploração de potencial de energia hidráulica, nas quais funcionem empreendimentos de geração de energia elétrica, subestações ou sejam instaladas linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica.

O Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório, previsto na Resolução Conama 302/2002, também foi previsto pelo novo Código Florestal. Na implantação de reservatórios d'água artificiais de que trata o *caput* do art. 5º, o empreendedor, no âmbito do licenciamento ambiental, elaborará Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório, em conformidade com termo de referência expedido pelo órgão competente do Sisnama, não podendo o uso exceder a 10% (dez por cento) do total da Área de Preservação Permanente. O Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório Artificial, para os empreendimentos licitados a partir da vigência do novo código, deverá ser apresentado ao órgão ambiental concomitantemente com o Plano Básico Ambiental, e aprovado até o início da operação do empreendimento, não constituindo a sua ausência impedimento para a expedição da licença de instalação. (Art. 5º, §1º e §2º).

Quanto às áreas de APP no entorno dos reservatórios, há um aparente conflito entre o disposto no art. 62 do atual Código Florestal (Lei 12.651/12) e o artigo 3º da Resolução Conama 302/2002; entretanto, deverão ser observadas as regras de direito intertemporal, conforme ilustra a jurisprudência a seguir:

PROCESSUAL CIVIL, AMBIENTAL E CONSTITUCIONAL. INCIDENTE DE UNIFORMIZAÇÃO DE JURISPRUDÊNCIA. RESERVATÓRIO ARTIFICIAL DE USINA HIDRELÉTRICA. ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE. ART. 62 DO NOVO CÓDIGO FLORESTAL: APLICABILIDADE. RESOLUÇÃO CONAMA 302/2002: INCIDÊNCIA AOS FATOS POSTERIORES. RESOLUÇÃO CONAMA 04/85: FORMAÇÕES FLORÍSTICAS E ÁREAS DE FLORESTAS COMO DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE, E NÃO QUALQUER ÁREA AO REDOR DE RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS. INAPLICABILIDADE. NATUREZA DO EMPREENDIMENTO. LEI MUNICIPAL. ÁREA URBANA. INÍCIO DE PROVA. I – O art. 62 do Novo Código Florestal é aplicável aos reservatórios artificiais de água destinados a geração de energia ou ao abastecimento público que foram registrados ou tiveram seus contratos de concessão ou autorização assinados anteriormente à MP 2.166/67, de 24/08/2001, tão somente para evitar demolições, sem, no entanto, ter o condão de possibilitar novas edificações, ainda que seja além da cota máxima *maximorum*. II - A Resolução CONAMA nº 302/2002, que dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais, somente se aplica aos fatos a ela posteriores. Proposta de enunciado de Súmula. III – A Resolução CONAMA nº 04/85, editada em razão do art. 18 da Lei nº 6.938/81, apenas contempla as formações

florísticas e áreas de florestas como reserva ecológica, em nada se relacionando às áreas de preservação permanente incluídas no antigo Código Florestal (Lei nº 4.771/65) por ocasião da Medida Provisória nº 2.166-67/2001. Proposta de enunciado de Súmula. IV – A existência de lei municipal indicando a natureza urbana de determinada área é início de prova para se afastar a alegação de que o imóvel nela construído possui natureza rural, devendo ser cotejada com os demais elementos de prova acostados aos autos para fins de fixação da área de preservação permanente respectiva. Proposta de enunciado de Súmula. V – Incidente de uniformização acolhido. (TRF-1 - IUJ: 00040575820084013802 0004057-58.2008.4.01.3802, Relator: Desembargador Federal Jirair Aram Meguerian, Data de Julgamento: 29/04/2016, Terceira Seção, Data de Publicação: 17/05/2016 e-DJF1)

O Decreto-Lei nº 227 (28/02/1967, DOU 28/02/1967) instituiu o Código de Mineração; no entanto, por força do § 1º do artigo 3º, entende-se que não se insere como atividade de mineração a extração de materiais para a construção das barragens para formação de reservatórios:

§ 1º. Não estão sujeitos aos preceitos deste Código os trabalhos de movimentação de terras e de desmonte de materiais *in natura*, que se fizerem necessários à abertura de vias de transporte, obras gerais de terraplenagem e de edificações, desde que não haja comercialização das terras e dos materiais resultantes dos referidos trabalhos e ficando o seu aproveitamento restrito à utilização na própria obra.

Cabe salientar que essa exclusão não é adstrita ao tipo de material, mais sim a sua finalidade. Assim, por exemplo, o material areia, muito usado na construção de barragens, e nesse caso não sujeito aos preceitos do Código de Mineração, quando explorado para fins comerciais, submete-se ao seu controle, como ilustra a jurisprudência a seguir:

CIVIL E PROCESSUAL CIVIL. REPARAÇÃO DE DANOS. EMPRESAS DE EXTRAÇÃO DE AREIA E SEIXO IMPACTADAS POR CONSTRUÇÃO DE USINA HIDRELÉTRICA. ATIVIDADE ILÍCITA. INDENIZAÇÃO. IMPOSSIBILIDADE. 1. Não há falar em violação ao art. 535 do Código de Processo Civil. O Tribunal a quo dirimiu as questões pertinentes ao litígio, afigurando-se dispensável que venha examinar uma a uma as alegações e fundamentos expendidos pelas partes. 2. A análise da alegada insuficiência de comprovação quanto ao efetivo exercício da atividade de exploração de areia e seixo, de forma contínua, exigiria reapreciação do conjunto probatório, o que é vedado em recurso especial. Incidência da Súmula 7/STJ. 3. A falta do questionamento explícito não prejudica o exame do recurso especial, uma vez que a jurisprudência desta Corte é uníssona em admitir o questionamento implícito. Precedentes. 4. A falta de autorização do Departamento Nacional de Produção Mineral para a realização da atividade de extração mineral não constitui mera irregularidade, passível de futura conformação, mas ilicitude, pois é proibida a extração de areia e seixo sem a competente permissão, concessão ou licença, sendo que a realização da atividade indevida é passível de sanções administrativas e penais. 5. Sendo ilícita a atividade promovida pelas recorridas, no caso ora em análise, não cabe a indenização requerida. 6. Recurso especial provido. (STJ - REsp: 1188683 TO 2010/0065692-0,

Relator: Ministro Luis Felipe Salomão, Data de Julgamento: 15/03/2011, T4 - Quarta Turma, Data de Publicação: DJe 22/03/2011)

Conforme expõe Milaré (2005), as atividades de extração mineral são degradadoras por excelência, motivo pelo qual devem ser exercidas dentro dos mais rigorosos critérios técnicos. Tais atividades são incompatíveis com a geração de energia hidrelétrica, motivo pelo qual não é permitida a exploração mineral dentro das áreas desapropriadas. A fiscalização das margens dos reservatórios é de extrema importância para identificação de extrações ilegais e prevenção de processos erosivos. Embora as áreas de empréstimo não sejam entendidas como áreas de mineração, elas oferecem riscos semelhantes na deflagração de processos erosivos, como mostrado na Figura 1.

Finalmente, cabe destacar que, embora o inciso III do artigo 4º da Lei 12.651/12 remeta para o licenciamento ambiental do empreendimento referente à construção de reservatórios, a definição das Áreas de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, esse licenciamento não tem o condão de proteger o empreendedor em relação à sua responsabilidade por eventuais danos ambientais surgidos em áreas não previstas no licenciamento como de preservação permanente. Por exemplo, no caso de ocorrência de processos erosivos, o empreendedor está sujeito a ações de recomposição e regeneração da flora, de modo a interromper o processo erosivo e a recuperar a área degradada.

7 Os reservatórios no contexto do direito do consumidor

Os reservatórios, em especial os de médio e grande volume de água acumulada, geralmente têm como finalidade atender ao consumidor, seja no que tange ao abastecimento de água para consumo humano, seja no que se refere à geração de energia. Então, existe aí um direito do consumidor a ser garantido. No entanto, o atendimento ao direito do consumidor pode ser prejudicado por suas próprias ações. Por exemplo, pode faltar água no reservatório porque sua capacidade de acumulação foi reduzida ou mesmo exaurida por assoreamentos provocados por sedimentos oriundos de erosões ocasionadas pelo próprio consumidor, devido à ocupação e ao uso indiscriminado do solo, ou ainda, devido à falta de água nas nascentes e cursos d'água ocasionada pela impermeabilização excessiva do solo pelo consumidor. No caso de reservatórios destinados a suprir as necessidades de água para consumo humano, sua poluição, com impedimento de uso, pode ser ocasionada pelo próprio consumidor, por meio de lançamentos de águas servidas em galerias de águas pluviais ou mesmo diretamente nos cursos d'água e reservatórios. Embora não se trate de água para consumo humano, a Figura 4 mostra uma imagem com a presença de peixes mortos devido ao excesso de poluição da água do reservatório, situação em que a água se mostra totalmente inapropriada para o consumo e para a própria vida aquática e com custo mais elevado para torná-la apropriada. Cabe, então, aqui repisar sobre o entendimento do Superior Tribunal de Justiça, manifestado por meio do Informativo nº 418, já apontado ao texto quando se discutiram os princípios de Direito Ambiental, segundo os quais, quando o consumidor agride direitos coletivos por danos ambientais, inverte-se o ônus da prova, não se sobressaindo a hipossuficiência do consumidor.



Figura 4. Mortandade de peixes devido à poluição da água do reservatório.

Foto: José Camapum de Carvalho, 5 nov. 2015.

Outro aspecto relevante diz respeito à previsão legal de uso de normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) no caso de inexistência de normas específicas (CDC, art. 39, inciso VIII) para que seja colocado no mercado qualquer produto ou serviço. No entanto, se o uso da norma agride ou coloca em risco o meio ambiente, deve-se aplicar, respectivamente, os princípios da prevenção e da precaução e não se fazer uso daquela.

Sobre esse ponto, é importante ressaltar que o uso de normas e conhecimentos técnicos, herméticos, não pode servir como forma de retirar a transparência das decisões que afetem o meio ambiente e a saúde humana. Isso significa que o Poder Público deve, sempre, buscar informar a sociedade sobre decisões que revertam em consequências sobre as pessoas e sobre o ambiente natural, traduzindo em linguagem leiga as bases técnicas que conduziram à tomada de decisão. Isso porque uma das estratégias que vêm sendo utilizadas pelas empresas, e muitas vezes avalizadas pelo Estado, é a fundamentação de suas ações em estudos e relatórios estritamente técnicos, assim como em normas técnicas, que não são compreensíveis ao público em geral. Com isso, retira-se da sociedade a capacidade de opinar e de participar, assim como fere-se o princípio da informação (PARDO, 2015).

8 Considerações finais

O capítulo buscou situar os reservatórios e os problemas que estes apresentam no contexto do Direito Ambiental. Depreende-se do apresentado que os princípios do Direito Ambiental são plenamente aplicáveis durante a construção e vida útil dos reservatórios de água artificiais, cabendo destacar, inicialmente, o princípio da ubiquidade, segundo o qual o meio ambiente ecologicamente equilibrado, enquanto bem de todos (bem difuso), não encontra qualquer fronteira, seja espacial, territorial ou temporal.

A junção das análises e avaliações socioambientais com as técnicas pode conduzir à limitação de ocorrência e evolução de problemas ambientais ligados aos reservatórios, como as erosões de borda, o assoreamento e a poluição das águas, sendo a aplicação do princípio da Educação Ambiental uma ferramenta de grande relevância para que se evite a maioria desses problemas.

No caso das erosões de borda de reservatório, onde se situaria a responsabilidade? Aplicando-se a Teoria da Responsabilidade Objetiva, ocorre a presunção de que o agente, o responsável pela construção e manutenção do reservatório, causou o dano, pois antes, em prin-

cípio, ele inexistia, invertendo-se o ônus da prova e cabendo então ao próprio concessionário buscar a exclusão de sua responsabilidade (VITTA, 2008). Sobre esse ponto, é importante, inclusive, ressaltar que sendo a teoria mais aceita pela doutrina e jurisprudência a do risco integral, sequer excludentes de responsabilidade podem ser invocados nesses casos. Com isso, presente no caso concreto a erosão de margem, o que configura um dano ao meio ambiente, e o nexo de causalidade entre esse dano e a conduta correspondente à construção e à existência do reservatório, torna-se passível de responsabilização do concessionário, cabendo-lhe o ônus da prova em contrário.

Conforme indicado na análise das Constituições brasileiras, a Constituição Federal de 1988, no § 3º do artigo 225, não faz distinção entre as pessoas físicas e jurídicas, indo, no caso da construção e operação do reservatório de água, da pessoa do engenheiro às empresas projetistas, executoras, fiscalizadoras e operadoras do empreendimento. No entanto, muitas vezes os problemas de erosão de margem de reservatório são oriundos da ocupação e uso do solo em seu entorno, ocupação e uso muitas vezes indevidos e/ou inapropriados, cabendo ao concessionário o ônus da prova de que não é ele o causador dos problemas ambientais. Não haveria, nesse caso, excludente de responsabilidade, mas sim do próprio nexo de causalidade, que recairia sobre aqueles que causaram os danos. Essa questão é, contudo, extremamente controversa, na medida em que autores e jurisprudência, ainda quando há excludente do próprio nexo de causalidade, entendem que a simples ligação do agente com o dano seria suficiente para fazer incidir a responsabilidade civil extracontratual.

No que tange ao assoreamento e demais formas de poluição das águas dos reservatórios, em atenção ao princípio do poluidor-pagador e à adoção do regime de responsabilidade civil ambiental objetiva, tanto o poluidor direto, por exemplo, o proprietário rural, o minerador, o construtor, aquele que loteia e promove a ocupação de áreas urbanas e rurais sem o devido cuidado, como o poluidor indireto, por exemplo, o órgão público licenciador, inclusive da construção e operação do reservatório, os construtores, os incorporadores e corretores, dentre outros, respondem solidariamente na obrigação de reparar o dano ambiental causado.

No caso dos reservatórios, a temporalidade, considerando-se os princípios do Direito Ambiental, assume papel relevante em relação à responsabilidade civil no campo da proteção e preservação ao meio ambiente, em especial em relação à possibilidade de surgimento das erosões de borda e do assoreamento e de suas próprias ocorrências. Com fundamento na responsabilidade objetiva, a responsabilidade civil pode dividir-se em *ex ante* e *ex post*, ou seja, em responsabilidade, respectivamente, pelo dano ou risco de dano futuro e pelo dano já ocorrido (FERREIRA; SILVA, 2007). Destaca-se que, embora nos dois momentos a responsabilidade tenha cunho objetivo, no primeiro, o *ex ante*, sobressai a aplicação dos princípios da precaução e da prevenção, com base nos quais a engenharia deve atuar evitando ou mitigando o dano, enquanto no segundo, *ex post*, tornam-se aplicáveis os princípios da reparação e do poluidor-pagador, e o empreendedor passa a assumir, então, responsabilidade pelos danos a que direta ou indiretamente deu origem. Quanto ao tempo do dano ambiental em si, como bem entende Steigleder (2004), é o longo prazo que define as modificações ecológicas, as reações químicas, as ações biológicas, não sendo muitas vezes o dano *ex post* imediatamente aparente (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2012). Essa dilação no tempo torna, muitas vezes, difícil a definição do nexo de causalidade, o que

pode inviabilizar a responsabilização do causador do dano e requerer a necessidade de se redefinir o seu tempo.

No caso dos reservatórios, a grande extensão física das áreas envolvidas termina por englobar uma enorme variedade de fatores oriundos do meio físico, da fauna, da flora e do tecido social, o que conduz à necessidade de se agir muitas vezes com fundamento no princípio da precaução. No entanto, análises multi, inter e transdisciplinares são ferramentas auxiliares relevantes para a definição de medidas de prevenção.

Referências

AQUINO, S. C. N.; COELHO, J. A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Análise da influência da qualidade da água na compactação de solos tropicais. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 45., Brasília, 2016; ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 19., Brasília, 2016. Anais 45ª RAPv e 19º ENACOR. Brasília. 13 p.

BECHARA, E. *Licenciamento e compensação ambiental: na lei do sistema nacional de unidades de conservação (SNUC)*. São Paulo: Atlas, 2009. 312 p.

BRASIL. Constituição Política do Império do Brazil, elaborada por um Conselho de Estado e outorgada pelo Imperador D. Pedro I em 25 de março de 1824. *Coleção de Leis do Brasil* – CLBR, Rio de Janeiro, 25 mar. 1824.

_____. Poder Legislativo. Constituição da República dos Estados Unidos do Brasil. Texto promulgado em 24 de fevereiro de 1891. *Diário Oficial da União*, Rio de Janeiro, 24 fev. 1891.

_____. Poder Executivo. Chefe do Governo Provisório da República dos Estados Unidos do Brasil. Decreto nº 24.643 – Código de Águas. *Coleção de Leis do Brasil* – CLBR, Rio de Janeiro, 10 jul. 1934, retificado em 27 jul. 1934.

_____. Poder Legislativo. Constituição da República dos Estados Unidos do Brasil. Texto promulgado em 16 de julho de 1934. *Coleção de Leis do Brasil* – CLBR, Rio de Janeiro, 16 jul. 1934.

_____. Presidência da República dos Estados Unidos do Brasil. Constituição dos Estados Unidos do Brasil. Texto promulgado em 10 de novembro de 1937. *Diário Oficial da União*, Rio de Janeiro, 10 nov. 1937, republicada em 11 nov. 1937, 18 nov. 1937 e 19 nov. 1937.

_____. Poder Executivo. Chefe do Governo Provisório da República dos Estados Unidos do Brasil. Decreto-lei nº 852. Modifica o Código de Águas. *Coleção de Leis do Brasil* – CLBR, Rio de Janeiro, 11 nov. 1938.

_____. Poder Legislativo. Constituição dos Estados Unidos do Brasil. Texto promulgado em 18 de setembro de 1946. *Diário Oficial da União*, Rio de Janeiro, 19 set. 1946, republicado em 25 set. 1946 e 15 out. 1946.

_____. Poder Legislativo. Constituição da República Federativa do Brasil. Texto promulgado pelo Congresso Nacional. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 24 jan. 1967.

_____. Presidência da República. Decreto-lei nº 227. Dá nova redação ao Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940, Código de Minas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 fev. 1967.

_____. Poder Legislativo. Constituição da República Federativa do Brasil. Texto promulgado pelo Congresso Nacional. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 24 jan. 1967.

_____. Poder Legislativo. Lei nº 9.605. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 13 fev. 1998.

_____. Poder Legislativo. Lei nº 9.984. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 jul. 2000.

_____. Poder Legislativo. Lei nº 9.985. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 19 jul. 2000.

_____. Poder Legislativo. Lei nº 10.406 Código Civil. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 jan. 2002.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama nº 302, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 13 maio 2002.

_____. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instrução Normativa Ibama nº 10 de 31/10/2003. Estabelece os procedimentos para a aplicação da conversão de multa administrativa em serviços de preservação, melhoria e recuperação da qualidade do meio ambiente, previstos no art. 72, § 4º, da Lei nº 9.605, 12 de fevereiro de 1998, e no art. 2º, § 4º, do Decreto nº 3.179, de 21 de setembro de 1999. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 nov. 2003.

_____. Presidência da República. Decreto nº 6.514 de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 23 jul. 2008.

_____. Poder Legislativo. Constituição da República Federativa do Brasil. Texto promulgado em 5 de outubro de 1988. *Edição do Senado Federal*, Brasília, DF, 2011.

_____. Poder Legislativo. Lei nº 12.608. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC), autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 abr. 2012.

_____. Poder Legislativo. Lei nº 12.651. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 maio 2012.

CARIBÉ, K. V. B. Área de Preservação Permanente – APP em reservatórios d'água artificiais após o Novo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012). *Âmbito Jurídico*, XVI, n. 116, 4p., 2013. Disponível em: <http://www.ambitojuridico.com.br/site/link=revista_artigos_leitura&artigo_id=13671>. Acesso em: dez. 2016.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. A engenharia e as catástrofes oriundas de elevadas precipitações pluviométricas. *Revista Fundações & Obras Geotécnicas*, São Paulo, ano 1, n. 5, p. 6-12, 2011. Caderno Especial Chuvas.

_____. *Aspectos técnicos, jurídicos e educacionais e a expansão urbana ambientalmente sustentável*. 90 p. Monografia (Bacharelado em Direito) – Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), Faculdade de Ciências Jurídicas e de Ciências Sociais, Brasília, 2009a.

_____; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEUZINGER, M. D. A infiltração no contexto da Educação Ambiental, da Engenharia e do Direito. In: CARVALHO, J. C. de; GITIRANA JÚNIOR, G. F. N.; CARVALHO, E. T. L. (Org.). *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais*. Brasília: Faculdade de Tecnologia, 2012. p. 1-23.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. T. O “poluidor indireto” e a responsabilidade civil por dano ambiental. 2009. 90 p. Monografia (Bacharelado em Direito) – Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), Faculdade de Ciências Jurídicas e de Ciências Sociais, Brasília, DF, 2009b.

FERREIRA, G. L. B. V.; SILVA, S. T. Análise dos Fundamentos da Compensação Ambiental: A responsabilidade civil *ex ante* no direito brasileiro. *Revista de Informação Legislativa*, Brasília, ano 44, n. 175, p. 125-137, 2007.

LEUZINGER, M. D.; CUREAU, S. *Direito ambiental*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 384 p. (Série Universitária).

MILARÉ, E. *Direito do ambiente: doutrina, jurisprudência, glossário*. 4. ed. revisada, atualizada e ampliada. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2005. 1. 120 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED). *Relatório Brundtland. Nosso futuro comum*. Nova York. 1987.

PARDO, J. E. *O desconcerto do Leviatã: política e direito perante as incertezas da ciência*. São Paulo: Instituto O Direito por um Planeta Verde, 2015.

RODRIGUES, M. A. *Direito Ambiental esquematizado*. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016. 723 p.

STEIGLEDER, A. M. *Responsabilidade civil ambiental: as dimensões do dano ambiental no direito brasileiro*. Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2004.

VITTA, H. G. *Responsabilidade civil e administrativa por dano ambiental*. São Paulo: Malheiros Editores, 2008. 166 p.

CAPÍTULO 2

Aspectos sociais e de Educação Ambiental emergentes dos processos de implantação de UHE's

Agustina Rosa Echeverría
Fernanda Posch Rios
Patrícia Layne Alves
Aline de Arvelos Salgado
Marta Pereira Luz

Palavras-chave: Engenharia e impacto ambiental. Energia e problemas ambientais. Educação Ambiental crítica.

1 Introdução

A primeira Revolução Industrial e o modelo de crescimento econômico no qual ela esteve inserida impulsionaram a produção de bens de consumo, acarretando um aumento da demanda de recursos naturais e agravando os problemas advindos da busca incessante pelo acúmulo de capital. Começa assim uma época em que a ação do homem molda o sistema Terra de modo mais decisivo que as forças não antrópicas. E começam, também, as primeiras contribuições científicas referentes ao impacto das ações antrópicas, como os cálculos que o químico sueco Svante Arrhenius faz, em 1896, sobre os efeitos que uma alteração antrópica nas concentrações dos gases, que retêm calor na atmosfera poderiam provocar em todo o sistema Terra. Essas contribuições pioneiras fizeram surgir com força uma consciência ambientalista que foi “ceifada” violentamente pela Primeira Guerra Mundial. A descrição do historiador Eric Hobsbawm no livro *Era dos extremos* é muito representativa do que essa guerra significou:

Milhões de homens ficavam uns diante dos outros nos parapeitos de trincheiras baricadas com sacos de areia, sob as quais viviam como – e com – ratos e piolhos. De vez em quando seus generais procuravam romper o impasse. Dias e mesmo semanas de incessante bombardeio de artilharia – que um escritor alemão chamou depois de “furacões de aço” (ERNEST JUNGER, 1921) – “amaciavam” o inimigo e o mandavam para baixo da terra, até que no momento certo levadas de homens saíam por cima do parapeito, geralmente protegidos por rolos e teias de arame farpado, para a “terra de ninguém”, um caos de crateras de granadas inundadas de água, tocos de árvores calcinadas, lama e cadáveres abandonados, e avançavam sobre as metralhadoras, que os ceifavam, como eles sabiam que aconteceria. (HOBSBAWN, 1996, p. 33)

Nessas condições, não havia muito espaço para o pensamento ambientalista, parecia que a própria espécie humana estava se autodestruindo.

A Segunda Guerra Mundial incorporou, definitivamente, a ciência e a tecnologia aos conflitos bélicos, e a Guerra Fria, que a sucedeu, instalou na consciência dos homens, especialmente na Europa – cenário das duas guerras – uma maior preocupação com a potência humana na possibilidade de destruição que com os desastres ambientais.

Mas os episódios de impactos ambientais das ações antrópicas, no auge do capitalismo do pós-guerra, agudizavam-se. Nesse marco a publicação de *Primavera silenciosa*, em 1962, foi um ponto de inflexão no questionamento da problemática ambiental.

Trata-se do primeiro livro de ciência ambiental a suscitar um sobressalto na opinião pública norte-americana, a ser discutido em uma coletiva de imprensa pelo presidente John F. Kennedy e a permanecer longamente em uma lista de best-sellers. Entre 1962 e 1966, o livro foi traduzido (em ordem cronológica) ao alemão, francês, sueco, dinamarquês, holandês, finlandês, italiano, espanhol, português, japonês, islandês e norueguês, sendo sucessivamente traduzido ao chinês (1979), tailandês (1982), coreano (1995) e turco (2004). Ao alertar para a mortandade dos pássaros e outros animais causada pelo pesticida DDT, Carson enfatizava – no ano mesmo da crise dos mísseis em Cuba – que os riscos de aniquilamento da humanidade já não mais advinham apenas do risco nuclear, mas da primavera silenciosa. Mais que a guerra nuclear, devia-se doravante temer a guerra menos ruidosa, mas não menos ruínosa, contra a natureza. (MARQUES, 2015, p. 394-395)

A obra literária é classificada como instigante e provocativa, pois além de expor os perigos do DDT, coloca em cheque o otimismo epistemológico retratado pela confiança cega da humanidade no progresso tecnológico. Assim, o livro abriu espaço para o movimento ambientalista.

Entretanto, é importante destacar que a passagem do nuclear ao ecológico como objeto de preocupação social tem uma dimensão especial porque pressupõe a compreensão de que, diferentemente de uma catástrofe nuclear, a degradação ambiental é resultado de um processo econômico no qual as mudanças são paulatinas e às vezes imperceptíveis.

Essa lenta tomada de consciência ganha impulso nos anos 1960. Em 1968 reuniu-se em Roma o denominado Clube de Roma, uma organização internacional não governamental que, desde seu início, como consta na apresentação da atualização de trinta anos do seu famoso relatório *Limites do crescimento*:

[...] adotou três princípios básicos em suas análises: a interdependência das nações na resolução de problemas globais; o pensamento holístico nos problemas de longo prazo (problemas estes às vezes relegados a um segundo plano na visão de políticos que só se preocupam com questões mais urgentes); e uma abordagem multidisciplinar na análise desses problemas e de suas possíveis soluções. (MEADOWS; RANDERS; MEADOWS, 2007, p. XXV)

É muito significativo o nome do primeiro capítulo de *Limites do crescimento*: *Overshoot*.

Overshoot significa exceder, ir longe demais, ultrapassar limites acidentalmente – sem qualquer intenção. As pessoas experimentam esses excessos todos os dias. [...] Se você abrir exageradamente uma torneira de água quente no banho poderá ficar escaldado.

[...] A indústria química tem produzido mais produtos químicos com cloro do que a atmosfera superior pode assimilar com segurança. Agora a camada de ozônio estará perigosamente comprometida durante décadas até que se reduzam os níveis de cloro na estratosfera.

As três causas de *overshoot* são sempre as mesmas, qualquer que seja a escala, do plano pessoal ao planetário. Em primeiro lugar ocorre o crescimento, aceleração, mudança rápida. Segundo, há alguma forma de limite ou barreira, além da qual o sistema não poderá seguir com segurança. Terceiro, há um atraso ou engano nas percepções e nas respostas que tentam manter o sistema dentro de seus limites. Essas três causas são necessárias e suficientes para provocar um *overshoot*. (MEADOWS; RANDERS; MEADOWS, 2007, p. 1)

Limites do crescimento significou uma contribuição importante para a deflagração da discussão sobre a temática ambiental. Da mesma forma destacam-se a “Conferência Mundial de Meio Ambiente Humano” em Estocolmo (1972), da qual resultaram os 26 princípios que constituem a Declaração de Estocolmo, e a criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, que redundou numa nova perspectiva de desenvolvimento que considerasse a satisfação das necessidades e os desejos de todos os habitantes da Terra, o pluralismo das sociedades e a melhoria da relação da humanidade com a natureza e das pessoas entre si. (DECLARAÇÃO DE ESTOCOLMO, 2015).

Chegamos, enfim, na segunda metade do século XX ao reconhecimento, advindo da participação ativa de cientistas, biólogos, químicos, ambientalistas, filósofos, de que estamos numa nova era na qual, no conjunto de forças que moldam o sistema Terra, a força de ação antrópica prevalece sobre as forças geradas por fatores não humanos. Essa era é chamada de Antropoceno.

A importância do conceito de Antropoceno é sobretudo filosófica. Com ele se abole a cisão inaugural na consciência de si do homem, entre a esfera do humano e do não humano. No Antropoceno, a natureza deixou de ser uma variável independente do homem e se tornou, em última instância, uma relação social. Mas o inverso é não menos verdadeiro: as relações entre os homens em sua mais ampla acepção – da esfera econômica à simbólica – perdem a sua autonomia e tornam-se gradualmente funções de variáveis ambientais. (MARQUES, 2015, p. 400)

Mas já houve épocas em que o modo de pensar a natureza foi diferente. Encontramos nos gregos pré-socráticos a ideia da *physis*, compreendida a partir da sua gênese mitológica.

Pensando a *physis*, o filósofo pré-socrático pensa o ser e a partir da *physis* pode então chegar a uma compreensão da totalidade do real: do cosmos, dos deuses e das coisas particulares, do homem e da verdade, do movimento e da mudança, do animado e do inanimado, do comportamento humano e da sabedoria, da política e da justiça.

É com Platão e Aristóteles que se começa a assistir a um certo desprezo “pelas pedras e pelas plantas” e a um privilegiamento do homem e da ideia. (GONÇALVES, 2004, p. 31)

Com o “floreecer” da filosofia grega começa a desqualificação dos pensadores anteriores como expressão de um pensamento mítico e não filosófico e com isso se inicia uma mudança

no conceito de *physis*, de natureza, que pouco a pouco se afirmará até atingir essa concepção de natureza desumanizada e dessa natureza não humana. Assim, aos poucos, a natureza se torna “objeto”.

A atitude prometeica reduz aos poucos a natureza a “objeto” do sujeito, até estranhá-la completamente na Idade Moderna ao convertê-la em quantidade, força vetorial e extensa. Pode-se dizer que toda a histórica da filosofia da Idade Moderna e a Idade Contemporânea é fortemente dominada pela dupla empresa, inacabada, de determinar a ontologia desse objeto e o estatuto epistemológico da relação que o sujeito mantém com ele. (MARQUES, 2015, p. 401)

O abismo entre ser humano e natureza se alarga com a ciência moderna, que aprofunda ao extremo os mecanismos de exploração dos recursos naturais, a ponto de o ser humano tornar-se a causa da escalada global das mudanças ambientais. Trata-se da época da dominação humana. É o que os cientistas chamam de Antropoceno.

No contexto dessa problemática, este capítulo pretende estimular a reflexão a respeito dos impactos sociais decorridos da implantação e operação de reservatórios de usinas hidrelétricas que corroboram com a complexidade ambiental, revelada na tensão entre a necessidade energética, a atuação do profissional de Engenharia e os conflitos socioambientais oriundos da aplicação quase exclusiva de conhecimentos técnicos. Ao evidenciar a relevância da Educação Ambiental, sinalizada de forma brilhante nos princípios de conhecimento, conscientização, comportamento, competência, capacidade de avaliação e participação definidos na Carta de Belgrado – resultante do Seminário Internacional de Educação Ambiental ocorrido em Belgrado¹ no ano de 1975, quando a crise ainda não era considerada civilizatória –, percebe-se o desafio de equacionar a relação entre as demandas energéticas e uma convivência racional e responsável com o meio ambiente, trazendo parte da experiência de Educação Ambiental desenvolvida entre comunidades do município de Paracatu (MG), diretamente envolvidas na implantação da Usina Hidrelétrica de Batalha.

2 O impacto socioambiental das grandes represas

Rios, bacias hidrográficas e ecossistemas aquáticos são os motores biológicos do planeta. Eles são a base para a vida e o sustento de comunidades locais. Represas transformam as paisagens e criam riscos de impactos [que] em muitos casos levaram à perda irreversível de espécies e ecossistemas. (MARQUES, 2015, p. 409)

Dados mostram que nos últimos 130 anos se construiu, em média, uma grande represa por dia, e essas represas retêm muitas gigatoneladas de sedimentos por ano. Segundo Nilsson *et al.* (2005), ao se calcular a magnitude dessa interferência humana no ciclo hidrológico, foi possível constatar que, além de drenarem a metade das zonas úmidas, essas grandes barragens

1 O Encontro de Belgrado ocorreu na Iugoslávia em 1975, em resposta às recomendações da Conferência de Estocolmo. Nesse evento foram formulados os princípios e orientações para um programa de Educação Ambiental, o que originou a Carta de Belgrado, considerado um marco histórico para a evolução dos movimentos em torno do tema meio ambiente.

retinham 6.500 quilômetros cúbicos do fluxo hidrológico dos rios, o que correspondia em 2005 a 15%.

Em 2004, um estudo do WWF, *Rivers at risk*, realizado em cooperação com o WRI, mostrou que 60% dos 227 maiores rios do mundo foram fragmentados e tiveram seus fluxos alterados por essas grandes barragens, sendo que 37% deles o foram gravemente. Segundo a *Internacional Rivers*, dentre essas grandes barragens contam-se mais de 300 barragens gigantes (*major dams*) com mais de 150 metros de altura, verdadeiras tumbas da biodiversidade do Antropoceno, apresentadas como atrações turísticas e objetos-fetiche da engenharia contemporânea. O Brasil é o décimo país do mundo em números de grandes barragens (516) e o quarto em número de barragens gigantes (16), após os EUA (50), a Rússia e o Canadá. (MARQUES, 2015, p. 409-410)

As barragens são responsáveis, também, pela erosão das terras ribeirinhas, pelo aumento da emissão de metano (um dos gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa, além dos limites considerados normais) proveniente da decomposição da vegetação das terras inundadas. É importante salientar que, além dos impactos ambientais, as barragens são responsáveis por incontáveis injustiças sociais. Milhões de pessoas, na maioria pobres e povos originários, têm sido obrigadas a abandonar suas terras.

No presente capítulo não estamos falando de grandes barragens, já que a Usina de Bata-lha é uma pequena barragem, mas é importante “desmistificar” a ideia de, que por ser renovável, a energia hidrelétrica é limpa.

3 A matriz energética, a complexidade ambiental e a engenharia

A humanidade precisa assumir uma posição coerente diante da complexidade de sua relação com a natureza. Nessa perspectiva, todos devem ser levados a responder ao desafio socioambiental, ampliando o estímulo do potencial criativo de modo a favorecer o surgimento de novas ideias a ponto de se colocar em prática novas condutas. Há o discernimento de que a missão para reverter o quadro de destruição provocado por gerações contra a natureza é imprescindível, e a mudança desse paradigma demanda uma interlocução imediata entre as diferentes áreas do saber, em busca de novos instrumentos teóricos e metodológicos.

Boa parte da energia consumida no Brasil é dita renovável. Defende-se a ideia de que os recursos naturais necessários para a produção dessa energia “limpa” são capazes de se refazer em um curto período de tempo, porém a implantação de usinas hidrelétricas pode promover grandes impactos irreversíveis no ambiente, tanto natural quanto social, alcançando magnitudes capazes de descaracterizar essa produção como energia limpa, tornando o termo inadequado. Os possíveis impactos no âmbito social não são menos importantes que as perturbações definitivas em cursos d'água, nas características atmosféricas e nos solos, já apontadas neste texto. Por isso, não basta a adoção de medidas mitigadoras da marginalização do indivíduo nativo provocada pelos alagamentos de lares, pelas perdas de áreas produtivas e de lugares considerados sagrados por comunidades tradicionais e indígenas. Tais situações podem, sim, ser minimizadas com o investimento de recursos por parte das empresas construtoras,

porém há de se admitir que tal atitude já não se mostra suficiente para uma cultura ambiental holística, que envolve uma gestão com racionalidade tecnológica e responsabilidade social.

Em se tratando da matriz energética brasileira, um dos desafios atuais é a conservação de uma matriz limpa, com a associação de novas fontes energéticas renováveis. Também é preciso que o país supere as soluções amparadas em ganhos políticos imediatos, com patamares de preços e competitividades artificiais que, pela fragilidade, em nada contribuem com a sustentabilidade do processo de desenvolvimento de longo prazo, principalmente quando se considera a dimensão internacional, reconhecendo sua influência nas relações econômicas e políticas e suas implicações para o setor energético nacional.

A necessidade de entender o meio ambiente como um sistema complexo contradiz o positivismo lógico na busca de unidade entre as áreas de conhecimento e na tentativa de uniformidade do saber. Morin (1996) traz a complexidade para a questão ambiental, considerando uma perspectiva epistemológica condutora da compreensão a respeito das possibilidades de avanço nessa temática. Para o enfrentamento do desafio ambiental é necessária a desconstrução de paradigmas dominantes, de modo a valorizar o diálogo entre os diversos conhecimentos que permitam analisar a dinâmica dos sistemas ambientais de forma complexa.

A complexidade ainda é uma abordagem marginal no pensamento científico, epistemológico e filosófico. No entanto, do ponto de vista epistemológico, o pensamento complexo constitui uma exceção adotada inicialmente por Gaston Bachelard², pelo fato de este admitir que não há nada simples na natureza, somente o simplificado. Dentro da questão ambiental a complexidade não é citada como receita ou como resposta, mas sim como um desafio e uma motivação para reflexão. Colocada entre a Engenharia e o meio ambiente, a complexidade retrata a incompletude do conhecimento e se mostra capaz de articular e fazer bom uso das diferenças entre os aspectos técnicos, humanos e socioambientais, evitando o pensamento simplificante ou sua redução mutilante.

Dentro da formação acadêmica de um profissional da Engenharia há uma tendência a uma concepção fragmentada, com a aprendizagem dividida em disciplinas de conteúdos amplamente explorados e aprofundados tecnicamente, porém sem concatenar os saberes adquiridos de uma maneira reflexiva, que permita a extrapolação da atuação exclusivamente técnica e favoreça a compreensão da complexidade ambiental.

Se a simplicidade não funciona mais, sendo incapaz de responder às questões colocadas, então é indispensável passar para a outra racionalidade. Desse modo, se as disciplinas técnicas isoladamente não estão sendo suficientes para resolver de maneira eficaz os desafios ambientais que têm surgido ultimamente, é inevitável recorrer ao diálogo entre elas, à interdisciplinaridade, de onde emergirão conhecimentos mais elaborados.

O avanço para uma Engenharia menos insustentável requer uma mudança na orientação, não na forma de reducionismo e especialização intelectual, mas no surgimento de abordagens integradoras com a ciência, a educação e a tecnologia, de forma a se construir uma consciência moral que se estenda além dos limites habituais da ética e da boa conduta profissional, com adoção de abordagens preventivas e adaptáveis para consequências, ainda

2 A obra bachelardiana encontra-se no contexto da revolução científica promovida no início do século XX pela Teoria da Relatividade, formulada por Albert Einstein. Todo seu trabalho acadêmico objetivou o estudo do significado epistemológico dessa ciência então nascente, procurando dar a esta uma filosofia compatível com a sua inovação. Bachelard formula proposições para a filosofia das ciências, sendo elas: a historicidade da epistemologia e a relatividade do objeto.

que não intencionais, decorrentes das alterações advindas dos empreendimentos e até mesmo das inovações tecnológicas, o que resultará em sistemas amparados em projetos que integrem a natureza e as organizações humanas, com o benefício de uma maior resiliência ambiental.

4 A educação ambiental na perspectiva da participação social

Reigota (2009) define meio ambiente como

um lugar determinado e/ou percebido onde estão em relação dinâmica e em constante interação os aspectos naturais e sociais. Essas relações acarretam processos de criação cultural e tecnológica e processos históricos e políticos de transformação da natureza e da sociedade. (REIGOTA, 2009, p. 36)

Portanto, o conceito de meio ambiente pode ser influenciado por características pessoais e pelo contexto social, sendo essas influências essenciais para o êxito de programas de educação, conservação e recuperação ambiental. Inseridos em um mundo complexo que envolve questões de ordem política, econômica, ambiental, social e cultural, os desafios ambientais que se impõem à sociedade moderna requerem novas ideias sobre desenvolvimento, que considerem as relações conflituosas existentes entre sociedade e ambiente, que deve ser entendido como um lugar onde os aspectos naturais e sociais estão em constante interação. A Educação Ambiental vem contribuir nessa percepção mais ampla com seu cunho político estabelecido na identidade do elemento participativo, reflexivo e com autonomia para intervenção direta, em busca de soluções que garantam uma vida digna a todos os cidadãos com a superação dos mecanismos de controle e dominação. Nos objetivos traçados para a Educação Ambiental na Carta de Belgrado (1975), é muito valorizada a capacidade do homem de identificar e adquirir novos conhecimentos, valores e comportamentos e aplicá-los a situações relacionadas ao meio ambiente global. Também é reconhecida a competência dos indivíduos e grupos em avaliar, participar e perceber suas responsabilidades, direitos e deveres para a solução de problemas ambientais.

Um dos desafios da Educação Ambiental tem sido desconstruir o conceito de natureza como algo natural, harmônico e perfeito. Ao explicitar as múltiplas determinações e contextualizações que ao longo da história corroboraram para a separação entre ser humano e natureza verifica-se, como já analisado neste texto, que o homem se tornou o sujeito que conhece e domina a natureza, numa relação de exterioridade, enquanto a segunda é resumida ao objeto conhecido, a ser contido, e visto apenas como recurso imprescindível ao atendimento das necessidades humanas. Essa conduta de domínio tem se acentuado com as relações econômicas e racionais e se avulta com o modo de produção capitalista, a divisão do trabalho e a propriedade privada.

A tentativa de superação do entendimento de natureza como simples condição de recursos para a produção tem sido estimulada pela ecologia política formulada por Loureiro (2012), que define a natureza como aquilo que nos antecede e que de nós independe, cuja dinâmica ecológica pode sofrer interferências e até ser transformada, mas que, acima de tudo, precisa ser conhecida e respeitada de modo que sua exploração e uso sejam realizados de maneira compatível à sua capacidade de suporte e de regeneração.

Na separação entre ser humano e natureza é desconsiderada a realidade de uma sociedade conflituosa e contraditória. Surge a ilusão de uma possível relação harmônica entre eles, trazendo como consequência para a problemática ambiental uma visão simplificada de meio ambiente, reduzindo-o a uma concepção naturalista e recursista. Nesse sentido, o que se defende é uma Educação Ambiental renovada e crítica que insere o ambiente humano em suas considerações, promovendo uma maior articulação entre o mundo natural e o mundo social, com capacidade de transcender o caráter predominantemente conservador, ainda pautado numa prática que aborda basicamente as ciências naturais reduzidas aos sistemas biológicos e ecológicos como conteúdo.

Ao retomar os fundamentos tratados para o processo da Educação Ambiental em Tbilisi³, é preciso construir outros valores e garantir a aquisição de conhecimentos, atitudes e habilidades voltados para a participação responsável na gestão ambiental. Indicar os caminhos para se conquistar o protagonismo da situação com autoridade para assumir o papel de cidadão ativo. É necessário ter compromisso com a formação da cultura democrática, pois a cidadania está baseada na consciência do cidadão como pertencente a uma coletividade, e deve-se assegurar a anteposição disso a qualquer interesse individual que porventura exista.

5 Impactos socioambientais advindos da implantação e operação de reservatórios de usinas hidrelétricas no Brasil

A geração de energia elétrica, no Brasil, está pautada na potencialidade dos rios e nos projetos hidrelétricos que assumiram, ao longo da história, especial importância, na medida em que representam a base do suprimento energético brasileiro (MÜLLER, 1995). Esse potencial, por sua vez, gera investimentos, empregos, empreendimentos e crescimento econômico. No entanto, a implantação de projetos hidrelétricos e, conseqüentemente, suas barragens e lagos causam os já mencionados impactos socioambientais. As populações circunvizinhas podem ser atingidas direta e concretamente através do alagamento de suas propriedades, casas, áreas produtivas e até cidades. Existem também os impactos indiretos, como perdas de laços comunitários, separação de comunidades e famílias e destruição de patrimônios sociais e culturais, entre outros. No aspecto ambiental, o alagamento de importantes áreas florestais e o desaparecimento do *habitat* dos animais compreendem impactos negativos relevantes. Muitas vezes a hidrelétrica é construída em áreas onde se concentram os últimos remanescentes florestais da região, desmatando e inundando espécies ameaçadas de extinção.

A previsão dos efeitos relacionados à degradação, à poluição e às questões ambientais, advindas desse tipo de empreendimento, é obrigatoriamente abordada nos estudos de impacto ambiental e em seus respectivos relatórios exigidos pela legislação brasileira vigente. Entretanto, o processo de elaboração de tais estudos ainda não é suficiente para alcançar

3 A Conferência Intergovernamental de Tbilisi foi organizada a partir de uma parceria entre a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) e o Programa de Meio Ambiente das Organizações das Nações Unidas (Pnuma/ONU). Ocorreu em 1977 na antiga União Soviética, e é considerada um dos principais eventos sobre educação ambiental em que se estabeleceram as definições, os objetivos, os princípios e as estratégias para a Educação Ambiental.

a dimensão socioambiental (REZENDE, 2003). Entre as funções desses documentos há a predominância quase exclusiva do planejamento e recomendação de medidas mitigadoras, envolvendo essencialmente os aspectos técnicos, quantitativos e legais. Em busca de uma valorização dos aspectos sociais dever-se-ão conhecer as realidades locais, mediante a investigação sobre as visões de mundo, valores e princípios que as organizam, contribuindo para uma escolha efetiva de alternativas e tomadas de decisão. A ampliação da participação social, desde a realização dos estudos técnicos iniciais até a fase de avaliação, implantação e operação do empreendimento, torna-se determinante para garantir direitos socioambientais e culturais.

Como conseqüências dessa deficiência nas exigências legais para a implantação e operação de reservatórios de usinas hidrelétricas, Rezende (2003) cita as muitas histórias e memórias que ficam debaixo d'água. São diversas as propriedades com valores sentimentais, amizades e culturas sociais que são desfeitas e destruídas ao longo desse processo.

Os reservatórios de usinas hidrelétricas podem ocasionar grandes extensões de áreas alagadas, o que leva a refletir sobre relações entre área inundada e potência instalada, uma vez que, quanto maior a área submersa, maiores são os impactos causados à região receptora, cuja complexidade é estabelecida em virtude da grande amplitude das obras, ultrapassando, muitas vezes, os limites da área de implantação.

Para um entendimento mais amplo dos impactos socioambientais decorrentes da implantação e operação de reservatórios, alguns pontos essenciais são ressaltados por Fernandes e Bursztyn (2008) como modificações nos aspectos sociais: redução da qualidade de vida da população ribeirinha; valor da indenização paga aos trabalhadores rurais residentes na área alagada geralmente inferior ao preço real; deslocamento compulsório da população para terras menos produtivas; empobrecimento e êxodo rural; aumento de agentes transmissores de doenças, reduzindo a saúde da população; alterações na rede urbana; modificações nas infraestruturas de circulação local e regional; perda total ou parcial de patrimônios históricos, culturais e arqueológicos; modificação na capacidade produtiva de grupos sociais, podendo causar diminuição de renda e aumento de desemprego; sobrecarga nos serviços de saúde; não adaptação de populações removidas para novos locais de moradia; dentre outros.

Entretanto, pode-se apontar não apenas impactos negativos decorrentes da implantação e operação de reservatórios – existem alguns pontos positivos que merecem ser destacados: há uma maior geração de empregos e conseqüente renda para a população local e regional; possibilidade do uso do reservatório para fins de abastecimento urbano, atenuação de cheias, navegação e lazer; – viabilidade de atividades econômicas como aquicultura, produção de fertilizantes e exploração turística da região, com melhoria da infraestrutura e economia local/regional.

As fontes energéticas estão em constante sucessão, mas nenhuma delas substituiu integralmente a outra. Todas têm tido sua parcela de mercado, com maior ou menor participação em função de suas disponibilidades, preços, políticas governamentais e leis ambientais. Embora o crescimento energético e econômico seja preponderante, o uso eficiente da energia torna possível o aumento das taxas de crescimento. Nessa perspectiva, observa-se que a energia elétrica é fator fundamental para o funcionamento da sociedade, pois é essencial para a população de modo geral – consumidores residenciais – e para as empresas dos setores de atividade econômica.

Todavia, esse debate a respeito da relação entre a geração de energia elétrica e a busca por processos com menor potencial de degradação consiste em um dos maiores problemas enfrentados pelos profissionais/gestores da área de Engenharia. O setor elétrico brasileiro é desenvolvido a partir de políticas públicas que pretendem demonstrar que os investimentos em geração de energia elétrica contribuem diretamente para o crescimento econômico e a melhoria da qualidade de vida da população. O processo de desenvolvimento, por seu turno, está diretamente vinculado à evolução do setor elétrico, na medida em que a eletricidade é o insumo básico para o melhoramento de outros fatores essenciais, como saúde, educação, alimentação, água e saneamento (BORGES, 2009). Entretanto, a política energética sustentada pelo governo federal nem sempre apresenta uma relação direta entre a expansão da geração de eletricidade e a melhoria do perfil socioeconômico da população. É nesse sentido que a instalação de hidrelétricas não deve ser pautada com base em uma restrição absoluta. As restrições ambientais e socioeconômicas devem ser consideradas para que possam ser conduzidas de forma socialmente mais justa e ambientalmente sustentável (BERMANN, 2007). Há ainda a necessidade da elaboração de políticas regionais integradas para a aplicação e gestão adequadas dos meios que favoreçam o desenvolvimento da economia local.

Convém aqui uma breve reflexão a respeito da relação entre crescimento econômico e desenvolvimento. Embora utilizados comumente como sinônimos, a história oferece provas concretas de que o crescimento econômico, embora necessário, não é condição suficiente para o desenvolvimento. Taxas de crescimento altas, como as da época do governo militar, levaram a verdadeiros retrocessos sociais e ambientais; Cubatão é um exemplo emblemático. Entendemos que, se o crescimento não for acompanhado de progressos simultâneos nas esferas social, ambiental e econômico, não se trata de desenvolvimento.

6 Uma experiência de educação ambiental como meio de compreensão dos impactos ocasionados na implantação da UHE de Batalha

A experiência aqui relatada é proveniente do projeto intitulado “**Monitoramento e estudo de técnicas alternativas na estabilização de processos erosivos em reservatórios de usinas hidrelétricas – UHE**”, realizado pela parceria entre Furnas e a Universidade Federal de Goiás (UFG). Com base nos princípios gerais da Educação Ambiental, a pesquisa teve o intuito de compreender os impactos socioambientais ocasionados na implantação de reservatórios de uma Usina Hidrelétrica (UHE). Para tanto, foi proposto como objetivo o delineamento de ações no âmbito social por meio de iniciativas direcionadas à comunidade dos municípios atingidos pela construção da UHE de Batalha, contribuindo com informações acerca dos temas relacionados ao meio ambiente, bem como seus impactos e consequências.

O estudo ocorreu em dois assentamentos existentes na Área de Influência Direta (AID) da Usina Hidrelétrica (UHE) de Batalha, sendo estes o Jambeiro e São Cristóvão, ambos localizados no município de Paracatu (MG).

No assentamento Jambeiro há um total de 195 famílias, seis áreas de Reserva Legal e quatro áreas comunitárias, onde está localizada a Escola Municipal Pedro Silva Neiva de ensino fundamental e a associação de moradores formalizada. Nesse assentamento, do total

de famílias atingidas pela implantação da UHE, catorze tiveram de deixar seus lotes e serem transferidas para outro assentamento, o São Cristóvão.

O assentamento São Cristóvão foi criado pela Superintendência Regional do Instituto Nacional de Colonização de Reforma Agrária de Minas Gerais (Incra/MG), na área da Fazenda São Cristóvão, em Paracatu, MG. O imóvel foi adquirido em 2010 pela empresa Furnas Centrais Elétricas e doado ao Incra. O assentamento se destinou a receber parte das famílias que tiveram seus lotes parcial ou totalmente atingidos por ocasião da implantação da UHE de Batalha.

O trabalho de Educação Ambiental junto à comunidade dos assentamentos de Jambeiro e São Cristóvão foi desenvolvido em várias etapas e com diferentes propósitos. Um dos objetivos centrais foi a abordagem da problemática ambiental que emerge da própria descrição do *locus* da pesquisa. As atividades desenvolvidas foram:

- Diagnóstico da Área de Influência Direta (AID) da UHE de Batalha: nessa etapa foram contatadas as Secretarias de Educação e Meio Ambiente de Paracatu, a Faculdade do Noroeste de Minas (Finom) e a Escola Municipal Pedro Silva Neiva no assentamento Jambeiro, além da realização de visitas aos assentamentos envolvidos na pesquisa para se conhecer a realidade local, bem como diagnosticar o perfil e os meios de contato com a comunidade;
- Oficina de Educação Ambiental com os alunos da Escola Municipal Pedro Silva Neiva – assentamento Jambeiro: a oficina teve como objetivo abordar conceitos, práticas e diagnóstico da visão ambiental dos alunos dessa instituição de ensino. Para tal atividade, os alunos foram divididos em três grupos definidos por faixas etárias (4, 5 e 6 anos; 7 a 10 anos; acima de 11 anos), totalizando 166 alunos. Tal divisão foi necessária para a adequação das atividades às idades/perfis das crianças. Durante a Oficina houve três dinâmicas que ocorreram simultaneamente e, em cada uma delas, os grupos participaram de forma alternada. As dinâmicas foram: contação de histórias; cinema com vídeos temáticos de Educação Ambiental; e momentos de recreação.
- Entrevistas semiestruturadas com moradores da AID da UHE de Batalha – assentamentos Jambeiro e São Cristóvão: ao todo foram entrevistadas dezoito pessoas, representantes de famílias distintas de moradores dos assentamentos de Jambeiro e São Cristóvão. As entrevistas, de caráter qualitativo, foram semiestruturadas (FLICK, 2009) e tiveram o intuito de identificar a compreensão de cada entrevistado quanto ao processo de implantação da UHE de Batalha e as consequências para suas vidas e o meio ambiente.
- Curso de Extensão realizado na Finom em Paracatu: o curso foi oferecido a um grupo de quarenta pessoas, composto por trinta estudantes da Finom; sete servidores, membros das Secretarias de Educação e Meio Ambiente das Prefeituras de Paracatu e Cristalina, professoras da Escola Municipal Pedro Neiva; e três representantes do corpo técnico de Furnas, lotados na Usina de Batalha. O curso teve o objetivo de trabalhar as questões de Educação Ambiental, do ponto de vista dos seus conceitos fundamentais, assim como metodológicos, na perspectiva de contribuir para a formação de educadores ambientais, futuros elaboradores e executores de projetos ambientais.

A realização das entrevistas semiestruturadas teve especial importância no projeto, uma vez que estas foram as principais fontes de identificação da percepção dos impactos socio-

ambientais ocasionados na implantação de reservatórios de UHE por parte da comunidade envolvida no processo. O roteiro das entrevistas, aprovado previamente pelo Comitê de Ética da Universidade Federal de Goiás, foi elaborado com o intuito de abordar, junto aos entrevistados, os principais assuntos relacionados à implantação da UHE.

Para a análise dos dados coletados por meio das entrevistas, foi aplicada a técnica de análise de conteúdo temático-categorial de Bardin (2011) como ferramenta para a compreensão de significados que os atores sociais exteriorizaram durante a entrevista, de modo a atingir níveis de compreensão mais aprofundados do fenômeno. De acordo com essa proposta, a preparação do material para análise iniciou com a transcrição integral das entrevistas, realização de leituras flutuantes, com objetivo exploratório. Em seguida foi efetuada a operação de pré-análise com o alinhamento dos enunciados intactos, de maneira a permitir uma classificação por equivalência.

Como ferramenta de auxílio à análise de dados foi utilizado o software WebQDA (*Web Qualitative Data Analysis*), por favorecer a organização dos dados, colaborando com sua estruturação e simplificando o processo de categorização, potencializando a síntese dos resultados e trazendo a transparência e o rigor técnico necessário a toda pesquisa científica.

Foram identificadas quatro categorias que sintetizam as opiniões e os comportamentos dos moradores diante da realidade após a implantação da UHE Batalha, sendo elas:

- Categoria 1 – Conceção ambiental: relaciona-se à forma com que os indivíduos entrevistados percebem a temática de meio ambiente e natureza, e as possíveis intervenções de ambos em suas vidas cotidianas. Ao analisar as assertivas dos entrevistados buscou-se identificar trechos que representassem os principais conceitos de meio ambiente, revelando a existência ou não do sentimento de pertencimento a ele (SAUVÉ, 1997).
- Categoria 2 – Responsabilidade perante o meio ambiente: configurada a partir dos pontos de vista dos entrevistados no que tange às ações de cuidado, preservação e conservação do meio ambiente, bem como a identificação das atribuições de dever e obrigação individual ou coletiva em assumir tais responsabilidades perante os impactos ambientais. Convém destacar que os termos preservação e conservação, embora tenham significados diferentes, foram utilizados indistintamente pelos entrevistados, mas como o foco da investigação não estava em identificar essas diferenças conceituais, foram considerados em conjunto.
- Categoria 3 – A implantação da UHE de Batalha e suas implicações ambientais: identifica as principais modificações causadas pela implantação da UHE na vida cotidiana dos moradores, bem como indica na fala dos entrevistados o apontamento de impactos ambientais que foram oriundos do empreendimento ou provenientes de costumes locais.
- Categoria 4 – A interpretação da população local das ações promovidas pela empresa Furnas vinculadas à UHE de Batalha: identifica as opiniões da população local em relação às ações promovidas pela empresa Furnas, durante todo o processo de implantação da UHE.

A experiência de Educação Ambiental como meio de compreensão dos impactos ocasionados na implantação da UHE de Batalha pretendia ponderar sobre o conhecimento, os acordos e desacordos sobre o assunto e identificar possibilidades de intervenção e reconhecimentos de responsabilidades individuais e coletivas frente aos impactos ambientais.

Com a realização de atividades *in loco* foram proporcionados momentos de estimulação da percepção ambiental aos alunos da escola municipal Pedro Silva Neiva. Na oportunidade, buscou-se compreender como as crianças apreendiam as mudanças ocasionadas pela implantação da UHE de Batalha, identificando que grande parte delas não teve clara compreensão das alterações ambientais, apegando-se apenas às mudanças sociais ocorridas em sua comunidade. Durante a Oficina de Educação Ambiental, houve a distribuição de Cartilhas sobre os Processos Erosivos (CAMAPUM DE CARVALHO; DINIZ, 2014; CAMAPUM DE CARVALHO; LÉLIS, 2014), que não alcançou, por parte dos alunos da escola, o aproveitamento inicialmente proposto pelos organizadores da referida Oficina, uma vez que grande parte das crianças, em especial aquelas com idade superior a 10 anos, descartou suas cartilhas sem nem mesmo ler o conteúdo. Apenas o grupo com menor idade aproveitou a característica lúdica do material (de colorir) para brincar, mas pouco relacionou o conteúdo ambiental da Cartilha à sua realidade socioambiental.

Pelo fato de não ter havido uma boa compreensão da cartilha, nem mesmo a valorização de que se tinha expectativa, sugere-se para atividades semelhantes e projetos com o mesmo tema que haja uma maior dedicação a essa tipologia de material, com momentos específicos e aulas temáticas sobre os assuntos tratados por ele em ocasiões que antecederem a sua entrega ao público-alvo.

Outra atividade desenvolvida durante a Oficina de EA com as crianças foi a contação de histórias realizada pelo grupo NarraAtividade, que abordou de forma lúdica as alterações ambientais, com a intenção de provocar uma discussão a respeito das necessidades energéticas e as consequências advindas da implantação de uma UHE. Porém, o momento de contação de uma história com viés ambiental não foi suficiente para levar o público às reflexões inicialmente esperadas. O não alcance dessa expectativa pode ser justificado pelo fato de a história escolhida apresentar curta duração e não ter sido devidamente adaptada (pelo grupo artístico contratado) de modo a atender os objetivos específicos da equipe pesquisadora, permanecendo apenas o caráter lúdico do momento. Em oportunidades futuras, esse momento deve ser mais valorizado dentro da dinâmica geral, favorecendo uma discussão mais ampla com as crianças e, assim, usufruir reflexivamente da história/peça artística para que a equipe pesquisadora possa atingir o objetivo de despertar a percepção ambiental nas crianças da comunidade.

Quanto ao Curso de Extensão realizado na Finom, este foi de grande interação entre a nossa equipe e os participantes. Proporcionou resultados satisfatórios, uma vez que houve grande interesse pelo conteúdo apresentado. Constituiu uma atividade cuja replicação se recomenda em outras comunidades que também estejam localizadas em áreas de influência direta da implantação de usinas hidrelétricas. Envolver faculdades/universidades próximas a essas áreas pode contribuir para o redimensionamento dos objetivos de ensino/pesquisa/extensão dessas instituições no sentido da resolução de problemas locais. Por outro lado, ressaltamos a necessidade de medidas que favoreçam maior divulgação e garantia de maior participação de professores das escolas da região e da própria empresa envolvida no processo, que constituem agentes interlocutores diretos com a comunidade envolvida/atingida pelo empreendimento.

Nas entrevistas, os moradores da AID da UHE de Batalha foram indagados sobre: a história da implantação da UHE de Batalha; a compreensão de meio ambiente; as alterações

ocasionadas pela implantação em suas vidas cotidianas, suas famílias e comunidade; a alteração ao meio ambiente do local em que vivem; a existência de problemas ambientais na região da AID da UHE de Batalha; a relação de tais problemas com a implantação da usina ou com outras atividades locais; e a compreensão das ações promovidas pela empresa Furnas.

Como esperado, os entrevistados descreveram histórias distintas, alguns acompanharam a implantação da usina e outros não, e isso intervém na forma como estes percebem as mudanças ocasionadas por ela. O fato de que todos, originalmente, foram contemplados por ações de Reforma Agrária e receberam suas terras por meio do Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST) também influenciou a opinião de cada um sobre a implantação da UHE de Batalha, assim como a compreensão sobre a temática ambiental. Durante as entrevistas é explicitado que o meio ambiente é um recurso, um meio e um lugar para se viver onde o ser humano, também, o compõe.

Pelo pouco conhecimento e pelas condições sociais em que vivem, em geral, os entrevistados demonstraram não identificar os problemas ambientais na região da AID da UHE de Batalha, em especial quanto aos processos erosivos. Os problemas ambientais identificados por eles foram poucos e simplificados. Distinguem que os problemas ambientais existentes foram provenientes da instalação da usina e/ou derivados de suas ações cotidianas. Com uma visão ingênua, trazem para si e para a comunidade local a responsabilidade de resolver, compensar ou corrigir grande parte desses problemas, sem reconhecer que muitos deles dependem de outras esferas sociais e governamentais para sua efetiva resolução.

Em relação à apreensão das ações promovidas pela empresa durante a implantação da UHE, esta configura-se de forma diferente de acordo com o grupo de moradores e se este foi ou não removido para outro assentamento. Sumariamente, existem dois grandes grupos, um que permaneceu no Jambeiro, após a implantação da usina, e outro que foi remanejado para o São Cristóvão. Esses grupos, por falta de comunicação e clareza quanto às ações da empresa para com cada um deles, observam de forma positiva a posição do outro grupo e de forma negativa a sua própria condição. Por não conhecerem, de fato, a realidade uns dos outros, alguns desses moradores se sentem injustiçados ou desvalorizados perante os outros.

De forma generalizada, as queixas apresentadas pelos entrevistados referiram-se aos seus prejuízos financeiros (por exemplo, perda de animais e plantações), culturais e sociais (como o afastamento da convivência familiar e de amigos e a perda de patrimônio histórico). Os elogios são direcionados aos benefícios recebidos, tais como a construção de casas novas e as assistências da equipe técnica da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais (Emater-MG) cuja finalidade é prestar assessoria, bem como ministrar cursos em horticultura, apicultura e demais demandas agrícolas da comunidade. Compreendem a implantação da usina como uma necessidade maior do país pela demanda de energia e identificam pontos positivos e negativos desse empreendimento. Os problemas ambientais existentes na região são colocados como fatos a serem trabalhados individualmente, que se abordados conjuntamente gerariam uma comunidade ecologicamente sustentável, não conseguindo compreender que as questões ambientais e sociais estão inseridas em uma trama social mais complexa que a das realidades locais.

Como sugestões para projetos semelhantes, aponta-se que os materiais didáticos sejam apresentados e discutidos nas escolas e/ou instituições de ensino locais e regionais, porém inseridos em momentos de ensino sobre o tema, para que assim as crianças ou o público-alvo,

com maior conhecimento, possam apreender melhor o conteúdo do material na perspectiva de uma reflexão mais crítica da problemática ambiental; a comunicação entre empresa e a comunidade local, em especial com aqueles que tiveram de ser removidos para outros assentamentos, seja melhorada e constante, a fim de se evitar expectativas falsas ou informações distorcidas entre as comunidades; e que sejam permanentes as ações de provimento de conhecimento sobre o meio ambiente e sobre os impactos que nele incidem de maneira que a comunidade possa efetivamente participar de uma Educação Ambiental transformadora.

7 Considerações finais

A relação entre a espécie humana e a natureza não foi, nem nunca será, harmônica. A tensão dialética entre ambas está presente desde os primórdios da civilização. Chegamos ao século XXI inseridos numa crise ambiental sem precedentes, desencadeada justamente pelo êxito das sociedades industriais em multiplicar constantemente sua capacidade produtiva. Entendemos que a crise ambiental é uma crise civilizatória. É uma crise do modelo das relações sociais estabelecidas, é uma crise que coloca em xeque as relações materiais e energéticas que estabelecemos com a natureza, que coloca em questão a viabilidade de uma existência alienada, destrutiva e acumuladora de riquezas. E isso já tinha sido anunciado no contexto europeu de crise do estado de bem-estar social e das lutas sociais da segunda metade do século XX. Afirmava-se então que:

...só se pode produzir e oferecer certas mercadorias consideradas essenciais para o conforto moderno a partir da reprodução de relações sociais desiguais. Só se pode considerar como legítimos certos estilos de vida quando se ignora a indigência de milhões. [...] só é possível sustentar certo padrão de vida para alguns em detrimento do péssimo padrão de vida para outros e com base no uso abusivo da natureza [...]. Em resumo, a constatação era a de que no marco da sociedade capitalista urbano-industrial, a sustentabilidade da riqueza traz o seu reverso: a sustentabilidade da pobreza. (LOUREIRO, 2012, p. 19-20)

Mais de quarenta anos se passaram desses pronunciamentos, e as desigualdades permanecem. Nesse marco civilizatório, dizer que “cada um tem de fazer sua parte”, como alguns dos entrevistados em nossa investigação afirmaram, é no mínimo ingênuo, porque as partes são muito diferentes! “Naturalizar” o discurso de que a humanidade degrada significa contribuir para uma leitura superficial da crise sem buscar as causas de fundo. E não há soluções para a crise ambiental que satisfaçam a todos os interesses por igual. O problema da fome no mundo não é um problema técnico, já que nunca a capacidade de produzir alimentos foi tão grande, mas um problema do modo de produção e distribuição.

Afirmamos, no começo deste capítulo, que vivemos no Antropoceno, época em que a ação do homem molda o sistema Terra de modo mais decisivo que as forças não antrópicas, mas é inaceitável atribuir à espécie, de forma homogênea, a responsabilidade pelos problemas ambientais: as pessoas degradam inseridas em determinadas relações sociais, em tempos e espaços concretos. Permanecer em afirmações gerais que pretendem explicar tudo conduz a não explicar nada, a discursos vazios.

Entendemos que o discurso e a prática da Educação Ambiental têm sofrido esvaziamento constante nos últimos anos. Embora conste como objetivo de diretrizes educacionais em todos os níveis e seja tema obrigatório de projetos econômicos e sociais, o conceito implícito é reducionista. Nas escolas se reduz a temas pontuais como lixo, horta, reciclagem, nas discussões ambientais mais amplas transfere-se à mudança do comportamento individual a resolução de graves problemas ambientais. Em todos os casos o problema está em permanecer na superficialidade dos problemas.

Neste capítulo tentamos abordar um problema específico dentro da ampla problemática ambiental: a relação entre as demandas energéticas e a capacidade de o sistema Terra suportar essas demandas. Como entender, nesse contexto, a Educação Ambiental? A investigação aqui apresentada e outras das quais participamos nos conduzem à convicção de que falta à Educação Ambiental um esforço teórico de compreensão dos problemas que se propõe abordar. Como Silva (2014, p. 22) entendemos que teorizar a Educação Ambiental é explicitarmos a sua não neutralidade e as suas controvérsias, portanto, é entendê-la não como consensual, porque não são consensuais os problemas que ela discute. Não são consensuais as ideias dos moradores dos assentamentos de Jambeiro e São Cristóvão, não são consensuais as visões de técnicos e de assentados, não são consensuais, na literatura, os argumentos sobre as demandas energéticas. Desse modo é preciso entender a Educação Ambiental como social e culturalmente mediada e mediadora. Sobretudo, ao entendermos suas controvérsias, faz-se necessário acrescentar outra terminologia: a crítica. Como já afirmamos neste texto, entendemos a Educação Ambiental como um projeto de participação social na perspectiva da transformação social.

Referências

- BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. Edições 70. São Paulo, 2011.
- BERMANN, Célio. Impasses and controversies of hydroelectricity. *Estudos Avançados*, v. 21, n. 59, p. 139-153, 2007.
- BORGES, F. Q. Indicadores de sustentabilidade para a energia elétrica no estado do Pará. *Revista Brasileira de Energia*, v. 15, p. 119-150, 2009.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; DINIZ, N. C. *Cartilha de erosão*. [S.l.]: Finatec, 2014.
- _____; LÉLIS, A. C. *Cartilha meio ambiente: erosão*. [S.l.]: Finatec, 2014.
- DECLARAÇÃO de Estocolmo sobre o meio ambiente humano (1972). *Coletânea de Direito Internacional, Constituição Federal*, v. 10, p. 1.133-1.137, 2015.
- FERNANDES, C. T. C; BURSZTYN, M. A. A. Usos múltiplos das águas de reservatórios de grandes hidrelétricas: perspectivas e contradições ao desenvolvimento regional sustentável. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, 4., 2008, Brasília, DF. *Anais...* Brasília, DF: ANPPAS, 2008.

FLICK, U. *Introdução à pesquisa qualitativa*. [S.l.]: Artmed/Bookman, 2009.

GONÇALVES, C. W. P. *Os (des)caminhos do meio ambiente*. São Paulo: Contexto, 2004.

HOBSBAWM, E. *Era dos extremos*. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.

LOUREIRO, C. F. B. *Sustentabilidade e educação: um olhar da ecologia política*. São Paulo: Cortez, 2012.

MARQUES, L. *Capitalismo e colapso ambiental*. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2015.

MEADOWS, D.; RANDERS, J.; MEADOWS, D. *Limites do crescimento: a atualização de 30 anos*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.

MORIN, E. A noção de sujeito. In: SCHNITMAN, Dora Fried (Org.). *Novos paradigmas, cultura e subjetividade*. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

MÜLLER, A. C. *Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento*. São Paulo: Makron Books, 1995.

NILSSON, C.; REIDY, C. A.; DYNISIUS, M.; REVENGA, C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, v. 308, n. 5.720, p. 405-408, 2005.

REIGOTA, M. *O que é Educação Ambiental*. 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 2009.

REZENDE, L. P. *Dano moral e licenciamento ambiental de barragens hidrelétricas*. Curitiba: Juruá, 2003. 138 p.

SAUVÉ, L. Educação Ambiental e desenvolvimento sustentável: uma análise complexa. *Revista de Educação Pública*, v. 10, jul./dez. 1997.

SILVA, L. F. da. *Educação Ambiental crítica: entre ecoar e recriar*. [S.l.]: Paco Editorial, 2014.

CAPÍTULO 3

Erosão em borda de reservatório: alguns aspectos psicossociais

Katerine da Cruz Leal Sonoda
Terezinha de Camargo Viana
José Camapum de Carvalho

Palavras-chave: Educação. Meio ambiente. Qualidade de vida. Sustentabilidade.

1 Introdução

O fenômeno analisado nesta coletânea refere-se às consequências oriundas da erosão em borda de reservatório (ou erosão de margem). Segundo especialistas (CAMAPUM DE CARVALHO e DINIZ, 2005), esse tipo de erosão pode ter origem natural ou antrópica, e é sobre esta última que se abordará neste texto. O objetivo do capítulo é apontar aspectos psicossociais referentes à participação da população em projetos de engenharia e na manutenção/conservação dessas obras.

Partiu-se de dois pressupostos principais. O primeiro aponta para profundas transformações sobre as concepções de ‘meio ambiente’ a partir da segunda metade do século XX. Já o segundo refere-se ao entendimento de que problemas ambientais costumam ter origem em ações humanas – inclusive na própria execução da obra – e podem ser evitados ou mitigados.

O capítulo será iniciado com uma breve contextualização sobre as etapas de construção de um reservatório e os possíveis impactos socioambientais decorrentes desse tipo de obra de engenharia. Ainda na etapa de concepção do projeto, entende-se que já deveriam estar contemplados recursos técnicos e materiais que permitissem a participação social no planejamento, execução e conservação das obras. A participação das pessoas beneficiadas pelos projetos ou que deles sofrerão impactos em suas qualidades de vida é uma importante ferramenta para a criação de vínculos e da sensação de pertencimento, além de possibilitar a responsabilização pelo meio ambiente e em relação ao empreendimento. Cabe esclarecer que, neste texto, o termo responsabilização será usado principalmente com foco no aspecto social, na inclusão, no pertencimento, mas, oportunamente, ele será esclarecido no âmbito do Direito Ambiental, distinguindo-se a responsabilidade subjetiva da objetiva.

Em seguida, serão desenvolvidos os dois pressupostos para, então, trazer alguns aspectos psicossociais relacionados aos comportamentos que deflagram ou pioram a erosão em borda de reservatório. Depois, será abordada a temática da educação como importante ferramenta de mudança social. Por fim, na última seção, serão destacadas questões relativas à qualidade de vida, ao lazer, ao turismo e à responsabilização subjetiva no cuidado com o ‘meio ambiente’.

Sendo a qualidade de vida um elemento de grande relevância, com possibilidade de impactar nas questões psicossociais, e ante a possibilidade de ser ela amplamente afetada para melhor ou para pior com a construção de um reservatório de água, cabe ainda destacar o inciso V do artigo 225 da Constituição Federal Brasileira de 1988, segundo o qual incumbe ao Poder Público:

V – controlar a produção, a comercialização e o emprego de técnicas, métodos e substâncias que comportem risco para a vida, a **qualidade de vida** e o meio ambiente; (Grifou-se)

2 Contextualização do Problema

A erosão é um processo que envolve desprendimento, transporte e sedimentação de partículas de solo ou rocha que ocasionam assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios. Destaca-se, no que tange aos aspectos socioambientais, que a erosão em meio rural contribui para o processo de desertificação e, em meio urbano, pode oferecer risco direto à população. Em ambos os casos, impactando não só o meio ambiente (aspectos naturais) como também a sociedade (aspectos psicossociais). Em termos macrossociais, as populações expostas às situações de perigo, como a mostrada na Figura 1, podem sofrer perdas materiais e danos psicológicos significativos. E, por outro lado, se expostas a um ambiente agradável, belo e seguro, serão envolvidas por uma sensação de bem-estar. No que se refere aos aspectos psicológicos, os impactos visuais e materiais também podem ser bastante relevantes.



Figura 1. Erosão em Planaltina de Goiás em 2011. (Fonte: arquivo pessoal José Camapum de Carvalho)

Habitantes de áreas urbanas com presença de erosão estão, em geral, constantemente em risco social, o qual impacta a saúde e a subjetividade. Não é incomum que tais populações também estejam expostas à violência em seus diversos tipos (de gênero, institucional, urbana – que está relacionada àquela provocada pelos traficantes de drogas locais e pela própria polícia – e outras). O medo e a sensação de insegurança são sentimentos presentes nesses

espaços. Esses aspectos “do social” interatuam com vulnerabilidades psicológicas e poderão resultar em mal-estar (ou sofrimento) psíquico, no desenvolvimento de sintomas ou mesmo de quadros psicológicos e/ou psiquiátricos completos (somatizações, depressões, síndromes fóbico-ansiosas, etc.), repercutindo diretamente na (falta de) saúde e na deterioração da qualidade de vida.

É importante destacar que o processo erosivo e sua evolução estão ligados ao uso e ocupação do solo, sendo, portanto, uma questão também de cunho social quanto à origem.

A Figura 2, obtida na margem do rio Araguaia, chama a atenção, em um primeiro momento, para as construções existentes em situação crítica. Quando as casas foram construídas, provavelmente a situação da margem não era a mesma. No entanto, o aumento do volume de água do rio, devido à impermeabilização do solo em áreas urbanas existentes nas bacias de contribuição, e práticas agrícolas alheias à questão da infiltração foram possivelmente os fatores causadores do problema. Situações semelhantes ocorrem em borda de reservatório. Em ambos os casos, fatores psicossociais estão articulados: por um lado, existem sujeitos diretamente afetados (por exemplo, aqueles cujas casas estão construídas próximas às áreas de encosta afetadas pela erosão) e outros indiretamente (todo o “tecido social” ou toda sociedade civil), já que uma conscientização/responsabilização/participação de toda a “sociedade” será imprescindível para mudanças de comportamento efetivas e duradouras.

Assim, fatores aparentemente “individuais” interatuarão com fatores considerados “do social”. Mas uma separação desse tipo será sempre arbitrária e artificial. Os enfoques sociais e psicológicos não são mutuamente excludentes porque enfrentam a irredutibilidade do social por um lado, e do psíquico, por outro. Nas palavras de Gaulejac (2001, p. 37):

O sujeito é produto de uma história complexa e diz respeito, ao mesmo tempo, à sua existência singular, portanto, ao seu desenvolvimento psíquico inscrito em uma dinâmica familiar, e à sua existência social, vista como a encarnação das relações sociais de uma época, de uma cultura, de uma classe social.

Existe uma complementaridade necessária e dinâmica entre o psíquico e o social e entre o psicossocial e o ambiente em que se vive. Todo fenômeno psicológico é um fenômeno sociológico, na medida em que não se pode conceber um sujeito sem objeto, sem ideologia, sem



Figura 2. Fotografia de Erosão em trecho banhado pelo Rio Araguaia. (Fonte: arquivo pessoal de José Camapum de Carvalho)

a ordem simbólica por meio da qual este se reafirma como tal. “Não buscamos o irreduzível psíquico ou o irreduzível social, mas a maneira que estes se interatuam nos destinos humanos” (GAULEJAC, 2001, p. 70). O significado das condutas humanas é inseparável do sistema de relação social no qual se inscrevem. Os comportamentos não podem ser explicados independentemente das condições sociais que os fazem possíveis. Ao mesmo tempo, o indivíduo não se reduz ao conjunto das determinações sociais e aos processos de socialização que o constituem (SONODA, 2016).

Ainda que as erosões específicas de borda de reservatório possam ser causadas por fatores naturais como chuvas, tipo de solo e cobertura vegetal, à presente análise interessa especialmente quando a causa desse fenômeno está associada à ocupação e/ou ao uso indevido ou inapropriado do solo, ou seja, configurando uma erosão deflagrada por ação humana também conhecida por erosão antrópica. Mesmo no caso em que o ser humano sociedade local, não é o causador das erosões de margem, já que estas podem advir da simples construção, ou construção mal planejada ou mal executada do reservatório, está sujeito aos impactos psicológicos da situação criada, os quais devem ser mitigados ou mesmo eliminados, e as pessoas serem incentivadas a uma participação mais ativa. E, ainda para os objetivos propostos neste texto, analisar-se-á especificamente a erosão em reservatórios artificiais.

Os reservatórios são obras de engenharia construídas com as mais diversas finalidades: abastecimento de água; geração de energia; controle de inundações; entre outras. Atividades de geração de renda, lazer e turismo também podem resultar deste tipo de obra e ocorrem de modo consorciado com outras finalidades. Podem ser empreendimentos de pequeno, médio ou grande porte. Enfatize-se que, em todas as escalas, há a probabilidade do advento problemas que podem ser evitados ou mitigados.

O reservatório mais antigo do Distrito Federal é o Lago Paranoá, construído artificialmente pelo represamento das águas do rio com o mesmo nome. Criado com objetivos de abastecimento de água, geração de energia e aumento da umidade relativa do ar, esse reservatório é um cartão postal da cidade, sendo também utilizado como lazer e fonte de renda. Trata-se, portanto, de exemplo típico em que mesmo não sendo possível ou sendo limitada a possibilidade de participação da sociedade nas fases de projeto e construção, ao longo de sua vida útil, torna-se indispensável a inserção da sociedade, pois, se a obra impacta a paisagem, a qualidade do ar e as atividades de lazer, também impacta a qualidade de vida das pessoas e seus estados de bem-estar subjetivo (Figuras 3 e 4).



Figura 3. Lago Paranoá, 01/04/2014. (Fonte: arquivo pessoal de José Camapum de Carvalho)



Figura 4. Lago Paranoá, 01/05/2014. (Fonte: arquivo pessoal de José Camapum de Carvalho)

Os impactos ambientais advindos da construção de reservatórios costumam ser levados em conta durante o planejamento e execução das obras, inclusive para respeitar as leis ambientais vigentes no Brasil. A Política Nacional de Recursos Hídricos, detalhada na Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e regulamentou o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal. No inciso VI do art. 1º dessa Lei, são estabelecidos os fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, dispositivo no qual se pode ler que “a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades”.

No inciso II do art. 3º da referida lei, estão contidas as diretrizes gerais de ação para implementação da referida política, *in verbis*:

Art. 3º Constituem diretrizes gerais de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos:

...

II - a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País.

Ainda que aspectos psicossociais que envolvem participação e controle social estejam contemplados na legislação, na prática, são de difícil implementação.

Segundo Camapum de Carvalho e Diniz (2005), pouco se discute sobre os impactos no reservatório, ou seja, os problemas que podem aparecer após a construção de tal empreendimento. Os mesmos autores pontuam ainda que o assoreamento gerado pela deposição de resíduos sólidos é sempre de origem antrópica e é causado pelo lançamento inadequado do lixo nas ruas, valas, parques e mesmo diretamente no próprio reservatório. Mas, faz-se necessário atentar ainda para o impacto que esses reservatórios, tendo em vista os estados em que se encontram ou a que são levados, gera na sociedade por ele afetada ou que dele se beneficia ou se beneficiará, pois, harmonizar o empreendimento com os anseios e consequências afetos à sociedade pode resultar diretamente na mitigação ou mesmo em se evitar problemas como as erosões de borda de reservatório.

Portanto, os problemas decorrentes da ação antrópica nessas construções podem contribuir para a redução da vida útil do reservatório e até mesmo inviabilizá-lo economicamente. E quem causa estes problemas pode fazer parte da solução. Voltar-se-á a este ponto adiante.

Sobre os impactos negativos que incidem sobre o reservatório já construído, Camapum de Carvalho e Diniz (2005) destacam a poluição gerada por insumos, defensivos agrícolas, resíduos sólidos, esgoto não tratado, lixo descartado inapropriadamente e acúmulo de sedimentos, conjunto de fatores potencialmente geradores de erosão de margem. Para os referidos autores, estes impactos podem ser prevenidos e/ou mitigados, sendo a educação e a conscientização das administrações públicas e da sociedade civil importantes ferramentas para que isso ocorra. Cabe destacar a importância da inserção da sociedade nesse processo. Os estudos apresentados por Aquino et al. (2016) mostram que, em plena capital federal, córrego que nasce e atravessa o conjunto habitacional do Lago Sul – região ocupada por classe média alta – e desagua no Lago Paranoá, encontra-se poluído por coliformes totais e fecais. Exemplos assim reforçam a conclusão de que o viés de classe não é, necessariamente, uma variável importante para entender a ação antrópica no meio ambiente.

No que se refere aos aspectos técnicos do planejamento, execução e manutenção dos reservatórios, cabe aos engenheiros, projetistas, executores e administradores estudar e prevenir quando e como a erosão de borda do reservatório pode vir a ser um problema. Porém, quando os problemas são decorrentes do mau uso do reservatório e as soluções exigem mudança de comportamento da população beneficiada, esses profissionais não costumam atuar. Questões psicossociais, a exemplo das listadas a seguir, não costumam ser contemplados nas obras de engenharia: Quais são as mudanças que o empreendimento vai acarretar na vida da população local? As pessoas diretamente beneficiadas foram consultadas sobre o planejamento e execução da obra? A população local desejou o empreendimento? Apesar disso, tais indagações são importantes e deveriam estar previstas porque quem causa o problema (por exemplo, jogar lixo no reservatório) faz parte dele, mas também pode fazer parte da solução. Educação ambiental é uma forma de prevenção. Mas não é suficiente.

A população local deve ser a principal interessada pelo desenvolvimento e melhorias no meio ambiente, uma vez que é ela quem melhor conhece suas necessidades e aspirações, podendo assim apontar o melhor caminho para a busca de uma melhor qualidade de vida. É necessário confiança na capacidade e sabedoria dessa população na identificação de seus problemas e na tentativa de soluções originais, considerando seu ritmo, dinamismos e peculiaridades. Mas essa população, que é diretamente afetada e beneficiada pelas obras de engenharia, quer atuar e participar? Estão interessados no processo? Estão dispostos e disponíveis? Como possibilitar a participação e o engajamento? Transmitir a sensação de pertencimento pode ser um caminho.

Para Moscovici (2007), a questão é o ser humano reconhecer que a natureza não é externa a ele. O homem é uma das forças da natureza; é um elemento natural. Sua história é associada àquilo que está ao seu redor, como os recursos naturais e as tecnologias. No mesmo sentido, Maciel e Alves (2015) destacam que uma das grandes contribuições da Psicologia Social Comunitária no trabalho junto às comunidades é apreender e decodificar os problemas que elas apresentam, construindo e buscando soluções conjuntamente. As referidas autoras pontuam ainda que a busca pela promoção da saúde, do lazer, do bem-estar, da qualidade de vida e da preservação do meio ambiente passa pela participação ativa dos sujeitos, sendo este trabalho bem-sucedido quando se possibilita auxiliar a comunidade a identificar suas necessidades e aspirações, expressá-las com clareza e ser capaz de buscar as soluções. E esse movimento pressupõe que a população local, diretamente afetada pelas obras de engenharia, deve

estar envolvida desde o planejamento até a manutenção do projeto. E, para participar, opinar e propor, as pessoas precisam se sentir partes do meio em que vivem. Precisam ser escutadas e sentir que suas opiniões e saberes contam e são relevantes.

3 Notas sobre participação social e responsabilização

Os problemas ambientais são motivo de grande preocupação na atualidade porque denunciam um limite físico dos recursos naturais e, por conseguinte, do próprio planeta. Em diversas agendas, já está acordado que não é mais possível viver como estamos vivendo. E, apesar de toda discussão sobre questões relativas, por exemplo, à mudança climática, à devastação das florestas tropicais e às iniquidades socioambientais, esses problemas persistem. As tentativas de contorná-los também não são novidade. Basta uma rápida pesquisa sobre as grandes conferências internacionais sobre meio ambiente já realizadas (que se iniciaram a partir da segunda metade do século XX). Elas se configuraram como tentativas de buscar alternativas de desenvolvimento mais sustentáveis e ‘viáveis’, propondo diretrizes, acordos e limites sobre a ‘questão ambiental’. Como exemplos dessas reuniões e/ou acordos internacionais, cite-se o Clube de Roma (1968); a Conferência de Estocolmo (1972); a Conferência de Cocoyoc (1974); o Informe Brundtland (1987); a Conferência do Rio de Janeiro (1992); a Conferência de Copenhague (1995); o Tratado de Kyoto (1997); a Conferência de Joanesburgo (2002) e a Rio+20 (2012).

Todo esse histórico de reuniões, acordos – nem sempre cumpridos, é preciso lembrar – e literatura especializada publicada não foram suficientes para evitar a destruição de recursos naturais. Não se vê mudanças significativas nos modos de vida da sociedade contemporânea que apontem para um maior cuidado na relação do homem com o meio. Gro Harlem Brundtland, em 1987, definiu desenvolvimento sustentável como aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as futuras gerações atenderem às suas próprias. Passados quase 30 anos, o conceito parece não dar conta da complexidade das questões ambientais postas atualmente. No Brasil, a situação é idêntica, apesar de a Constituição Federal determinar, no *caput* de seu art. 225, o mesmo entendimento de Brundtland (1987) para desenvolvimento sustentável, *in verbis*:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

A sustentabilidade, conceito hoje debatido no governo, na sociedade civil e na militância social, suscita a necessidade de se pensar um novo modelo de desenvolvimento e de reaproveitamento e uso sustentável dos recursos naturais, sabidamente finitos. O Brasil, país mega-diverso, apresenta algumas particularidades que são inerentes a países em desenvolvimento, que sofrem, sobremaneira, com a grande demanda de recursos naturais requerida pelo atual modelo de desenvolvimento, pela pressão antrópica das grandes cidades, pelo crescente aumento populacional, entre outros fatores e, infelizmente, sem a necessária educação e inclusão

social ampla. Entende-se por inclusão social ampla a sociedade como parte do todo, da renda, dos problemas socioambientais e, em especial, de suas soluções.

De acordo com D'Ávila & Maciel (1992, p. 72), sustentabilidade como projeto ecológico conduz à formulação de dois pressupostos básicos, envolvendo a concepção de meio ambiente e desenvolvimento:

- O meio ambiente não pode ser encarado como um dado isolado, mas sim como um dado da cultura de uma comunidade, isto é, um processo de interação entre o socio-cultural, gerado pelo homem e a natureza;
- Não são possíveis ações ditas de desenvolvimento, sejam de preservação ou modificações sobre o meio ambiente, dissociadas do homem que a habita e, por conseguinte, de sua dinâmica cultural.

Assim, falar em sustentabilidade, inclusive nas e das obras de engenharia, requer respeito à cultura e aos costumes locais, priorizando ações inerentes ao público afetado e considerando os limites e a capacidade da comunidade em absorver mudanças. A valorização da cultura e das aspirações da população se configura como importante ferramenta de mudança e possibilidade de engajamento das pessoas envolvidas.

A Psicologia Social Comunitária tem envolvido trabalhos interdisciplinares, de modo a coletivizar e facilitar o entendimento entre a comunidade e seus diversos aliados, entre a comunidade e seu entorno e entre ela e o ambiente em que vive. Propõe-se trabalhar com a comunidade, incorporando seus membros em todas as fases do trabalho e enfatiza a problematização da relação entre produção teórica e aplicação do conhecimento, utilizando-se sobretudo metodologias participantes. Os trabalhos enfatizam a ética da solidariedade, dos direitos humanos e a busca da melhoria da qualidade de vida da população em estudo (Campos, 1996). Observa-se que tais fundamentos da Psicologia Social Comunitária podem, em sentido pleno, contemplar a interrelação com os reservatórios, ou seja, das comunidades com o ambiente onde passarão a viver ou onde vivem.

Esta é a uma perspectiva importante: a participação. Contudo, um dos grandes desafios atuais é viabilizá-la, sobretudo em uma sociedade como a nossa, na qual as pessoas não têm o 'hábito' de participar ou não se sentem pertencentes ao processo.

A tão aclamada "participação social" deve ser possibilitada já na fase de planejamento das obras, para que as pessoas diretamente afetadas (ou beneficiadas) sintam-se responsáveis pelos resultados obtidos, assim como na manutenção e preservação dos recursos investidos. Ferramentas regulatórias (como os Orçamentos Participativos) podem ser um caminho. Mas a questão de como fazer com que as pessoas realmente participem e sintam-se responsáveis pelos espaços e obras públicas é mais complexa. E o motivo dessa dificuldade é facilmente entendido pelos profissionais das Ciências Humanas: sabe-se que apenas a informação transmitida pela educação formal não muda comportamentos; são necessárias, entre outros, a educação não formal e, em especial, a inclusão e a responsabilização subjetiva.

Ao pontuar a questão da responsabilização subjetiva, o presente texto a situa no campo das ações sociais, da inclusão, do pertencimento e não propriamente do Direito. No entanto, como nas questões ambientais tratadas dentro do Direito a responsabilidade é objetiva, faz-se necessário, dada a sua importância, distingui-la da responsabilidade subjetiva. No Direito,

responsabilidade subjetiva é aquela que depende da existência de dolo ou culpa por parte do agente causador do dano e, por consequência, do nexo de causalidade. Já responsabilidade objetiva é aquela que independe da comprovação do dolo ou da culpa do agente causador do dano, fazendo-se necessário apenas o nexo de causalidade entre a conduta e o dano causado. Porém, Vitta (2008) entende que, ao se aplicar a Teoria da Responsabilidade Objetiva, ocorre a presunção de que o agente causou o dano, invertendo-se o ônus da prova, cabendo então ao próprio réu tentar excluir sua responsabilidade.

Diante da importância do tema em relação ao meio ambiente, torna-se oportuno trazer a esse texto o § 3º do art. 225 da Constituição Federal Brasileira, que coloca no mesmo patamar de responsabilidade as pessoas físicas e jurídicas, não as isentando da obrigação de reparar os danos ambientais causados: “As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, **pessoas físicas ou jurídicas**, a sanções penais e administrativas, **independentemente da obrigação de reparar os danos causados.**” (Grifou-se).

Portanto, deve-se entender que, em relação às questões psicossociais, a responsabilização subjetiva compreende a ideia de inclusão participativa das pessoas nas discussões sobre o meio ambiente e nas soluções dos problemas ambientais. Dessa forma, entende-se necessário que os indivíduos e a sociedade como um todo se sintam responsáveis pelo desenvolvimento sustentável.

4 A educação e responsabilização como caminho possível

E educação aqui referida não está limitada, embora inclua, a educação formal, acadêmica ou puramente voltada à produção ou à formação. A educação deve ser entendida em sentido amplo, envolvendo valores, ética, educação ambiental e responsabilização. Uma ressalva aqui se faz necessária: filosoficamente, deve-se entender que só se pode responsabilizar e punir quem se educou. E quem se educou no segundo sentido acima descrito.

Essa responsabilização subjetiva refere-se à compreensão da participação social como um processo de construção de projetos coletivos que busquem o bem comum, não se referindo diretamente à responsabilidade subjetiva tratada no âmbito do Direito e discutida ao final do item 3. O compromisso de participação social pode representar também uma importante possibilidade de substituição de modelos tradicionais centralizadores e desconectados das realidades locais. Em síntese, a participação mais efetiva dos atores sociais locais deve visar: descentralizar decisões; estimular a cidadania; estabelecer parcerias; promover a eficiência coletiva; ampliar a qualidade e eficácia da política pública; reduzir desigualdades; conquistar a liberdade e melhorar a qualidade de vida.

Ficou claro, ao longo desse capítulo, que a educação e a construção de uma consciência socioambiental são fatores de grande relevância para que se evitem ou se mitiguem problemas como as erosões de borda de reservatório.

Considerando-se a questão sob a ótica das erosões de borda de reservatório, cabe inicialmente trazer a esse texto as ponderações de Camapum de Carvalho et al. (2008, p. 166), apresentadas ao discutirem erosões em meio urbano e que realçam a importância da educação:

[...] materialmente, a engenharia é responsável, se não por todos, por grande parte dos processos erosivos que surgem em meio urbano, que falta efetividade às normas jurídicas para impedir as práticas danosas ao meio ambiente e que os dois ocorrem porque, antes de tudo, a educação que os precede é falha.

Podendo-se ainda estabelecer um elo com as erosões em borda de reservatório, é pertinente, devido à inter-relação entre o cotidiano e o psicossocial, trazer para este texto a ponderação de Camapum de Carvalho (2009, p. 22) ao tratar do tema “políticas públicas de melhoria e universalização da educação”:

É necessário que o cotidiano e a educação se retroalimentem. O ler e escrever são fundamentais no processo de educação, no entanto, devemos vê-los como meio, como instrumento, e não como fim. O fim é a garantia de elementos como a qualidade de vida, o equilíbrio ambiental, o respeito as (sic) liberdades individuais e coletivas.

Para realçar a importância da educação ambiental, cabe citar o inciso VI do art. 225 da Constituição Federal Brasileira de 1988, segundo o qual incumbe ao Poder Público: “VI - promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente”.

5 Considerações finais

Nesta última seção, serão apontados aspectos psicossociológicos relacionados às obras de engenharia, com destaque para os reservatórios e processos erosivos, destacando-se questões relacionadas à qualidade de vida, ao lazer, ao turismo e, por que não, à felicidade e ao bem-estar subjetivo.

Ainda que a legislação brasileira contemple aspectos relacionados à participação social nos projetos de engenharia, na prática, este envolvimento com diferentes atores é bastante difícil de ser concretizado. Os principais motivos desse cenário incluem, por um lado, uma apatia e um distanciamento da sociedade civil nos projetos e políticas públicas e, por outro, uma inabilidade dos técnicos que planejam, executam e mantêm essas mesmas obras em incentivar ou potencializar a participação da população direta e indiretamente beneficiada pelas obras. O engenheiro, salvo raras exceções, não está preocupado com tais aspectos, os quais, no entanto, são importantes para a engenharia, ainda que a inclusão de aspectos subjetivos nos projetos seja de difícil planejamento, execução e avaliação. As dificuldades se estendem ao cronograma de trabalho e ao cronograma financeiro. Contudo, é preciso insistir na tentativa de se incluir aspectos psicossociais porque existe um retorno ou contrapartida que não são imediatos, mas são potenciais e estratégicos. Por exemplo, pode-se pressupor que uma população que se sentiu afetivamente envolvida no planejamento e na construção de um reservatório se sentirá responsável pelo seu uso e pela sua conservação.

Conclui-se este capítulo com algumas teses que, para serem comprovadas, necessitarão de estudos teóricos e empíricos mais complexos. Culturalmente, a sociedade brasileira é pouco envolvida e pouco participativa nas decisões políticas. Levanta-se a hipótese de que, diante de impasses ou problemas, as pessoas tornam-se motivadas a participar e/ou buscar soluções

quando estão afetivamente implicadas, a exemplo dos casos de desapropriação de casas para construção de grandes obras ou solução de problemas, como ilustrado nas Figuras 1 e 5.



Figura 5. Fotografia de protesto de moradores de Planaltina de Goiás. (Fonte: arquivo pessoal de José Camapum de Carvalho).

A Psicologia Comunitária pode contribuir para o debate com suas pesquisas e ações sobre lazer; sustentabilidade e desenvolvimento; prevenção e mitigação de desastres ambientais; participação social (por meio do uso da metodologia da Pesquisa-Ação); capacitação de lideranças locais; mediação de conflitos e mudança de comportamento/atitude via conscientização/responsabilização.

Especificamente sobre o lazer, cabem algumas reflexões. Entende-se por lazer tudo o que se faz no tempo livre, depois de cumprir com as obrigações familiares, domésticas, laborais e políticas (DUMAZEDIER, 2001), tendo ainda três funções: descanso, divertimento e desenvolvimento pessoal. Pode ser um potencializador da participação comunitária, na medida em que é instrumento de desenvolvimento humano e social, porque promove a integração do ser humano livremente no seu contexto social, contribuindo para o desenvolvimento de sua capacidade crítica, criativa e transformadora. O lazer, compreendido dentro desta perspectiva social e cultural, possibilita a emergência de indivíduos mais ativos e partícipes da comunidade em que vivem.

Pensando especificamente nos reservatórios, as mais diversas atividades de lazer e de geração de renda podem ser desenvolvidas nele e em seu entorno, tais como: pesca, aluguel de pranchas para prática esportiva, turismo, pequenos comércios na beira dos reservatórios, passeios de barco, entre outros. A Figura 6 mostra um reservatório com potencial para práticas como as ora descritas.



Figura 6. Fotografia de Reservatório construído para lazer, em Anápolis (GO). (Fonte: arquivo pessoal José Camapum de Carvalho).

Referências

- AQUINO, S.C.N.; COELHO, J.A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Análise da influência da qualidade da água na compactação de solos tropicais**. In: 45ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 19º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Brasília: 2016, 13 p.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil** Brasília: Ed. do Senado Federal, 2011.
- _____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União, Brasília**, 9 jan. 1997.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Aspectos técnicos, jurídicos e educacionais e a expansão urbana ambientalmente sustentável**. Monografia (Bacharelado em Direito). Faculdade de Ciências Jurídicas e de Ciências Sociais, Centro Universitário de Brasília – UniCEUB. Brasília: 2009, 90 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. T.; LEUZINGER, M. D. **Erosão em meio urbano**: um problema de engenharia, de direito e de educação. *Revista de Direito e Política*, v. 16, pp. 153 - 167. 2008.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; DINIZ, N.C. **Cartilha**: Erosão. 1. ed. Brasília: J. Camapum de Carvalho & N.C. Dinis, 2005, 33 p.
- CAMPOS, R.H.F. Introdução: A psicologia social comunitária. In: CAMPOS, R.H.F. (org.) **Psicologia social comunitária**: da solidariedade à autonomia. Petrópolis: Vozes, 1996, pp. 83-98.
- D'ÁVILA, M.I.; MACIEL, T.M. Pantanal: um ecodesenvolvimento necessário. In: MACIEL, T. (Org.). **O ambiente inteiro**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1992, pp. 69-90.
- DUMAZEDIER, J. **Sociologia empírica do lazer**. São Paulo: Perspectiva, 2001, 244 p.
- GAULEJAC, V. Psicologia e sociologia clínica. In: CARRETEIRO, T.C.; ARAUJO, J.N. (Orgs.). **Cenários sociais e abordagem clínica**. São Paulo: Escuta, 2001, pp. 29-49.
- MACIEL, T. M. F. B.; ALVES, M. B. A importância da psicologia social comunitária para o desenvolvimento sustentável. **Pesquisas e práticas psicossociais**, v. 10, pp. 270-283, 2015.
- MOSCOVICI, S. **Natureza, para pensar a ecologia**. Rio de Janeiro: Mauad, 2007, 254 p.
- SONODA, K. **Violência urbana no Distrito Federal**: histórias de vida de vítimas indiretas e seus trabalhos de luto. Tese de Doutorado. Programa Pós-Graduação em Psicologia Clínica e Cultura, Universidade de Brasília. Brasília: 2016, 354 p.
- VITTA, H. G. **Responsabilidade civil e administrativa por dano ambiental**. São Paulo: Malheiros, 2016, 166 p.

CAPÍTULO 4

Sulcos, ravinas e voçorocas

Marisaides Cruz Lima
João Guilherme Rassi Almeida
Glacielle Fernandes Medeiros
Diógenes Mortari
Patrícia de Araújo Romão
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
José Camapum de Carvalho

Palavras chaves: Erosão. Ensaio. Degradação

1 Introdução

O processo erosivo geralmente se inicia em forma de erosão laminar e, em face da concentração do fluxo, evolui para os sulcos. Ao se aprofundarem e concentrarem ainda mais o fluxo, os sulcos atingem o estágio de ravina e finalmente de voçoroca. Todos esses estágios do processo erosivo recebem aqui a denominação de ‘erosão’.

Segundo Primavesi (1952), a erosão acelerada é aquela condicionada pelo homem e que resulta da morte dos microrganismos do solo com consequente destruição de sua estrutura natural. É interessante destacar que, já no ano de 1952, Primavesi distinguiu, com foco na agricultura, a erosão externa da erosão interna. Para ele, a erosão externa era “a erosão visível, a olho nu, porém só se apresentando com um grau muito avançado de erosão interna” (PRIMAVESI, 1952, p. 16), ao passo que a erosão interna era “muito mais perigosa, não só porque deixa de ser reconhecida pelo leigo, mas porque conduz à completa esterilidade dos nossos solos” (PRIMAVESI, 1952, p. 17). Seguindo a mesma linha de raciocínio, são discutidos no presente capítulo os resultados obtidos por Lima (2003) ao estudar ravinas e voçorocas do Distrito Federal, onde a erosão ou degradação interna dos maciços é muitas vezes responsável pela deflagração e evolução dos processos erosivos formadores de sulcos, ravinas e voçorocas.

Cabe ainda lembrar as sábias palavras de Primavesi (1952, p. 19): “Mas o solo não é algo destituído de vida, representando, ao contrário, ele próprio um organismo vivo. A substância mineral é o corpo, os microrganismos constituem-lhe o sangue, pulmões, coração e aparelho digestivo.”

Essas palavras remetem a algo importantíssimo para que se evitem e que sejam mitigados os processos erosivos: a necessidade de se preservar o equilíbrio ecológico, evitando-se o exaurimento das riquezas naturais gerado pelos processos erosivos.

Apesar do título específico deste capítulo, “sulcos, ravinas e voçorocas”, ele discutirá o tema erosão de modo mais amplo, buscando entender as raízes do problema concernente às erosões de borda de reservatório.

Nas discussões conduzidas ao longo do capítulo, recorre-se a estudos específicos, que permitem conclusões gerais acerca das erosões de borda de reservatório.

O capítulo se inicia com a abordagem de questões gerais relevantes para o entendimento dos processos erosivos e, em seguida, passa a tratar diretamente do tema ravina e voçoroca, estabelecendo um elo com as erosões de borda de reservatório.

2 Questões gerais

Neste item, serão abordados conceitos diversos que os autores consideram pertinentes para o entendimento do tema geral do capítulo, quais sejam: aspectos hidrológicos, processos erosivos, bacia hidrográfica, morfologia do meio físico, chuva e solos.

2.1 Aspectos hidrológicos

A Hidrologia é a ciência que tem como objeto de estudo o ciclo hidrológico, ou seja, busca compreender os fenômenos naturais relacionados à presença da água no planeta Terra, estando esse elemento no estado sólido, líquido ou gasoso. A Hidrologia zela por aspectos que variam desde a movimentação das massas de ar (formação, circulação e distribuição) até aspectos relacionados à manutenção da biota no planeta, tais como: propriedades físicas, químicas e biológicas associadas à água, seus diversos usos e tipos de poluições.

A Hidrologia é, portanto, uma ciência interdisciplinar, intrínseca a praticamente todas as áreas do conhecimento, tais como as áreas da saúde, humanas e exatas, exemplificadas a seguir. Na área da saúde, a disponibilidade e a qualidade da água são aspectos primordiais para a saúde pública de uma determinada região. Na área das ciências humanas, a história da humanidade tem esse recurso natural como fator preponderante na definição das ocupações geográficas e até na ocorrência de guerras. Já na área das ciências exatas, a água está intimamente ligada a produção de energia, processos de produção agrícola e industrial, zoneamento urbano, obras civis, propriedade e comportamento dos solos, etc.

A Hidrologia é considerada uma ciência natural, cabendo ao hidrólogo, entre outras funções, a arte de observar e coletar sistematicamente dados de eventos meteorológicos que acometem o nosso planeta a cada segundo, tais como precipitações intensas e períodos de estiagem, que tendem a se repetir de tempos em tempos em intensidades semelhantes em uma mesma localidade geográfica. Por isso, cabe ao hidrólogo utilizar a probabilidade e a estatística como suas principais ferramentas de trabalho.

A Terra pode ser considerada um organismo dinâmico, estando a litosfera, a hidrosfera e a atmosfera em constante processo de mudança, algumas extremamente lentas, a exemplo dos processos de formações geológicas, porém, muitas outras exacerbadamente rápidas, advindas das ocupações e das ações antrópicas.

E são essas ocupações e ações antrópicas que vêm alterando consideravelmente o ciclo hidrológico, desertificando extensas áreas, principalmente pelo processo de desmatamento e agricultura intensiva com uso de técnicas de manejo inapropriadas e causadoras de processos erosivos, acarretando inundações em diversas áreas em consequência principalmente da

expansão urbana desordenada e de práticas agrícolas que dificultam a infiltração da água e, paradoxalmente, facilitam o escoamento superficial, sobrecarregando os cursos d'água.

A presença do ser humano no meio está quase sempre associada a atividades e/ou obras que modificam o sistema de drenagem de água do local e em seu entorno. Seja por meio da agricultura ou da expansão urbana, em geral, as atividades humanas tendem a diminuir a infiltração de água e a aumentar o escoamento superficial na região, contribuindo para o surgimento e evolução dos processos erosivos.

As atividades e obras de engenharia são necessárias para o desenvolvimento socioeconômico de uma determinada região, contudo, esse quadro deve ser alinhado aos conceitos estabelecidos pelo desenvolvimento sustentável, ou seja, os recursos naturais existentes devem ser utilizados de forma a não comprometerem as necessidades das gerações futuras.

As usinas hidroelétricas, por exemplo, são obras de relevante interesse para se discorrer sobre aspectos econômicos, sociais e ambientais. A energia elétrica oriunda das hidroelétricas é muitas vezes classificada como energia limpa, por ser energia obtida por meios renováveis, nesse caso, o Ciclo Hidrológico. Contudo, os impactos socioambientais decorrentes da construção de uma barragem são enormes, tais como: a necessidade de deslocamento de comunidades inteiras, imensas áreas submetidas ao desmatamento e inundação, mortandade e migração de muitas espécies da fauna, além da mudança do regime de escoamento lótico das águas fluviais para o léntico dos reservatórios.

Como já citado, a execução de barragens é de suma importância para o desenvolvimento econômico e social de uma determinada região, inclusive em relação às necessidades das gerações futuras, pois uma barragem pode possuir vida útil superior a um século, desde que sejam tomados certos cuidados, por exemplo, evitando-se o seu assoreamento. Contudo, se não houver um planejamento integrado da bacia hidrográfica em que o reservatório de água esteja inserido, processos erosivos geradores de assoreamento e altas taxas de evaporação podem reduzir a capacidade hidráulica e, conseqüentemente, reduzir o processo de obtenção de energia ou de abastecimento público, dependendo da função da barragem.

Diante do exposto, verifica-se que os aspectos hidrológicos se constituem em elementos de grande relevância na avaliação dos processos erosivos que acometem as margens de muitos reservatórios. Não só as erosões superficiais como as erosões em sulcos, as ravinas e as voçorocas guardam estreita relação com o fator hidrológico.

2.2 Processos erosivos

Devido ao clima predominante no Brasil, quando se estuda os fatores relativos ao início e ao desenvolvimento dos processos erosivos, destacam-se dois aspectos de suma importância na erosão hídrica: a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo.

A erosividade é definida como a capacidade de ação do agente erosivo (das gotas de chuva, do escoamento superficial e de fluidos agressivos) em causar o destacamento e o transporte do solo.

Já a erodibilidade é definida como a resistência do solo ao processo erosivo, incluindo, além de suas características intrínsecas, fatores secundários, como os ciclos de umedecimento e secagem e a composição da água que interage com o solo.

Um terceiro aspecto que poderia ser introduzido é uma conjugação da erosividade da água e da erodibilidade do solo em que os dois fatores são conjuntamente definidores da “erosão intergranular ou interpartículas” que o solo sofre. Esse terceiro aspecto depende da resistência do solo à erosão (cimentação, coesão e atrito), da presença da fase ar em condição de continuidade, da sucção atuante no solo e da presença de uma lâmina d’água, que passa a se infiltrar de modo contínuo no solo. Nesse caso, a erosividade da água da chuva não está em sua força trativa, mas sim na simples formação de uma lâmina d’água recobrando o solo e que nele passa a se infiltrar. Já a erodibilidade não está na capacidade do solo em resistir à força trativa da água oriunda do escoamento superficial, mas sim na existência de continuidade na fase ar e na atuação de uma sucção capaz de nela gerar, com a entrada da água, uma pressão positiva que supere a resistência do solo.

A ideia do reservatório de água para geração de energia elétrica é a de armazenar água no período de maior abundância, criando um potencial de geração de energia perene. A água utilizada na geração de energia retorna ao curso d’água pré-existente à jusante da barragem, sendo importante lembrar que, o excesso de água liberado, se for muito grande, pode provocar erosões nas margens dos rios e até mesmo inundações à jusante. Os grandes riscos estão, no entanto, ligados à necessidade de esvaziamento rápido do reservatório ou na própria eventual ruptura da barragem, situações em que erosões de margem e inundações podem ocorrer com maior intensidade. Os problemas ambientais que vêm ocorrendo com as cheias do rio Madeira e consequentes inundações em Porto Velho (Estado de Rondônia), como a ocorrida em 2014, indicam a necessidade de estudos de impacto ambiental mais amplos e que incluam também, por exemplo, impactos sobre o regime de precipitação, umidade relativa do ar e temperatura e capacidade de infiltração do solo com umidade afetada pela construção do reservatório.

A erosão gerada pela chuva se dá pelo impacto das gotas sobre o solo e pelo escoamento superficial resultante da precipitação. Ao destacamento das partículas pela ação das gotas de chuva se dá o nome de salpicamento, podendo ocorrer inclusive em áreas planas, pois a energia erosiva da água provém do movimento de queda e espalhamento das gotas de água com o impacto sobre a superfície do solo. Não raro, chuvas de granizo ocorrem também em ambientes tropicais e subtropicais. Nesse caso, o impacto do granizo sobre a superfície do solo, devido ao estado sólido da água, é propenso a gerar a sua compactação, sendo o salpicamento um fenômeno limitado, quiçá inexistente.

Já a erosão resultante do escoamento superficial se intitula erosão superficial ou erosão laminar e deve-se à força trativa da água sobre o solo, que resistirá mais ou menos em função de sua coesão e força de atrito entre as suas partículas. Dado que a erodibilidade do solo depende desses componentes de resistência – coesão e atrito – fica facilitado o entendimento do fato de a incorporação de matéria orgânica ao solo contribuir para a mitigação do processo erosivo. Isso ocorre porque, ao mesmo tempo em que a matéria orgânica amplia a coesão atuante no solo ao propiciar maior agregação das partículas, tais agregações constituem-se em elementos com maior massa que as partículas individuais nos pontos de contato. Consequentemente a esse processo, há a indução de maior tensão normal geradora do atrito entre esses agregados, se comparada às tensões entre as partículas individualizadas. Nessa mesma direção de entendimento do fenômeno erosivo, Camapum de Carvalho et al. (2001, p. 4) pontuam:

O desprendimento das partículas de solo devido a atuação do fluxo se dá por dois motivos: pela capacidade interativa entre as moléculas de água e as partículas de solo e pela ocorrência de turbulência no fluxo. As moléculas de água ao se movimentarem aplicam uma tensão cisalhante sobre as partículas de solo, que ao ultrapassar a coesão e/ou as forças de atrito do solo, propiciam o desprendimento das mesmas. Ainda, a turbulência que ocorre com o aumento da velocidade de fluxo favorece tal desprendimento.

Com a concentração do fluxo superficial, amplia-se a força erosiva da água, originando-se, dessa forma, erosões lineares. Cronologicamente, essas erosões lineares se iniciam pela formação de sulcos e podem evoluir para os estágios de ravina e, posteriormente, de voçoroca. Porém, não existe na literatura um divisor consolidado entre esses estágios evolutivos da erosão. Camapum de Carvalho et al. (2001) indicam que os sulcos se limitariam à profundidade de 10 cm, aí se iniciando as ravinas que evoluiriam enquanto durasse a estabilidade dos taludes quanto à resistência do solo. Os autores utilizam então a equação de resistência ao cisalhamento do solo saturado como elemento de fixação da profundidade limite da condição ravina. O texto a seguir, oriundo da mesma publicação, aponta para as razões pelas quais, em perfis de solos tropicais, as ravinas são muitas vezes profundas (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2001, p. 4):

Normalmente a coesão é fruto das interações eletromagnéticas entre as partículas de argila, nos solos cauliniticos, por exemplo, este parâmetro normalmente se situa entre 5 e 10 kPa. No entanto, nos solos tropicais e nos solos superficiais dois outros fatores contribuem para aumentar as forças de ligação entre as partículas, os cimentos e a matéria orgânica, o que propicia a formação de agregações mais estáveis e o aumento da coesão. Se nas argilas a tensão normal no contato das partículas superficiais é desprezível o mesmo não ocorre com os solos granulares que por sua vez são não coesivos e apresentam maior ângulo de atrito que os solos argilosos.

De modo a explicar o comportamento de solo granular dos solos tropicais esses autores pontuam (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2001, p. 4):

As análises granulométricas com e sem o uso de defloculante e as microscopias de varredura tem permitido constatar que as camadas mais superficiais de solos lateríticos apresentam a maioria das partículas de argila agregadas nas frações silte a areia fina, ligadas entre si por óxidos ou hidróxidos de ferro e/ou alumínio ou por pontes de argila. Estas camadas apresentam alta porosidade e conseqüentemente elevada permeabilidade.

Para efeito deste texto, são entendidas como sulcos, as erosões lineares até 10 cm de profundidade e, como divisor entre ravina e voçoroca, o nível d'água freático máximo, independentemente de sua intermitência ou não. Esse limite está sendo seguido, por sua maior simplicidade classificatória e por entender que efetivamente os fenômenos instabilizadores que ocorrem abaixo e acima no nível freático, são em parte distintos. Embora se possa ter, nas erosões lineares, o surgimento de *piping* na zona não saturada, devido à ocorrência de infiltração concentrada da água a partir da superfície do terreno, é no manto saturado que sua

ocorrência é mais comumente encontrada. Quanto ao fenômeno da eluviação ou esqueletização do maciço, que contribui para a ampliação da erosão, cabe destacar que ele ocorre tanto em meio saturado quanto em meio não saturado, não devendo, portanto, ser usado como divisor entre a definição de ravina ou de voçoroca.

Quanto à forma da seção transversal gerada nas erosões lineares, elas são geralmente enquadradas, a depender da geologia, em duas formas: V e U. Mortari (1994), ao estudar erosões do Distrito Federal, propõe, em função da geologia regional, o modelo encaixado de evolução das erosões. Segundo esse modelo, quando se atinge o extrato rochoso, a existência de camadas inclinadas verticalizadas, com menor resistência à erosão, conduz o processo erosivo a atuar nessa camada, encaixando a parte inferior da erosão.

Cabe aqui destacar que as erosões não assumem necessariamente a forma linear, pois dependem de outros fatores e não apenas da direção preferencial do fluxo de superfície. Lima (1999), ao estudar erosões existentes no município de Manaus, estado do Amazonas, constatou que, lá, as erosões assumiam muitas vezes a forma de anfiteatro, em que evoluíam por meio de quedas de blocos oriundas da infiltração da água nas falhas e fissuras de origem neotectônicas. Portanto, nessa situação, desaparece o efeito puro da erosividade da água, assim como o da erodibilidade do solo, de modo a dar origem a um mecanismo de ruptura do maciço ligado ao empuxo da água sobre suas paredes, gerado nas fissuras e falhas geológicas existentes.

No caso das erosões de borda de reservatório, todas essas formas de erosão podem ocorrer, cabendo lembrar que o solapamento das encostas no contato com a lâmina d'água pode gerar rupturas de taludes, as quais tendem a desencadear processos erosivos. Santos (1997), ao estudar ravinas e voçorocas da cidade de Goiânia, constatou que um dos principais fatores geradores de rupturas dos taludes das erosões era o solapamento de suas bases pelo fluxo de água em seus interiores. No caso dos reservatórios, o solapamento está ligado principalmente ao impacto das ondas geradas por efeito de vento e movimento de embarcações no maciço.

Após essa breve discussão sobre as formas de erosão, vale a pena aprofundar um pouco sobre cada uma delas.

2.2.1 *Erosão laminar*

Retornando então à discussão sobre a erosão laminar, esta se dá de forma dispersa ou difusa e, quando a água se concentra em canais preferenciais, dá origem aos sulcos. Esse tipo de erosão ocorre de modo predominante em áreas rurais, mas pode ocorrer também em áreas urbanas, periurbanas e em vias não pavimentadas. Nas áreas rurais, se, por um lado, elas levam ao empobrecimento do solo com a remoção da camada superficial geralmente mais fértil, por outro, sua ocorrência favorece o assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Nos meios urbanos, elas geralmente se encontram associadas à ocupação e uso não planejado do solo, contribuindo para a obstrução de sistemas de drenagem e assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Nas vias não pavimentadas, inclusive aquelas que dão acesso aos reservatórios de água, elas são geralmente ocasionadas pela má execução das vias e dos sistemas de drenagem, sendo que um dos exemplos de má execução é o uso de materiais inapropriados para o revestimento primário.

Dado o impacto socioambiental e econômico que as erosões laminares podem gerar com o assoreamento dos cursos d'água e reservatórios, faz-se necessário maior atenção a esse tipo de erosão, em especial nos países de clima tropical, com espessos mantos de solos profundamente intemperizados e erodíveis e a ocorrência de chuvas torrenciais. Nas áreas agrícolas, assume grande relevância para se evitar esse tipo de erosão, a adoção de técnicas de manejo apropriadas, cabendo salientar que, em muitos casos, o uso de insumos e defensivos agrícolas potencializa a erodibilidade do solo. Nas áreas urbanas, é relevante o planejamento do uso e ocupação do solo; nas rodovias dotadas de revestimento primário, são indispensáveis a definição de traçados e a implantação de sistemas de drenagem apropriados e o uso de materiais adequados que contribuam para a redução da erosividade da água proveniente da chuva.

2.2.2 Erosão em sulcos

Segundo a literatura, não existe um marco definido que caracterize o final da erosão laminar e o início da erosão em sulcos, visto que a erosão laminar e a erosão em sulcos podem coexistir, isto é, o escoamento pode se dar nas partes menos erodíveis do terreno, gerando-se erosão laminar, enquanto nas partes mais erodíveis dessa superfície se formam as incisões, originando-se os sulcos. É importante salientar que a existência do sulco potencializa, com a concentração do fluxo, a energia erosiva da água, possibilitando que esses se aprofundem e evoluam para as ravinas.

Destaca-se que, na erosão em sulcos, o desprendimento de partículas se dá principalmente pela energia do fluxo superficial e não pelo impacto das gotas de chuva, como na erosão laminar, em que o salpicamento é relevante. O volume de material erodido por unidade de superfície é muito maior na erosão em sulcos que na erosão laminar, podendo provocar rapidamente a formação de ravinas. Em termos visuais, as erosões em sulco e ravinas são muito impactantes, no entanto, em termos de volume de solo erodido, não raramente esse volume pode ser muito maior nas erosões laminares, tendo em vista o tamanho da área afetada.

2.2.3 Erosão em ravinas e voçorocas

Como já comentado, as ravinas são formadas a partir das incisões dos sulcos no solo, constituindo-se em canais contínuos, de largura e de profundidade variáveis com as características, com a geologia e comportamento do maciço e com energia erosiva da água. Quando essas ravinas não são tratadas a tempo, elas atingem o nível freático e se transformam em voçorocas, que é o último estágio do processo erosivo.

Nas bordas dos reservatórios, em decorrência do solapamento das bases das encostas, podem ser deflagradas, em função da geologia estrutural, erosões do tipo anfiteatro.

Às voçorocas lineares e do tipo anfiteatro que ocorrem nas bordas de reservatórios, podem se associar os fenômenos do *piping* e eluviação ou esqueletização do solo, em especial, devido a variações no nível d'água do reservatório.

2.3 Bacia hidrográfica

Os reservatórios se inserem em bacias hidrográficas, em sub-bacias ou em microbacias. Neste capítulo, utiliza-se apenas o termo geral bacia hidrográfica. Abordar o tema bacia hidrográfica é relevante, pois, apesar de as erosões de margem se limitarem aos contornos do reservatório, o assoreamento é oriundo de sedimentos que provêm das bacias de contribuição que os alimentam.

A bacia hidrográfica também conhecida como bacia de drenagem constitui-se em área dotada de relevo divisor de água, no qual ocorre a captação natural da água de precipitação e da água oriunda de nascentes distribuídas, formando-se a rede de drenagem, que converge para um leito único até o ponto de saída (Figura 1).

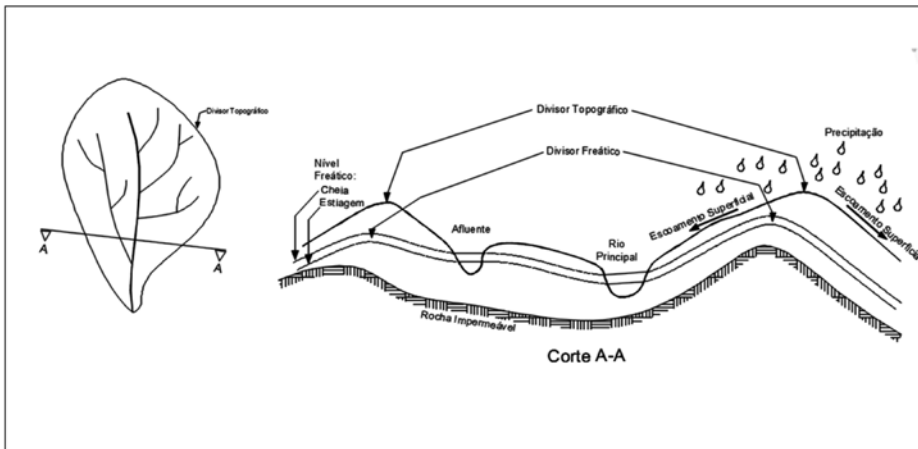


Figura 1. Bacia hidrográfica.

As linhas de máxima cota altimétrica de uma determinada bacia hidrográfica delineiam topograficamente os divisores de águas superficiais, contudo, o fluxo das águas subterrâneas, principais responsáveis pela perenidade dos cursos d'água, não necessariamente coincide com as linhas de cume da bacia, podendo ser variável ao longo das estações chuvosas e de estiagem.

Diversos são os empreendimentos de engenharia que limitam os estudos hidrológicos à bacia hidrográfica em que a obra será locada, como por exemplo: dimensionamento de galerias de águas pluviais, projetos de estradas, pontes e barragens.

A topografia de uma bacia hidrográfica é um dos principais aspectos a serem analisados para a decisão de locação de uma barragem, pois a topografia do terreno que define a menor área a ser inundada com o maior volume de armazenamento de água possível. Essa decisão poderá reduzir bastante o montante das indenizações relativas às áreas particulares e com deslocamento humano, além de minimizar os impactos ambientais oriundos do desmatamento e mortandade de espécies da fauna e flora, pois, na prática, estará inundando uma área menor.

Os gráficos Área x Cota x Volume são formas de avaliar a topografia do terreno em função da altura do muro da barragem. Por meio desse tipo de gráfico é possível determinar a área a ser inundada e o volume de água armazenado para cada cota de inundação. A figura 2 ilustra dois casos distintos: uma barragem localizada em uma região mais ondulada (Figura

2a) e outra em uma área de relevo suave (Figura 2b), cada qual representada pelo seu gráfico Área x Cota x Volume. Supondo que, para ser obtido o mesmo aproveitamento energético, ou seja, alturas piezométricas iguais, fosse estabelecida a cota de 450 metros para ambos os casos, a região mais ondulada reservaria um volume de aproximadamente $110 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água em uma área próxima de 14 km^2 , enquanto a bacia de topografia mais plana necessitaria em torno de 25 km^2 para um volume de aproximadamente $170 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água. Se são observados os quesitos ambientais, o impacto ambiental é bem mais significativo no Reservatório B.

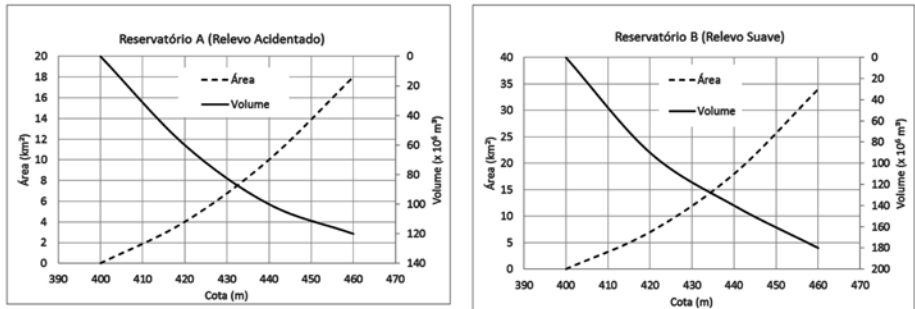


Figura 2. Gráfico Área x Cota x Volume de uma bacia hidrográfica: a) localizada em uma região acidentada; b) localizada em uma região plana.

Cabe destacar que a locação de uma barragem em uma área mais ondulada requer cuidados de gestão voltados para a prevenção de processos erosivos de margem deflagrados por rupturas de taludes, em razão do solapamento das bases das encostas, no contato com a lâmina d'água do reservatório. Por outro lado, em topografias mais suaves, a preocupação geralmente se volta para as erosões laminares e para a formação de sulcos, ravinas e voçorocas. Em ambas as situações, o uso do solo e a construção de vias de acesso ao reservatório requerem ações preventivas, como a implantação de drenagens apropriadas nesse último caso, para que se evite a deflagração dos processos erosivos.

2.4 Morfologia do meio físico

Na topografia do terreno, as variáveis altimétricas, tais como declividade, orientação e comprimento, definem as curvaturas e as formas das vertentes e influenciam diretamente na dinâmica externa geológica e, conseqüentemente, nas taxas de infiltração e de escoamento superficial da água. Quanto maior a declividade de uma vertente, maior a velocidade de escoamento superficial da água. A velocidade desse escoamento se intensifica em comprimentos maiores das vertentes.

Segundo Ruhe (1975), basicamente, as vertentes podem ser descritas quando observadas tanto ao longo das curvas de nível ou da orientação das vertentes (curvatura horizontal) quanto ao longo das linhas de maior gradiente ou das declividades (curvatura vertical). Analisadas de cima para baixo, as curvaturas verticais podem ser retilíneas ou côncavas ou convexas. Já em relação às curvaturas horizontais, é possível descrever as condições do escoamento superficial, quanto a sua concentração, convergindo ou divergindo ou não concentrando o fluxo

de água, sendo denominadas de convergentes ou divergentes ou planares, respectivamente (VALERIANO, 2008). Da combinação entre as curvaturas verticais e horizontais, é possível indicar nove formas resultantes: planares retilíneas; convergentes retilíneas; divergentes retilíneas; planares côncavas; convergentes côncavas; divergentes côncavas; planares convexas; convergentes convexas; e divergentes convexas.

Quanto à relação entre a ação das águas da chuva e as formas de relevo, tem-se geralmente que as características topográficas do relevo afetam a energia de transporte da água, em função dos comprimentos de rampa, das declividades e das formas das vertentes. Por exemplo, os perfis côncavos são mais vulneráveis aos processos erosivos lineares que os convexos (BERTONI; LOMBARDI, 2005).

A observação da curvatura vertical auxilia na compartimentação geomorfológica, pois a variação da declividade pode refletir tanto os processos de formação do relevo quanto às condições do substrato rochoso em associação com os materiais da cobertura pedológica (VALERIANO, 2008). A variação da declividade pode atuar acelerando ou desacelerando o fluxo, afetando a energia interativa entre a água e a superfície de escoamento, intervindo diretamente no potencial erosivo da água, nos processos de acúmulo de água e no transporte de compostos minerais e de matéria orgânica, associados à atuação das forças da gravidade.

Em suma, as formas do terreno associadas à intersecção entre as curvaturas horizontais e verticais definem o curso do escoamento superficial das águas, fazendo com que o fluxo de água seja convergente ou divergente. Essas formas influenciam também a aceleração ou desaceleração das águas do escoamento, interferindo, assim, na evolução dos processos erosivos.

No estudo realizado por Romão (2006), verificou-se que a análise da curvatura da vertente é importante na distinção de feições diagnósticas de processos erosivos ou de tendência à formação de depósitos. Ou seja, ao longo de uma curvatura do perfil convexa, a tendência do fluxo na vertente é sofrer aceleração, pois o ângulo aumenta à medida que o fluxo segue vertente abaixo. No caso da curvatura do perfil côncava, na qual o ângulo de inclinação diminui vertente abaixo, o fluxo tende a desacelerar no sopé dessa vertente. Quando se observa a tendência em relação à curvatura plana, percebe-se que o escoamento superficial tende a ser concentrado em uma curvatura plana côncava e disperso na curvatura convexa.

Por meio da curvatura horizontal, avalia-se a convergência ou divergência dos fluxos em determinada área. O potencial de ocorrência de processos erosivos é aumentado pela concentração de fluxo em curvaturas convergentes, ao passo que, nas curvaturas divergentes, está relacionado à ocorrência de processos erosivos difusos ou laminares. Na bacia do Ribeirão Barreiro (Figura 3), observa-se que erosões lineares parecem estar associadas, em sua maioria, às áreas de convergência de fluxo, enquanto que as laminares se encontram, em geral, nas vertentes divergentes.

Medeiros (2014) verificou que é grande a influência da curvatura vertical sobre o escoamento superficial, estando diretamente ligada à aceleração e desaceleração dos fluxos de água. O fluxo tende a acelerar nas curvaturas verticais retilíneas e a desacelerar nas curvaturas côncavas. No que se refere à desaceleração do fluxo, esse fato está associada à deposição de material. Tem-se maior tendência de aceleração do fluxo nas curvaturas verticais convexas, em especial na transição da curvatura convexa para a retilínea, o que tende a turbulência no sopé dessas vertentes, auxiliando na ocorrência de processos de erosão regressiva.



Figura 3. Visão geral da Bacia do Ribeirão Barreiro- GO.

Na bacia do Ribeirão Barreiro (Figura 4), estudada por Medeiros (2014), é notória a ocorrência de erosões laminares nas formas divergentes retilíneas, que coincidem com terrenos ondulados a suave-ondulados enquanto as erosões lineares são mais frequentes nas formas convergentes côncavas e convergentes retilíneas. Vale ressaltar a concentração de processos erosivos nas vertentes mais altas, já que, nesses locais, o escoamento é acelerado devido à forma do terreno.

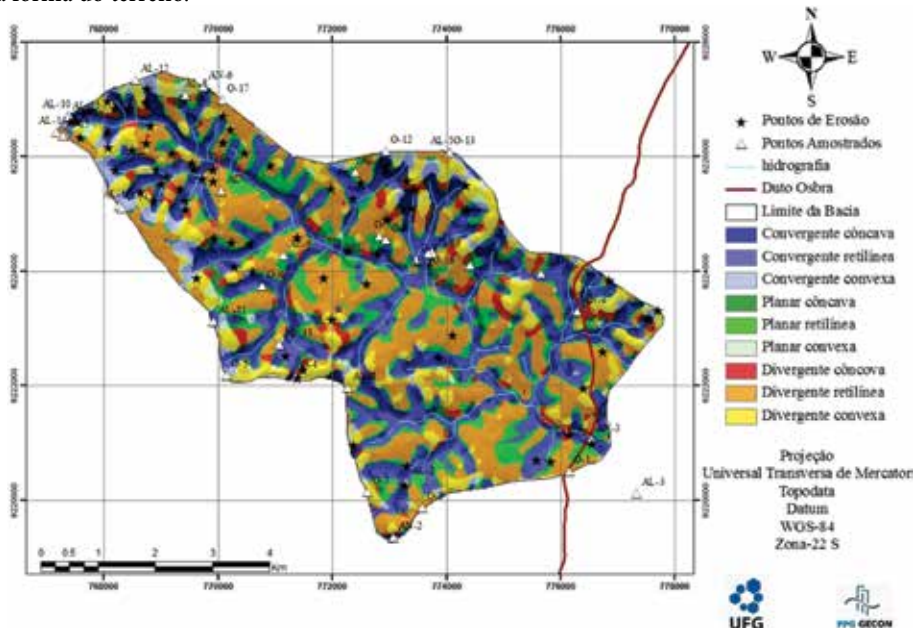


Figura 4. Mapa de Forma do Terreno da Bacia do Ribeirão Barreiro- GO. (SRTM (Banda X) (Medeiros, 2014).

2.5 Características das chuvas

Entre os fenômenos que regem o ciclo hidrológico, a precipitação apresenta-se como um dos aspectos de maior relevância para as obras de engenharia. O excesso de chuva em uma determinada região pode gerar transtornos imensos para a sociedade e incalculáveis danos ambientais, tais como: deslizamentos de encostas; alagamentos e inundações; rompimento de barragens; interdições de serviços públicos, a exemplo de transportes, distribuição de energia elétrica, gás e água.

A escassez de chuva também pode propiciar problemas de engenharia, como o perecimento da vegetação de cobertura do solo, expondo-o a processos de erosão superficial ou possibilitando a sua compactação de superfície por atuação da sucção que se amplia. Nos taludes e encostas, podem ainda surgir trincas de tração que facilitam a infiltração concentrada da água e pode, ao mesmo tempo, criar condições para atuação de empuxo instabilizador do maciço, ou simplesmente criar zonas de instabilidade localizadas. Todos esses aspectos, apesar da maior umidade relativa do ar próximo aos reservatórios, podem contribuir para a deflagração ou intensificação dos processos erosivos das margens dos reservatórios quando das precipitações pluviométricas.

Em relação aos eventos pluviométricos, três aspectos principais são analisados em uma determinada chuva: a altura pluviométrica; o tempo de duração da chuva e o período de retorno. A altura pluviométrica ou pluviosidade (P), constantemente expressa em milímetros, representa a altura de lâmina d'água acumulada sobre uma superfície horizontal plana e impermeável, ou seja, representa o volume total de chuva em uma determinada área.

O tempo de duração da chuva (td), constantemente expresso em minutos ou horas, é bastante utilizado para determinar a intensidade (i) de um evento pluviométrico em questão, determinando assim a quantidade de chuva por intervalo de tempo, mm/min ou mm/h.

Já o período de retorno (Tr), expresso em anos, representa a frequência com que uma determinada chuva costuma ocorrer. Quanto maior for a magnitude P ou i de uma determinada chuva, maior será o Tr desse evento.

De forma geral, precipitações de baixa intensidade tendem a ser de longa duração, com períodos de retorno baixos. Tais eventos pluviométricos não costumam desencadear processos erosivos superficiais, pois, como sua intensidade é baixa, os processos de infiltração do solo costumam ser mais acentuados, conseqüentemente, com recarga do lençol freático. Essas chuvas são as principais responsáveis pela vazão de base dos rios, ou seja, pela sua perenidade.

Já as chuvas de curta duração e com elevado período de retorno são as que apresentam maior intensidade pluviométrica. Os solos, em geral, não conseguem absorver tamanho volume de água em um curto espaço de tempo, resultando em um elevado volume de escoamento superficial, ou seja, aumentando o poder de erosividade da chuva.

As características das chuvas, tais como, sua distribuição, duração e intensidade assumem grande relevância na ocorrência e evolução das erosões em suas diferentes formas. Elas não podem, no entanto, ser vistas de modo isolado, mas sim em processo de constante interação com o solo que, por suas características, responde de forma distinta aos diferentes tipos de chuva. Por exemplo, abstraindo-se aqui questões como a morfologia do terreno e sua cobertura, precipitação de pequena intensidade e duradoura faz variar, de modo progressivo e continuado, por meio da infiltração da água, o grau de saturação do solo. Mas, aumentando-se o grau de

saturação do solo, além da interferência direta na velocidade de fluxo, altera-se a sucção e/ou capilaridade nele atuante e, por consequência, sua resistência se torna menor. Esses eventos facilitam a ocorrência do processo erosivo e conferem ao solo um novo estado hídrico, estado esse que assume grande relevância frente às precipitações torrenciais.

Tendo em vista o processo de infiltração e o aumento do grau de saturação do solo, chegará um estágio em que a fase ar se torna descontínua, fazendo interferir no processo outro fator que não é a queda de sucção e resistência do solo. Com a oclusão da fase ar, diminui-se a taxa de infiltração e, por consequência, amplia-se a lâmina d'água e sua erosividade.

Conjugando-se os dois aspectos – diminuição da resistência com a redução da sucção e oclusão da fase ar – potencializa-se a erosão do solo quando se amplia a intensidade da precipitação. No entanto, essa condição hídrica, que relaciona a erodibilidade do solo à erosividade da água que flui na superfície do terreno, nem sempre é a mais crítica ou se constitui em fator único a ser considerado na avaliação da erosão do solo decorrente da precipitação. Isso porque, em situações de intensa precipitação, a presença de menores umidades e, por consequência, maiores sucções atuantes no solo, podem potencializar a erosão. Nesse caso, presente a lâmina d'água, a água, ao se infiltrar, gera na fase ar uma pressão positiva com elevado potencial desagregador, podendo, assim, potencializar a ocorrência do fenômeno erosivo.

Portanto, a relação entre a precipitação e a ocorrência de erosão do solo é dotada de certa complexidade, porém, de fácil entendimento para que se proceda às ações preventivas. Por exemplo, é importante garantir a drenabilidade do maciço e a redução da velocidade de escoamento superficial como meios de ações preventivas, o que pode ser conseguido por meio da cobertura apropriada do solo e da definição, quando possível, de uma morfologia adequada para o terreno.

Finalmente, é possível perceber que o balanço hídrico assume papel de grande relevância para a compreensão da erosão hídrica e, dessa forma, faz-se oportuno sua avaliação em períodos de tempo mais curtos, por exemplo, 10 a 15 dias. Referida avaliação se deve ao fato de que a interação solo-atmosfera se processa de modo continuado, levando a variações cotidianas da umidade de equilíbrio do solo e, por consequência, de sua sucção, com impacto direto em sua erodibilidade.

2.6 Propriedades do solo

Como já colocado, os processos erosivos ocorrem em função da erosividade da água e da erodibilidade do solo, somando-se a esses fatores a pressão na fase ar desagregadora do solo, que surge quando da infiltração da água da chuva. A composição químico-mineralógica e a constituição estrutural do solo são elementos determinantes na deflagração da erosão e para sua evolução, relacionando-se ao tipo de solo formado e às suas condições de existência. A seguir, em caráter de ilustração, são discutidos alguns aspectos que relacionam o tipo, características e propriedades do solo ao seu potencial erosivo.

Na Figura 5, são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para um Cambissolo e um Latossolo com (CD) e sem (SD) o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio. Os gráficos obtidos para o Cambissolo indicam agregação de partículas superiores a 0,075mm quando em presença do defloculante hexametáfosfato de sódio usado com a finalidade in-

versa, ou seja, obter a defloculação e desagregação do solo. Esse comportamento já foi igualmente verificado para solos do Distrito Federal, apresentando ilita em sua composição mineralógica (GUIMARÃES, 2002) e argilomineral, este também presente no Cambissolo. Essa análise comparativa da granulometria dos dois solos deixa clara a importância da composição químico-mineralógica do solo e da química do meio, quando são analisados as propriedades e o comportamento dos solos tropicais.

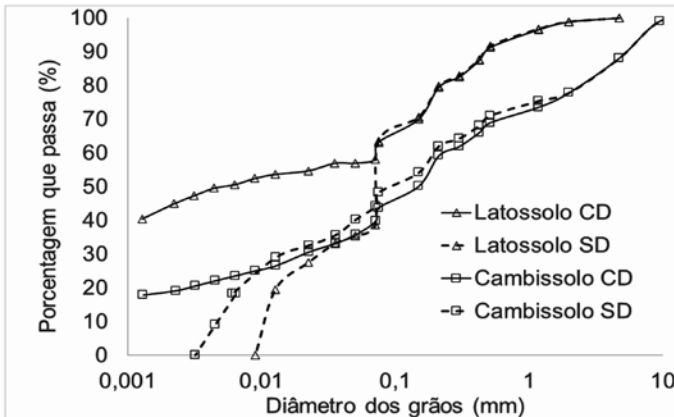


Figura 5. Granulometria de um cambissolo e um latossolo submetido a análise granulométrica com (CD) e sem (SD) o uso de defloculante (Almeida, 2014).

Na Figura 6, são comparadas as curvas granulométricas obtidas por meio de ensaio de peneiramento, com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio em amostras secas ao ar, com as curvas granulométricas obtidas por peneiramento da massa de solo erodida lavada na peneira #200 após os ensaios de *Inderbitzen*. Essas curvas são coincidentes no Latossolo e não coincidentes para o Cambissolo, com destaques para as partículas maiores que 0,6 mm. Essa diferença é até mais importante que a registrada entre os ensaios granulométricos realizados com e sem o uso de defloculante, o que aponta para a existência de mais interferências além daquela registrada quando do uso do defloculante no material contendo ilita (Cambissolo). É possível estimar que o tratamento dado ao Cambissolo na fase de preparação da amostra para o ensaio de granulometria tenha gerado certa agregação de partículas não desfeitas durante as análises granulométricas sem o uso de defloculante. A secagem prévia do solo pode, em função de sua composição, gerar dois efeitos antagônicos: contribuir para a desagregação do solo ou solidificar as agregações nele presentes, dependendo de sua composição químico-mineralógica e da heterogeneidade dos minerais que compõem os agregados. No presente caso, o Cambissolo teria solidificado agregações, ampliando a diferença na fração areia grossa entre o solo carregado do ensaio de *Inderbitzen* e os resultados oriundos da análise granulométrica.

Portanto, as análises ora apresentadas para os dois solos mostram a importância de se preservar ao máximo a condição do solo em campo, ao se fazer a avaliação de erodibilidade em laboratório.

Na Figura 7, são apresentadas as curvas características obtidas para os dois solos, bem como os valores de sucção e saturação para os quais foram realizados os ensaios de *Inderbitzen*. Essas curvas características revelam uma distribuição de poros bimodal para o Latossolo

e uma distribuição de poros bem graduada para o Cambissolo. Cabe destacar que, para o Cambissolo, a partir da sucção de 1000 kPa ($S_r < 60\%$), ocorre um predomínio das forças de adsorção em detrimento da energia capilar. Já no Latossolo, têm-se macroporos relativamente bem distribuídos até a pressão de 30 kPa. Entre 30 kPa ($S_r = 50\%$) e 3000 kPa ($S_r = 32\%$), tem-se uma rápida graduação dos poros até atingir a microporosidade, a partir de 3000 kPa, assumindo novamente uma distribuição de poros bem graduada.

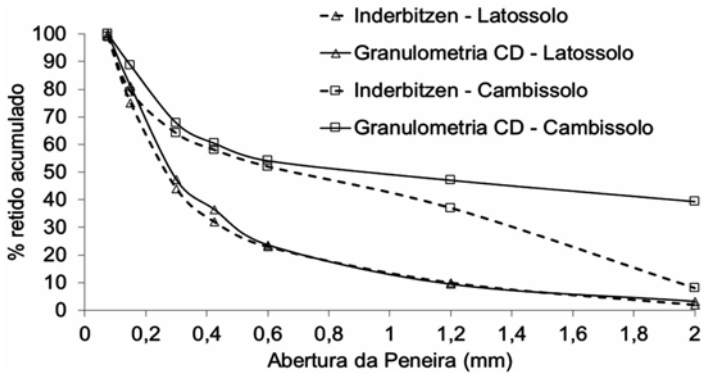


Figura 6. Porcentagem retida acumulada nas peneiras: comparação entre o ensaio de *Inderbitzen* e a curva granulométrica com defloculante (modificado de Almeida, 2014).

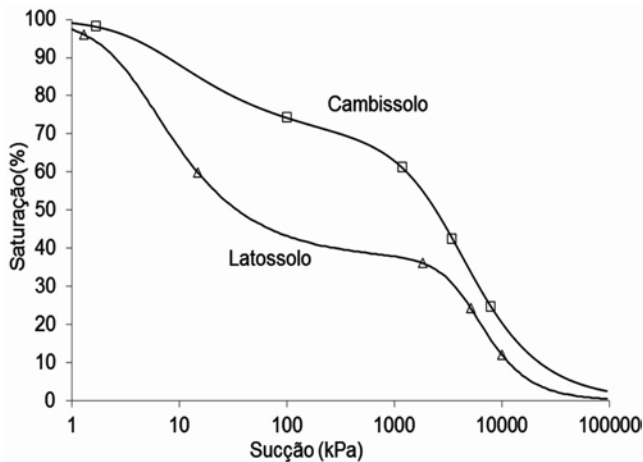


Figura 7. Curvas características do latossolo e do cambissolo (modificado de Almeida, 2014).

Na Figura 8, são apresentados os resultados obtidos no ensaio de *Inderbitzen* para o Cambissolo (a) e para o Latossolo (b). Analisando-se o Latossolo, observa-se perda de solo mais importante para $S_r = 24\%$, o que corresponde, observando-se a curva característica (Figura 7), ao início da entrada de ar nos microporos, ou seja, ainda existe certo elo entre a água dos agregados e o meio exterior, permitindo-se a ação succionante sobre a lâmina d'água e gerando-se importante pressão neutra positiva na fase ar e significativa erodibilidade do solo. Já para $S_r = 12\%$, a entrada de ar nos microporos é significativa, e perde-se o elo da água interior com a água da lâmina d'água do ensaio, fazendo cair enormemente a erodibilidade do

solo. Para $S_r = 36\%$, a sucção é significativa e, por consequência, a pressão gerada na fase ar com a infiltração da lâmina d'água também. Para $S_r = 60\%$, a sucção é pequena e já se encontra atuando nos macroporos, gerando, portanto, pequena pressão na fase ar e, desse modo, pequena erosão. Para $S_r = 96\%$, certamente o solo já apresenta oclusão na fase ar; a sucção já não contribui ou contribui muito pouco para a resistência do solo, e a erosividade da água atua de modo pleno, contrapondo-se apenas ao comportamento mecânico do solo saturado (c' e ϕ'). Cabe lembrar que, na ausência da sucção, a contribuição do ângulo de atrito (ϕ') torna-se, por se tratar de solo superficial, desprezível, sendo relevante apenas a coesão (c') no combate à erosão.

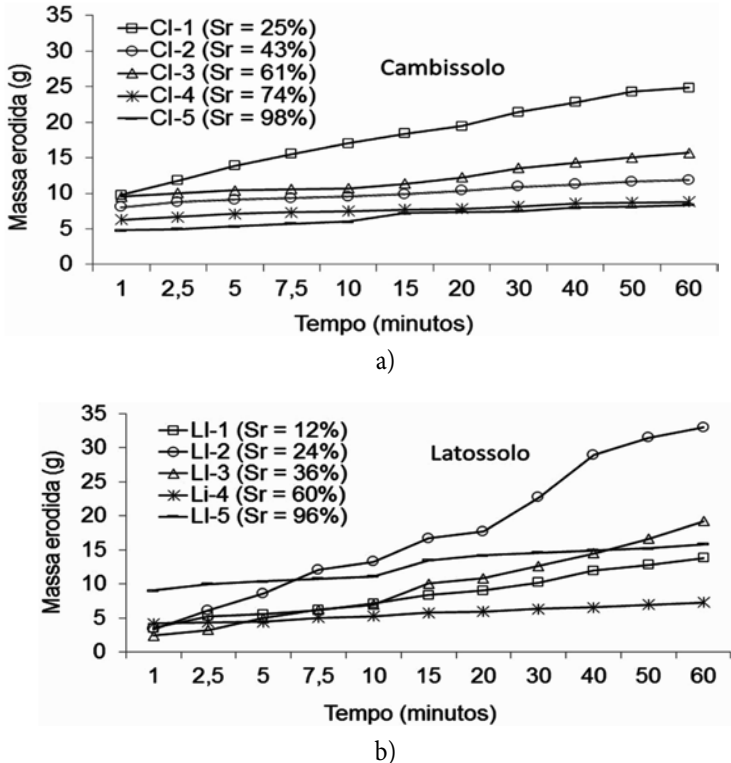


Figura 8. Resultados do ensaio *Inderbitzen*: a) Cambissolo; b) Latossolo (modificado de Almeida, 2014).

Também é possível o entendimento do comportamento do Cambissolo, com base em sua curva característica de retenção de água. A maior erodibilidade foi obtida no ensaio de *Inderbitzen* executado no solo, possuindo $S_r = 25\%$. Esse grau de saturação corresponde à entrada do solo no regime de sucção residual, conforme se observa da curva característica mostrada na Figura 7, situação que conduz as partículas a se desvincularem umas das outras por meio da energia de adsorção que lhes é comum, o que potencializa a erodibilidade do solo. Para $S_r = 43\%$, a sucção encontra-se no domínio dos microporos, o que possibilita, conforme já pontuado para o latossolo, pequena geração de pressão positiva na fase ar. Essa pressão é mais ampla para $S_r = 61\%$, uma vez que agora já se estabelece certa continuidade hídrica e propicia-se ao solo maior erodibilidade. Para $S_r = 74\%$, a pressão na fase ar já não

é tão significativa, e para $S_r = 98\%$, com a provável oclusão da fase ar, apenas a resistência do solo saturado passa a interceder na erodibilidade.

Os resultados obtidos por Almeida (2014), ao estudar a desagregabilidade desses dois solos em consequência de submersões totais e parciais progressivas até a inundação total, corroboram essa análise e a ela se somam para indicar que, no caso dos reservatórios, tendo em vista que as variações do nível d'água se dão de modo relativamente lento, as erosões de borda ocorrerão, sobretudo, em razão do solapamento das bases das encostas provocado pelo impacto das ondas. No entanto, a formação de fluxo de água no interior das ravinas e voçorocas em face de precipitações nas margens dos reservatórios levará, em muitos casos, conforme análise dos resultados dos ensaios de *Inderbitzen*, ao solapamento e a rupturas das bases dos taludes e à ampliação das erosões.

Comparando-se esses resultados com as análises morfológicas dos terrenos, observa-se que, considerando-se o tipo de solo e analisando-se sua curva característica de retenção de água, é possível entender os mecanismos de erodibilidade de cada tipo de solo que ocorre em determinada morfologia do terreno, para uma atuação preventiva, evitando-se que a erosão ocorra, ou mesmo minimizando a intensificação de processos erosivos existentes. Assim, a partir da apresentação dessas questões gerais, discorre-se a seguir sobre os processos associados à evolução de ravinas e voçorocas.

3 Processo evolutivo de ravinas e voçorocas

Conforme já pontuado, o processo evolutivo das erosões lineares está ligado ao fator tempo, iniciando-se pela formação dos sulcos, que evoluem para ravinas e alcançam o estágio de voçoroca (podendo atingir o nível freático). Temporalmente, em cada uma dessas fases, a erosão pode passar por períodos de estabilidade curtos ou longos. Por exemplo, na imagem da Figura 9, aparecem antigas cicatrizes de erosões geológicas reativadas por ações antrópicas ligadas ao uso agrícola do solo.



Figura 9. Erosão às margens da rodovia GO-118 (Foto: arquivo pessoal José Camapum de Carvalho, 17-07-2012).

A compreensão dos mecanismos que levam à deflagração, retomada e continuidade dos processos erosivos é relevante para a definição de medidas preventivas e de controle, seja nas erosões continentais, em borda de reservatório e nas costeiras. As discussões que se seguem, apesar de, em sua maioria, se fundamentarem em estudos realizados sobre ravinas, voçorocas e erosões em forma de anfiteatro continentais, também se voltam para as erosões de bordas de reservatórios.

Lima (1999), ao estudar erosões em forma de anfiteatro da cidade de Manaus, estado do Amazonas (Figura 10), constatou que o modelo evolutivo delas, com paredes bastante verticais e quedas de blocos, associava-se a trincas e falhas de origem neotectônica. A deflagração dos processos erosivos estava geralmente associada ao uso e ocupação do solo e ao lançamento de drenagens das águas pluviais. A água oriunda da drenagem de superfície se infiltrava nas fissuras oriundas das falhas geológicas, gerando empuxos que provocavam a queda de blocos. Com as quedas dos blocos, aliviavam-se as tensões no maciço restante, o que propiciava a ampliação das falhas, facilitando, assim, a infiltração da água de superfície, acarretando novas quedas de blocos. Destaca-se que, em um primeiro momento, a queda dos blocos, proporcionado alívio de tensões e ampliando as falhas, paralisava o processo de avanço da erosão, que era depois retomado com novas quedas de blocos. Portanto, o modelo evolutivo, nesse caso estudado, encontrava-se associado à geologia estrutural.



Figura 10. Voçoroca Distrito, Manaus, estado do Amazonas, maio de 1998. (Foto: arquivo pessoal de Mari-saides Cruz Lima).

No caso das bordas dos reservatórios, em relação à origem dos processos erosivos – embora possa também se associar ao uso do solo das margens, conduzindo a água para falhas e trincas estruturais existentes no maciço e assemelhando-se ao caso de Manaus – a mais frequente será a deflagração do processo por meio do solapamento da base do maciço, para, em seguida, ter esse mecanismo associado ao alívio de tensões, assemelhando-se, nesse aspecto, ao caso de Manaus. Na borda de reservatório, a erosão pode assumir a forma de anfiteatro ou ser mais linear, seguindo geralmente a forma do contorno da lâmina d'água, pois a esta corresponde o avanço do solapamento das bases dos taludes. Outros mecanismos podem se associar ao solapamento da base do talude, fazendo avançar a erosão, como degradações do maciço, oriundas das variações no nível do reservatório, impondo-se fluxos internos que o degradam. Também o surgimento de trincas, em consequência de molhagens e secagens do maciço, pode ocasionar o avanço da erosão.

Nas bordas dos reservatórios, a erosão pode ainda avançar devido ao uso do solo e à falta de ações preventivas que impeçam o direcionamento do fluxo superficial para as margens submetidas a processos erosivos, como ocorre com o avanço da erosão em área destinada à pecuária, nas margens do reservatório UHE Itumbiara (Figura 11).



Figura 11. Erosão de borda no reservatório UHE Itumbiara. (Foto: arquivo pessoal de Maurício Martines Sales).

Lima (1999) verificou que o ensaio de pinhole constitui-se em técnica de ensaio bastante indicada para se avaliar a degradação do maciço, em face do fluxo interno de água, seja o meio saturado ou não saturado, pois, além de permitir comparar a permeabilidade nas direções vertical e horizontal, segundo a direção de moldagem dos corpos de prova, ainda permite avaliar a degradabilidade do maciço em consequência do fluxo (SANTOS, 1997).

Outro ensaio relevante é o de desagregação, pois permite avaliar o potencial de solapamento da base do maciço colocada em contato com a lâmina d'água do reservatório. Já os ensaios de *Inderbitzen*, dadas as características desse tipo de erosão em anfiteatro, mostram-se pouco relevantes, exceto quando associados à curva característica, como já mencionado no item 2.6, situação que permite avaliar o efeito da frente de saturação na erodibilidade do solo.

Em relação às erosões lineares, que se formam nas margens dos reservatórios, transversalmente ao contorno da lâmina d'água e em consequência do uso do solo e/ou dos fluxos superficiais da água em sua direção, será agora avaliado como se processa sua evolução.

A concentração do fluxo no interior das ravinas e voçorocas, conjugando-se com as características do maciço e do extrato saprolítico ou rochoso de fundo, condiciona a forma de evolução dessas erosões lineares. Tradicionalmente, a evolução das erosões se enquadra em dois modelos: o de seção transversal em V e o de seção transversal em U. Mortari (1994), no entanto, ao estudar erosões do Distrito Federal, propõe uma terceira forma de seção transversal, o modelo encaixado. A Figura 12 apresenta comparativamente os dois modelos. Segundo Mortari (1994), os saprólitos de ardósia e os metarritmitos da região do Distrito Federal apresentam seus extratos bastante inclinados face à tectônica que sofreram, com mergulho das camadas da ordem de 40° a 60°. Segundo o mesmo autor, quando o fluxo atinge esse contato, devido à alternância das camadas resistentes com as menos resistentes, à inclinação e à própria foliação característica desses metassedimentos, ocorre o encaixe do fluxo, que se aprofunda seguindo o mergulho das camadas menos resistentes. Ao se encaixar

e condicionar o fluxo, restringe-se o avanço lateral da erosão, fazendo com que ela assuma a forma de V encaixada.

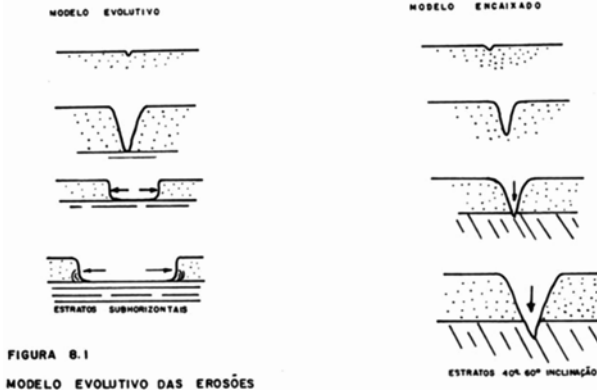


Figura 12. Modelos evolutivos das erosões lineares (Mortari, 1994).

Segundo Mortari (1994), estabilizado o fundo da erosão linear, os taludes são capazes de encontrar uma inclinação estável em função de sua altura (Figura 13).

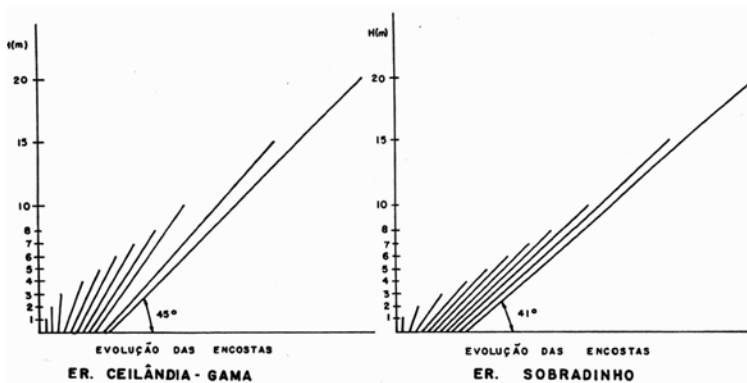


Figura 13. Evolução da inclinação dos taludes das erosões em função das alturas (Mortari, 1994).

Lima (2003), no entanto, mostrou que a degradação do maciço por meio de fluxo em meio saturado e não saturado conduz, a médio e longo prazo, a sua fragilização e a consequentes rupturas de taludes, suavizando-o. Portanto, deve-se entender que as inclinações dos taludes, em função de suas alturas mostradas na Figura 13, são representativas apenas do momento estudado por Mortari (1994), mas devem, em princípio, passar por processos de maior suavização em função do tempo para as alturas analisadas.

Lima (2003), ao estudar a erosão por ela intitulada como Ceilândia 1, haja vista sua localização próxima à cidade satélite de mesmo nome (Figura 14), mostra que a atuação do fluxo saturado e não saturado no maciço ao longo do tempo conduz a sua degradação física, química e mineralógica, afetando a resistência ao cisalhamento do solo. Essa autora estudou amostras de solo coletadas ao longo de perfis situados a diferentes distâncias das faces dos taludes de ravinas e voçorocas.

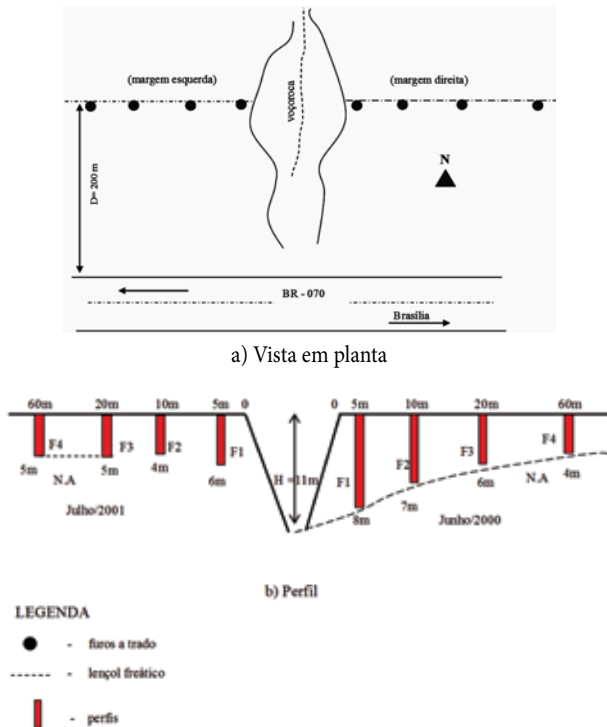


Figura 14. Croqui e esquema de retirada de amostras; a) vista em planta; b) vista em perfil (Lima, 2003).

Lima (2003) verificou, por meio de ensaios realizados com o uso de defloculante em solos da margem direita da erosão, que, devido ao fluxo, proporcionalmente, o teor de argila diminui e o de areia aumenta em direção à face do talude da voçoroca (Figura 15).

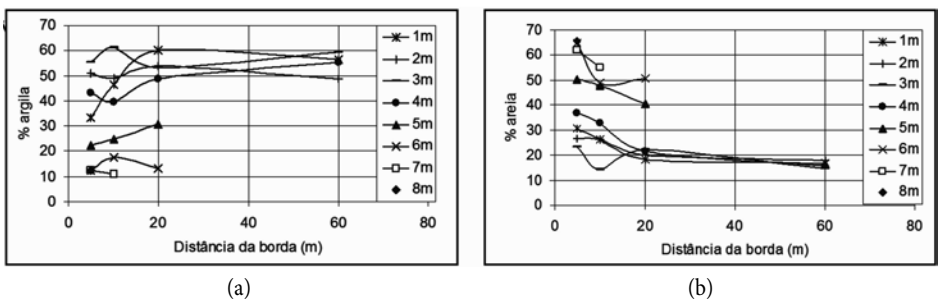
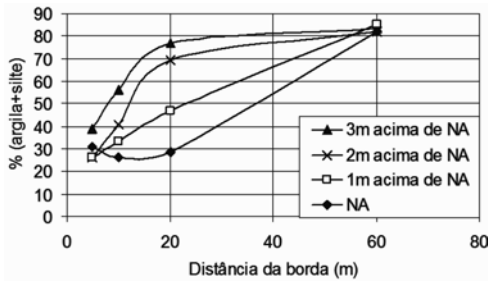


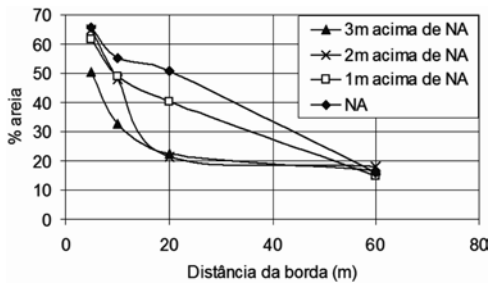
Figura 15. a) Teor de argila; b) teor de areia (modificado, Lima 2003).

Devido à influência da incisão gerada pela erosão no maciço, o lençol freático foi atingido em posições mais profundas à medida que se aproximava da voçoroca, condicionado pela sua profundidade. Para avaliar a influência do freático e do meio onde ocorre o fluxo na degradação do maciço, foram traçados os gráficos das porcentagens de finos argila + silte (Figura 16a) e de areia (Figura 16b) em relação ao lençol freático, ou seja, a 1 m, 2 m e 3 m acima deste. Destaca-se que o nível d'água inicial encontrava-se a 1 m de profundidade a partir

da superfície no perfil, conforme encontrado no Furo 4 de amostragem. O formato distinto das curvas obtidas para as amostras coletadas próximas e afastadas no nível d'água atual, apesar de confirmar a degradação nos meios saturados e não saturados, aponta para influências distintas entre as duas situações.



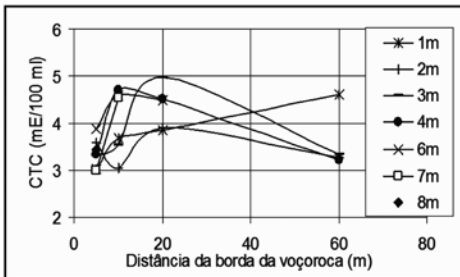
a) Fração fina (argila + silte)



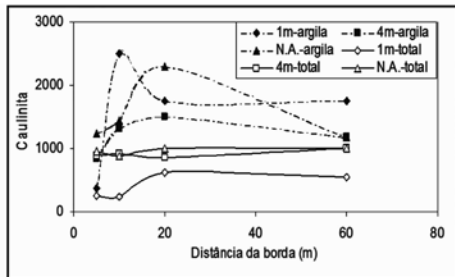
b) Fração areia

Figura 16. Influência do nível freático na degradação do maciço (Lima, 2003).

A Figura 17, obtida pela mesma autora, mostra que também ocorre a degradação química (a) e mineralógica (b) do maciço junto aos taludes da voçoroca, em consequência dos fluxos em condição não saturada e saturada. Por se tratar de perfil de solo tropical, optou-se por apresentar apenas o gráfico mineralógico referente à caulinita. Nesse gráfico, encontram-se os resultados obtidos para a amostra total e para lâminas orientadas da fração argila, os quais confirmam a lixiviação do solo próximo aos taludes da voçoroca.



(a)



(b)

Figura 17. a) Capacidade de troca catiônica (CTC); b) teor de caulinita em relação à distância do talude da voçoroca (modificado Lima, 2003).

Para avaliar a influência da degradação físico-química e mineralógica no comportamento mecânico dos solos junto a essa erosão, Lima (2003) realizou dois poços de amostragem (Figura 18), um localizado a 5 m da erosão e o outro situado a 20 m, adotando-se como limite de execução o nível d'água à época da amostragem.

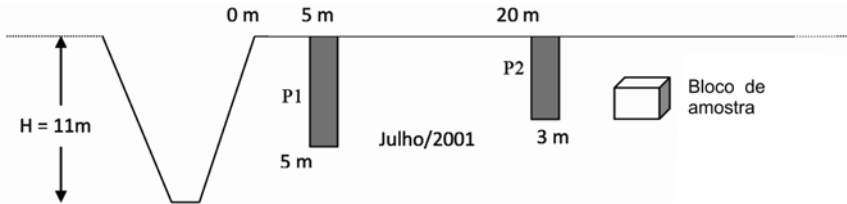


Figura 18. Poços de amostragem (Lima 2003).

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto para as amostras coletadas no poço 1 (P1), ao passo que a Tabela 2 traz os resultados obtidos para o poço 2 (P2). Nessas tabelas, H significa plano de ruptura na horizontal e V plano de ruptura na vertical, em ambos os casos, considerando-se o mesmo plano de referência no maciço. Esses resultados mostram que a degradação físico-química e mineralógica do maciço afeta o comportamento mecânico do solo. Para explicar as diferenças de comportamento entre os dois planos, vertical e horizontal, Lima (2003) apresenta a Figura 19, indicando que o fluxo nos locais de realização dos dois poços é distinto e intervém no processo de alteração do solo.

Tabela 1. Parâmetros de resistência obtidos para o poço 1 (Lima, 2003).

Prof. (m)	Natural - H		Inundado - H		c - c'		Inundado - V	
	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ (°)	Δc (kPa)	Δc (%)	c' (kPa)	ϕ (°)
1	45	41,4	1,6	21,6	43,4	96,4	7,5	21
3	82	43,5	22,5	31,5	59,5	72,6	-	-
5	-	-	20	30,3	-	-	18,9	25

Tabela 2. Parâmetros de resistência obtidos para o poço 2 (Lima, 2003)

Prof. (m)	Natural - H		Inundado - H		c - c'		Inundado - V	
	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ (°)	Δc (kPa)	Δc (%)	c' (kPa)	ϕ (°)
1	35,6	24,7	14,3	21,3	21,3	59,8	6,2	25,6
3	116,7	50,8	26,8	25,1	89,9	77	13,4	31,7

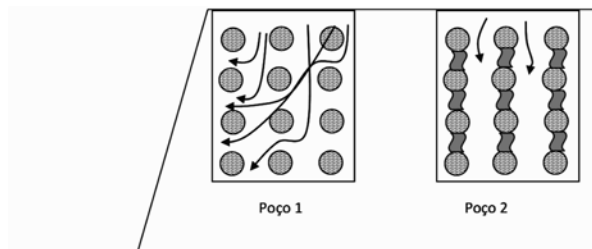


Figura 19. Atuação do fluxo nas ligações das partículas de solo (Lima, 2003).

Na Figura 20, Lima (2003) mostra ainda que esse fluxo na zona não saturada se altera segundo a época do ano, mantendo-se similar e variando apenas com o nível freático na zona saturada.

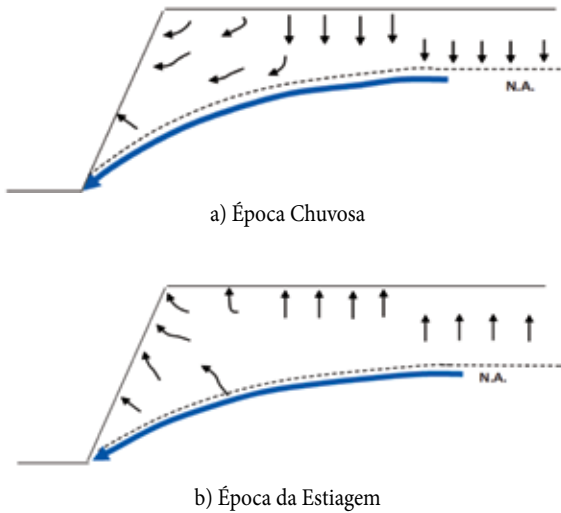
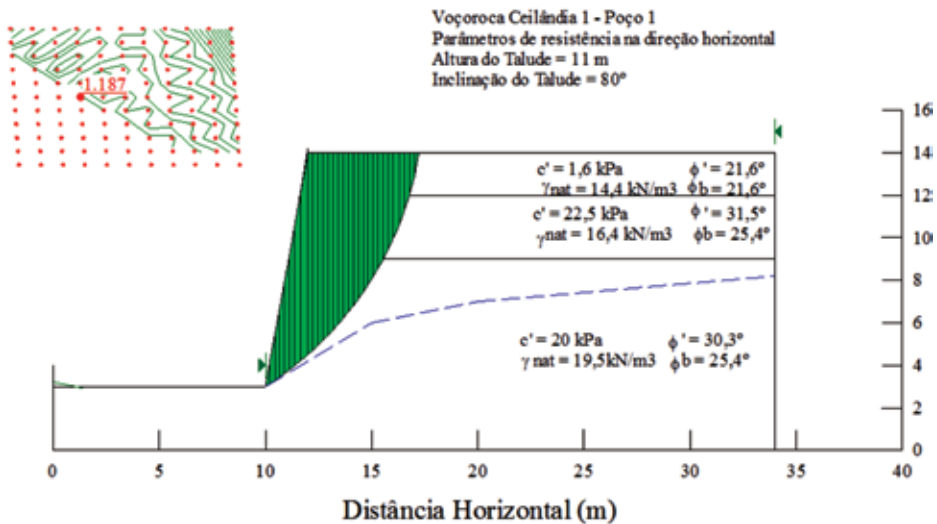


Figura 20. Variação do fluxo segundo a época do ano (modificado, Lima 2003).

Utilizando os parâmetros de resistência obtidos para o solo dessa erosão, Lima (2003) mostrou, por meio de análises de estabilidade de talude e considerando-se uma profundidade da voçoroca igual a 11 m, que a degradação do maciço afeta a estabilidade do talude (Figura 21). Essa figura mostra que o fator de segurança obtido com os parâmetros oriundos do solo coletado próximo à voçoroca (Poço 1) é inferior ao obtido com os parâmetros provenientes do solo coletado distante da voçoroca (Poço 2).



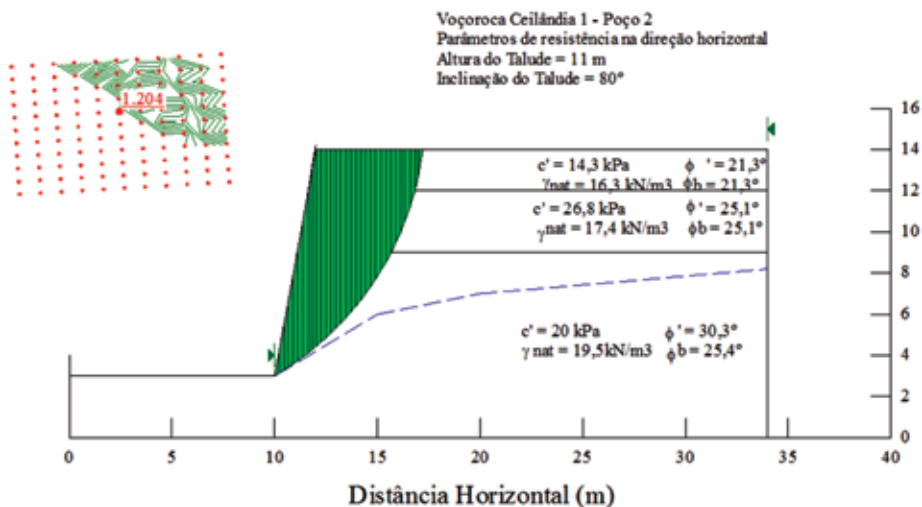


Figura 21. Análise de estabilidade de talude.

O conjunto de análises apresentado neste item mostra que as erosões de borda de reservatórios dependem de vários fatores, sendo imprescindível o entendimento sobre eles para a definição de ações preventivas e mitigadoras. Os estudos supracitados mostram que a erodibilidade dos solos e os mecanismos de avanço dos processos erosivos não são estáticos no tempo e se aplicam perfeitamente às erosões em borda de reservatório.

Considerações finais

As análises realizadas neste capítulo mostram a relevância de se considerar não só as propriedades e o comportamento do solo em um determinado momento, mas também o modo como ele se alterará ao longo do tempo em função de vários fatores, como a morfologia do terreno, a geologia estrutural, a atuação antrópica, entre outros.

O estado hídrico do solo, conforme mostrado ao longo deste capítulo, interfere diretamente na interface entre a erosividade da água e a erodibilidade do solo. A continuidade ou não da fase ar e os poros onde atua a sucção são definidores dessa erodibilidade.

O mapeamento das áreas dos entornos dos reservatórios e de suas áreas de influência, com demarcação dos processos erosivos existentes, bem como o acompanhamento durante a implantação e posterior à execução do empreendimento devem ser considerados nessas obras. Tratar um processo erosivo na fase de ravina de pequeno porte ou sulco é geralmente mais rápido e de menor custo. Já com a erosão no estágio de voçoroca, eliminar ou mesmo mitigar o problema é altamente custoso, complexo e muitas vezes inviável, além do enorme prejuízo gerado com o assoreamento reduzindo os volumes de água armazenados nos reservatórios.

As análises realizadas permitem ainda concluir que a gestão do reservatório e do seu entorno exerce papel de grande relevância na prevenção e mitigação dos processos erosivos.

Referências

- ALMEIDA, J.G.R. **Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO. 2014. 128 p.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LIMA, M. C.; MORTARI, D. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. In: 7º SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, ABGE. Goiânia – GO. **Documento eletrônico** em CD-ROM. 2001, 10 p.
- GUIMARÃES, R.C. Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. 2002. 183 p. Dissertação de Mestrado, **Publicação G.DM-091A/02**, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- LIMA, M.C. Contribuição ao estudo do processo evolutivo de voçorocas na área urbana de Manaus. 1999. 150 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, **G.DM. 057A/99**. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- _____. Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. 2003. 336 p. Tese de Doutorado. **G.TD. 017A/03**. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2003.
- MEDEIROS, G. F. **Susceptibilidade à erosão na alta bacia do ribeirão Barreiro – Alexânia-GO. 2014. 172 p.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- MORTARI, D. Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Distrito Federal. 1994. 199 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. **G.DM. 010A/94**. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade de Brasília, 1994.
- PRIMAVESI, A.B. **Erosão**. Série criação e lavoura nº 18. São Paulo: Edições Melhoramentos, 1952, 92 p.
- ROMÃO, P. A. **Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas – região de Goiânia - GO. 2006. 167 p.** Tese de Doutorado em Geotécnica. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- RUHE, R. V. **Geomorphology** (geomorphic processes and superficial geology). Boston: Houghton Mifflin, 1975, 246 p.
- SANTOS, dos R. M. M. Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia. 1997. 138 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 1997.
- VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008.

CAPÍTULO 5

Solos Não Saturados e os Processos Erosivos

Cezar Augusto Burkert Bastos
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Vinícius de Oliveira Kühn

Palavras-chave: Solos não saturados. Erosão. Sucção.

1 Introdução

A óbvia presença da água em processos de erosão hídrica pode levar à uma interpretação superficial do fenômeno, segundo à qual o processo erosivo pode ser adequadamente compreendido considerando o solo no estado saturado. No entanto, em se tratando de um fenômeno na superfície do terreno e envolvendo solos geralmente com boa condição de drenagem, este acontece geralmente em solos em estado inicial de não saturação. Incluem-se aí até mesmo os processos erosivos associados com a presença de reservatórios de barragens.

Dois processos erosivos se destacam e podem ser analisados de forma independente, quais sejam: a) a erosão deflagrada pela instabilidade de taludes de voçorocas e b) a erosão hídrica por fluxo superficial. Ambos os mecanismos ocorrem em condições de grau de saturação e sucção matricial que se alteram de maneira dinâmica. Portanto, a compreensão do comportamento hidráulico e mecânico dos solos em função destas variáveis de estado pode contribuir para o entendimento de processos erosivos.

Este capítulo é dividido em duas partes, sendo que cada uma tratará de dois aspectos associados com a erodibilidade de solos sob a luz de conceitos da mecânica dos solos não saturados. Na primeira seção será tratado o papel da não saturação na resistência ao cisalhamento de solos não saturados, propriedade fundamental para a compreensão dos vários mecanismos de erosão. Esta primeira parte é baseada no trabalho de Kühn (2014). Na segunda parte será apresentada a associação entre a não saturação do solo e processos de erosão hídrica superficial. Será discutida a previsão da erodibilidade, com foco específico nos mecanismos de erosão superficial. A segunda parte deste capítulo é em grande parte baseada no trabalho de Bastos (1999).

2 O papel da não saturação na resistência ao cisalhamento de solos

O processo de desenvolvimento de voçorocas e abordagens para o seu controle, passam pela avaliação da estabilidade dos seus taludes, que por sua vez depende do regime de fluxo,

distribuição de poropressões e resistência ao cisalhamento do material. Será apresentado a seguir um panorama destes temas, com especial atenção à características dos solos não saturados de regiões tropicais e suas peculiaridades.

2.1 Resistência ao cisalhamento de solos não saturados

A resistência ao cisalhamento dos solos saturados é geralmente descrita através da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, que utiliza o conceito de tensão efetiva. A inclinação da reta tangente aos círculos de Mohr que representam estados de tensão de ruptura corresponde ao ângulo de atrito efetivo, ϕ' , e a resistência para uma tensão nula é denominada coesão, c' , $(\sigma_f - u_w)_f$, a tensão normal efetiva na ruptura e τ_{ff} , tensão cisalhante na ruptura, da seguinte maneira:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)_f \tan \phi' \quad (1)$$

A determinação da envoltória do solo saturado busca reproduzir condições de solicitação de campo, como ensaios de cisalhamento direto adensados e drenados e ensaios triaxiais adensados e posteriormente cisalhados com ou sem drenagem. Ensaios triaxiais são geralmente considerados mais versáteis do ponto de vista de modelagem do comportamento do solo, uma vez que o estado de tensões e a deformação volumétrica são melhor determinados. No entanto, podem existir condições de solicitação em campo no qual o ensaio de cisalhamento direto seja mais representativo.

No caso de ensaios triaxiais, o estado de tensões correspondente à ruptura é determinado com base em curvas que relacionam a tensão desvio ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) e a deformação axial (ϵ). Outras quantidades podem ser utilizadas, como a razão de tensões (σ_1 / σ_3). A definição de condição de ruptura ao longo da curva tensão-deformação é função da aplicação que se deseja fazer da envoltória e da abordagem adotada para a modelagem constitutiva. Pode-se citar como opções mais comuns, a resistência máxima, a resistência para uma determinada deformação específica e a resistência no estado crítico. Como resultado final, tem-se uma envoltória que depende de vários outros fatores, tais como: natureza do contato entre os grãos, índice de vazios, tensão de pré-adensamento, bem como as condições de realização dos ensaios.

No caso de um solo não saturado, novas variáveis se somam às anteriormente citadas, formando um conjunto considerável de fatores. Um dos primeiros estudos sobre a influência da sucção na resistência de um solo pode ser atribuído a Donald (1956)¹ citado por Fredlund e Rahardjo (1993). O autor conduziu uma série de ensaios de cisalhamento direto em pedregulhos e areias finas não saturadas. Foi empregada uma caixa de cisalhamento direto modificada, onde poropressões de água (u_w) negativas foram aplicadas utilizando uma membrana semipermeável conectada a uma coluna de água suspensa. Conforme apresentado na Figura 1(b), foi verificado que à medida que a sucção matricial aumenta, ocorre um ganho de resistência ao cisalhamento até um valor máximo, a partir do qual se observa uma queda na resistência e posteriormente atinge-se um valor constante.

1 DONALD I. B. Shear Strength Measurements in Unsaturated Non-Cohesive Soils with Negative Pore Pressures. **Proc. 2st Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Christchurch, p. 41-46, 1956.

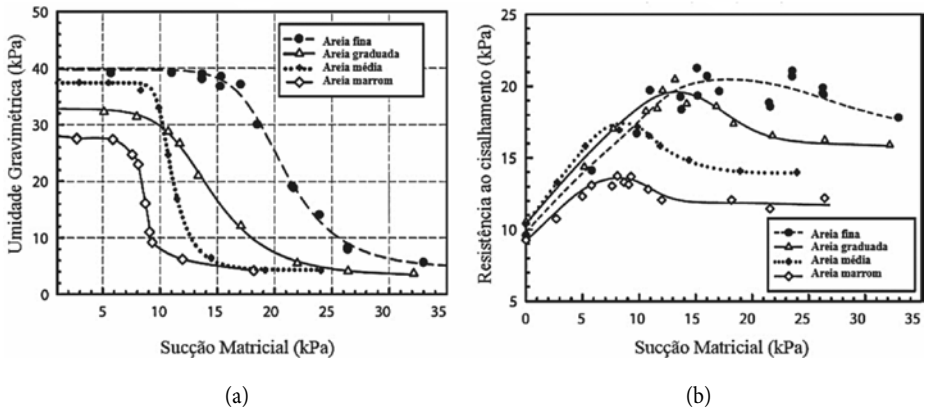


Figura 1. Donald (1956): a) CCSA, b) resistência ao cisalhamento com relação à sucção matricial (VANAPALLI, 2010 - modificado).

Observou-se também que quando a amostra era submetida à sucção baixa, estando ainda saturada, a resistência parecia aumentar em função da sucção aplicada, a uma mesma taxa que o obtido por um acréscimo na tensão efetiva. Ou seja, a eficiência da sucção aplicada era semelhante à eficiência da tensão efetiva no ganho de resistência. Na prática, essa observação significa que a sucção matricial em uma amostra ainda próxima da saturação possui uma capacidade de compressão do esqueleto sólido e de mobilização de resistência por atrito equivalente à das tensões efetivas em materiais igualmente saturados. Desta forma, sendo o grau de saturação um indicador da efetividade da sucção matricial na compressão do esqueleto sólido, tem-se que a evolução da resistência está relacionada à curva característica solo-água (CCSA), Figura 1(a).

Importantes estudos iniciais no campo da resistência ao cisalhamento de solos não saturados se confundem com as tentativas de estabelecer as variáveis de tensão do solo não saturado. Bishop (1959)², citado por Fredlund e Rahardjo (1993), propôs uma equação para a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados (Equação 2), empregando o conceito e tensão efetiva para solos não saturados:

$$\tau_{ff} = c' + [(\sigma_f - u_a)_f + \chi(u_a - u_w)_f] \tan \phi' \quad (2)$$

onde τ_{ff} é a resistência ao cisalhamento do solo não saturado; c' é a coesão efetiva; ϕ' é o ângulo de atrito interno efetivo; $(\sigma_f - u_a)_f$ é a tensão normal; $(u_a - u_w)_f$ é a sucção matricial e χ é um parâmetro dependente do grau de saturação (variando entre 0 e 1).

A equação de Bishop (1959) é equivante, do ponto de vista matemático, a outras proposições mais recentes que utilizam duas variáveis de tensão. Porém, existe uma característica conceitual importante nesta equação, que é o fato do estado de tensões ser definido como um estado de tensões efetivas, função de uma propriedade do solo.

2 BISHOP, A.W. **The principle of effective stress**, Technisk Ukeblad, Oslo, v. 106, n° 39, p. 859-863, 1959.

2.1.1 Fredlund, Morgenstern e Widger (1978)

Fredlund, Morgenstern e Widger (1978) propuseram uma equação de resistência ao cisalhamento para os solos não saturados fazendo uso das duas variáveis de estado de tensão estabelecidas anteriormente por Fredlund e Morgenstern (1977), quais sejam: a tensão normal líquida e a sucção matricial. A equação assim proposta é a seguinte:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (3)$$

O ângulo de atrito efetivo, ϕ' , é associado com a contribuição à resistência ao cisalhamento da tensão normal líquida. Outro ângulo, ϕ^b , é relacionado com a contribuição da sucção matricial à resistência ao cisalhamento. A envoltória de ruptura estendida para os solos não saturados pode ser plotada na forma de uma envoltória tridimensional (Figura 2), tendo como abcissas as duas variáveis de tensão ($\sigma - u_a$) e $(u_a - u_w)$ e como ordenada a tensão cisalhante τ . Quando a sucção matricial tende a zero, a equação proposta se torna a envoltória para solos saturados, a envoltória de Mohr-Coulomb. Tem-se, desta maneira, uma visão conceitual e uma correspondente representação matemática que indica que a condição saturada deve ser um caso particular a condição mais geral, não saturada, do solo.

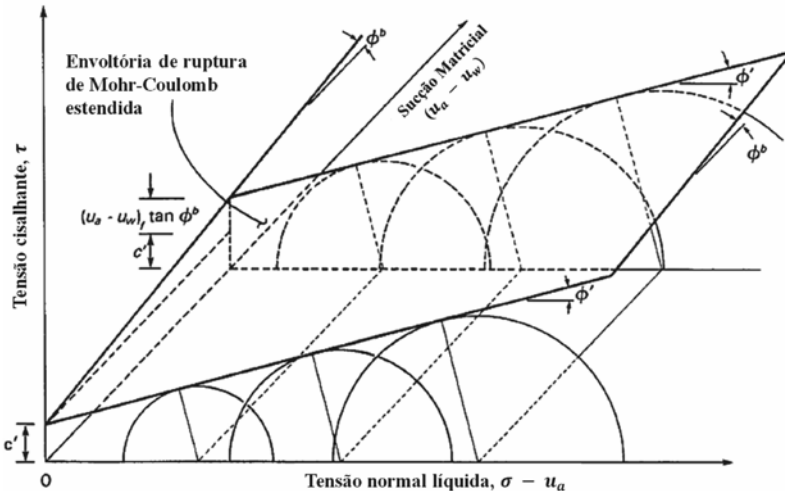


Figura 2. Envoltória de resistência ao cisalhamento estendida para os solos não saturados (FREDLUND; RAHARDJO, 1993 - modificado).

A soma da coesão efetiva com a contribuição da sucção matricial é geralmente chamada de coesão aparente:

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (4)$$

O comportamento do solo também pode ser representado em termos dos pontos máximos do círculo de Mohr na condição de ruptura, conforme as equações a seguir e a Figura 3 (FREDLUND; RAHARDJO, 1993):

$$t_f = d' + s_f \tan \psi' + r_f \tan \psi^b \quad (5)$$

onde: $t_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$; $s_f = (\sigma_1 + \sigma_3)_f / 2 - u_a$; r_f é o valor da sucção matricial na ruptura; d' é o intercepto da envoltória modificada; ψ' é o ângulo da envoltória modificada em relação a s_f ; ψ^b é o ângulo da envoltória modificada em relação a r_f .

A envoltória de pontos de tensão pode ser relacionada com a envoltória de ruptura Mohr-Coulomb aplicando as relações apresentadas a seguir:

$$d = c \cos \phi' \quad (6)$$

$$\tan \psi' = \sin \phi' \quad (7)$$

onde: $d = d' + r_f \tan \psi^b$

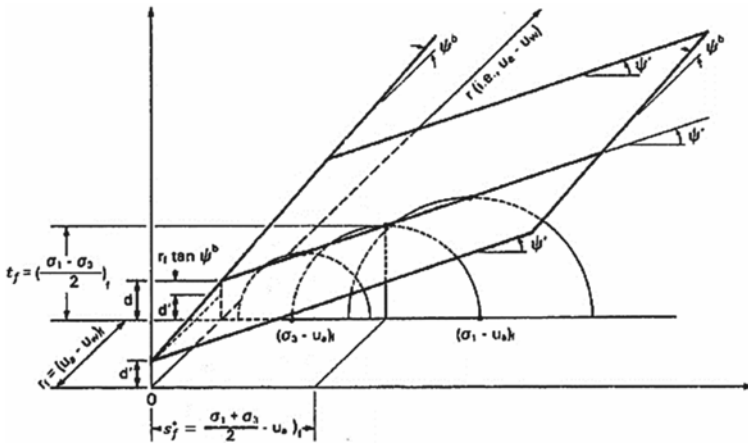


Figura 3. Envoltória de ruptura para os pontos de tensão (FREDLUND; RAHARDJO, 1993 - modificado).

Desde a publicação de Donald (1956), mais estudos foram realizados com a intenção de aprofundar o entendimento sobre os solos não saturados, utilizando para isso diferentes solos, uma maior amplitude de sucções e equipamentos aperfeiçoados. Os resultados apontaram que, assim como observado para areias, a variação da resistência ao cisalhamento de materiais argilosos com a sucção matricial é não linear (ESCARIO; SAEZ, 1986, GAN; FREDLUND, 1988).

Ao longo dos anos, diversos modelos de comportamento da resistência ao cisalhamento dos solos não saturados foram desenvolvidos e diferentes abordagens consideradas. A seções a seguir apresentam uma série de equações disponíveis na literatura e os parâmetros básicos para interpretar, prever ou estimar a resistência dos solos não saturados.

2.1.2 Vanapalli et al. (1996)

Vanapalli et al. (1996) propuseram um modelo físico visando prever a resistência do solo não saturado por meio da curva característica solo-água e incluindo o conceito de “área molhada”. Segundo o autor, existem três estágios de dessaturação (Figura 4(a) e (b)). O primeiro estágio, antes do valor de entrada de ar, em que o solo está saturado e não há redução na “área molhada” entre os grãos; o segundo, entre o valor de entrada de ar e a sucção residual, quando

o solo começa a dessaturar e a umidade gravimétrica diminui significativamente; e o terceiro, após a sucção residual, quando altos acréscimos na sucção levam a menores decréscimos na umidade. Os autores consideram que no primeiro estágio ocorre um aumento linear da resistência; no segundo, um aumento não linear; e no terceiro a resistência pode diminuir, aumentar ou permanecer relativamente constante, estando relacionada ao tipo de solo.

Os autores sugeriram uma série de equações para prever o comportamento de resistência ao cisalhamento do solo não saturado, empregando a curva característica solo-água, conforme apresentado em seu modelo físico, na qual se destaca a equação a seguir:

$$\tau = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \Theta_{ef} \tan \phi' \tag{8}$$

onde: $\Theta_{ef} = (\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ é a umidade volumétrica efetiva; θ_w é a umidade volumétrica do solo; θ_r é a umidade volumétrica residual; θ_s é a umidade volumétrica na saturação.

2.1.3 Fredlund et al. (1996)

A equação de resistência ao cisalhamento não saturado de Fredlund et al. (1996) também incorpora a curva característica solo-água, escrita em termos do teor de umidade adimensional Θ_d e um parâmetro de ajuste κ (Equação 9). Por utilizar um parâmetro de ajuste κ , esta é uma equação que incorpora ao mesmo tempo fundamentos físicos e parâmetros de ajuste. Essa equação foi proposta concomitantemente por Vanapalli et al. (1996).

$$\tau = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f (\Theta_d^\kappa) \tan \phi' \tag{9}$$

onde: Θ_d é a umidade volumétrica normalizada (θ/θ_s); θ é a umidade volumétrica; θ_s é a umidade volumétrica na saturação; e κ é um parâmetro de ajuste para a curva característica solo-água.

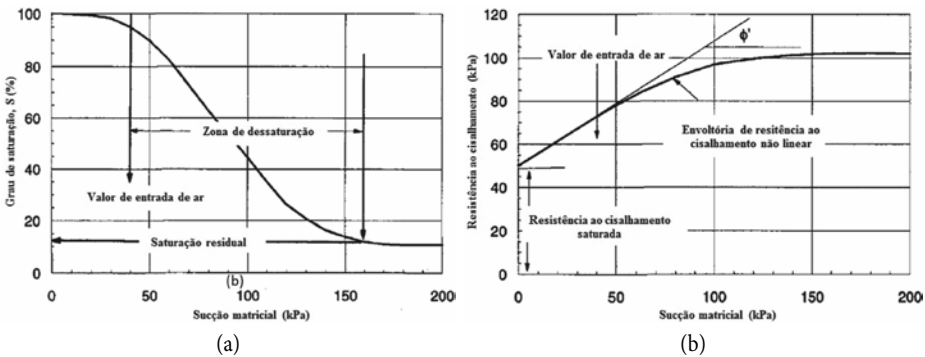


Figura 4. Relação entre CCSA e resistência ao cisalhamento: a) uma CCSA típica, b) comportamento do solo quanto à resistência ao cisalhamento (VANAPALLI et al., 1996 - modificado).

Garven e Vanapalli (2006) obtiveram uma relação entre o parâmetro de ajuste κ e o índice de plasticidade IP (Figura 5). Essa relação foi obtida a partir de dez tipos de solos. O

parâmetro κ varia entre 1, para solos pouco plásticos, e 3, para solos muito plásticos, com um intervalo de confiança de 68%.

$$\kappa = -0,0016 (IP)^2 + 0,0975 (IP) + 1 \quad (10)$$

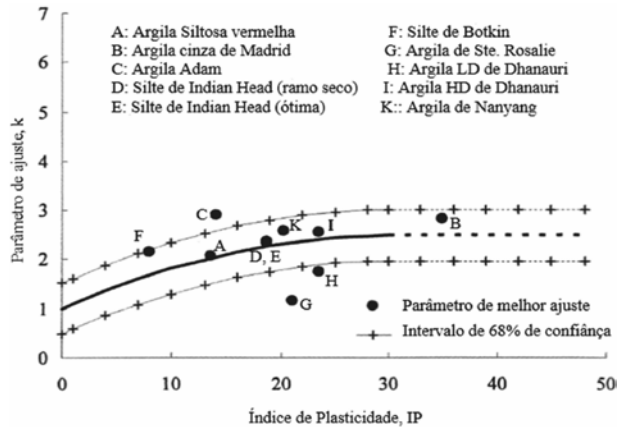


Figura 5. Relação entre o parâmetro de ajuste κ e o índice de plasticidade IP (GARVEN; VANAPALLI, 2006).

Tanto o trabalho de Fredlund *et al.* (1996) quanto o trabalho de Vanapalli *et al.* (1996) não especificam cuidadosamente a CCSA a ser utilizada nas equações de previsão. Não são discutidos aspectos como a histerese da CCSA ou a evolução das curvas durante o processo de cisalhamento. Solos que sofrem importante variação volumétrica durante o processo de cisalhamento têm consequentemente importante alteração no grau de saturação. O grau de saturação no estado de ruptura pode não corresponder ao grau de saturação indicado originalmente por CCSAs determinadas na condição natural. Infante Sedano e Vanapalli (2011) apresentam resultados experimentais, apontando que a CCSA correspondente ao estado de ruptura permite uma melhor estimativa da resistência ao cisalhamento.

2.1.4 Bao *et al.* (1998)

Na equação de Bao *et al.* (1998) os autores assumem que o solo se comporta como um solo saturado até a sucção atingir o valor de entrada de ar. A partir do valor de entrada de ar a resistência ao cisalhamento reduz, de acordo com um fator multiplicador ζ , como mostrado na Equação 11. A influência da sucção do solo na resistência é normalizada entre o valor de entrada de ar e a sucção residual. Após o valor de entrada de ar a resistência permanece constante. Isso se torna consistente para o comportamento da resistência ao cisalhamento de solos de granulometria fina (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Dessa forma, tem-se as seguintes equações:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \zeta \tan \phi' \quad (11)$$

onde: $\zeta = \frac{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$

2.1.5 Vilar (2006)

Vilar (2006) propôs o uso de uma equação hiperbólica para descrever a relação entre resistência e sucção. Trata-se de uma equação de ajuste, conforme apresentado abaixo:

$$\tau_{ff} = c' + \frac{(u_a - u_w)}{a + b(u_a - u_w)} + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' \quad (12)$$

onde: a e b = parâmetros de ajuste.

Assume-se que não ocorrem variações significativas na resistência após o solo atingir sucções iguais ou maiores que a sucção residual. Sendo assim:

$$\frac{dc}{d\psi} \Big|_{\psi \rightarrow 0} = \frac{1}{a} = \tan \phi' \quad (13)$$

$$\lim_{\psi \rightarrow \infty} c = c_{ultima} = c' + \frac{1}{a} \quad \text{ou} \quad b = \frac{1}{(c_{ultima} - c')}$$

2.2 Comentários sobre a resistência ao cisalhamento de solos não saturados e o processo erosivo

Os modelos de ajuste e previsão de resistência ao cisalhamento de solos não saturados citados aqui permitem observar que ao mesmo tempo em que a sucção matricial e o grau de saturação são diretamente relacionados via a CCSA, estes mesmos parâmetros possuem papéis independentes na resistência ao cisalhamento do solo. Desta maneira, é de se esperar que fatores como a trajetória de sucção seja importante. Considerando que a deflagração de processos erosivos hídricos se dá em trajetórias de molhagem, pode-se afirmar que o método de imposição de sucções no laboratório precisa representar as condições de campo.

Outro comentário importante diz respeito às variáveis consideradas na modelagem da resistência ao cisalhamento do solo não saturado. Existe uma grande ênfase nas variáveis de estado de tensão. No entanto, outros fatores diferentes do estado de saturação do solo podem ser determinantes no entendimento da resistência ao cisalhamento desses materiais. Alguns fatores que podem ser citados são a alteração acelerada de materiais expostos à atmosfera e o efeito de poropressões de ar desenvolvidas próximas de frentes de molhagem durante eventos de precipitação extrema.

3 Previsão da erodibilidade em solos não saturados por fluxo superficial

Com base no estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados desenvolvido por Bastos (1999), apresenta-se aqui uma abordagem ao problema de erosão em solos residuais tropicais e subtropicais não saturados, no que tange a caracterização da susceptibilidade destes solos aos processos de erosão hídrica acelerada por fluxo superficial.

Na formulação original desta proposta foi tomada por hipótese uma situação problema frequente em engenharia geotécnica: a necessidade de se avaliar a erodibilidade de um dado

perfil de solo a ser exposto com a abertura de um corte de estrada ou com a implantação de um loteamento. Neste caso, por similaridade de processos, ampliaremos para situações onde estes perfis de solos constituem terrenos marginais a reservatórios. Nesta última, diferentes horizontes (superficial, subsuperficial e saprolítico) podem estar sujeitos à ação das águas pluviais, por muitas vezes conduzidas indevidamente aos reservatórios, ou à ação do embate de ondas.

No caso da erosão por fluxo superficial, o sulcamento da superfície dos solos dos terrenos limítrofes aos reservatórios leva à concentração do fluxo superficial e ao potencial desencadeamento dos processos de erosão hídrica acelerada. Já a erosão por embate de ondas é característica de grandes reservatórios, cuja extensa área superficial apresenta *fetchs* (corredores e/ou pistas de vento) significativos e propícios à geração de ondas por vento. A ação das ondas causa transformações na linha de margem por meio de processos de abrasão e ruptura de taludes (SIQUEIRA *et al.*, 2011). O surgimento, velocidade e extensão destes processos e o decorrente comprometimento do ambiente e das obras de engenharia que o cercam são função, entre outros fatores, da erodibilidade dos solos, que, portanto, justifica ser avaliada nos estudos preliminares de implantação destes corpos d'água artificiais.

Os critérios propostos para avaliação da erodibilidade foram escolhidos com base no estudo experimental em laboratório realizado para os perfis de solos graníticos e de arenito encontrados na Região Metropolitana de Porto Alegre (BASTOS, 1999). Ensaios de campo para direta avaliação da erodibilidade ou para medida das propriedades a ela relacionadas não foram considerados nesta proposta, embora não se discuta a validade destes.

A generalização desta proposta para outros solos residuais tropicais e subtropicais não saturados é sugerida, não obstante, somente sua aplicação a um número maior de solos desta natureza, envolvendo outros perfis pedológicos e substratos geológicos pode confirmar esta afirmativa. Alguns dos estudos posteriores que aplicaram a proposta de avaliação da erodibilidade de Bastos (1999), seja na forma completa ou parcial, são relacionados no Tabela 1.

Tabela 1. Algumas aplicações da proposta de abordagem geotécnica da erodibilidade de Bastos (1999).

Autor	Materiais estudados
Ide <i>et al.</i> (2009)	Solos arenosos resultantes das Formações do Grupo Baurú e Sedimentos Cenozóicos – Baurú/SP
Stephan (2010)	Solos residuais de rochas metamórficas – Juiz de Fora/MG
Fernandes (2011)	Horizonte A/B e substrato rochoso (arenito e siltito) em área de voçoroca – Santa Maria/RS
Basso (2013)	Solos superficiais (horizontes A, B e C) e do substrato rochoso (camadas 2C e 1ª de arenito) de um perfil típico da área da voçoroca – São Francisco de Assis/RS

A proposta de abordagem é dividida em três etapas básicas:

- Reunião de dados preliminares sobre o problema e o perfil de solo envolvido;
- Observação do comportamento dos solos em campo frente à erosão e
- Avaliação da erodibilidade dos solos baseada em ensaios de laboratório.

3.1 Dados preliminares

Na abordagem ao problema de erosão é muito importante a reunião de informações preliminares sobre as características do problema, sobre os condicionantes externos e sobre os perfis de solos envolvidos. Estas informações podem ser agrupadas conforme o roteiro descrito abaixo:

- a) Características geométricas do problema – no caso de áreas a serem urbanizadas no entorno do reservatório, tomar ciência da profundidade de cortes, da extensão de terraplanagens e de outras intervenções que vão indicar quais os horizontes do perfil envolvidos e a forma na qual serão expostos;
- b) Caracterização geológica e pedológica dos perfis de solos envolvidos – caracterizar o perfil de solo típico da área a partir de mapeamentos geológicos, pedológicos ou geotécnicos existentes, complementados por outras informações obtidas in situ;
- c) Posição do perfil na geomorfologia local – identificar a posição do perfil expostos no contexto geomorfológico do entorno do reservatório, considerando principalmente os aspectos referentes à drenagem natural ou imposta pela urbanização;
- d) Descrição in situ do perfil do solo local – obter in situ dados morfológicos de interesse: distribuição e espessura dos horizontes, macroestrutura de origem pedológica e geológica e condições de drenagem.

Estes dados preliminares auxiliam na interpretação do comportamento em campo do perfil frente à erosão e orientam os procedimentos de avaliação da erodibilidade dos solos envolvidos.

3.2 Investigação in situ do comportamento dos solos frente à erosão

Identificados os diferentes perfis de solo representativos dos terrenos das bordas do reservatório, busca-se observar o comportamento dos solos frente à erosão na área de influência em questão. Caso já exista o reservatório, também o comportamento das margens frente à ação das águas deve ser avaliado.

Para conclusões acertadas é necessário o cuidado em distinguir o comportamento segundo classes de perfis similares; neste caso, a disponibilidade de levantamentos de solos e geológicos detalhados é bastante útil, pois garante maior segurança na extrapolação das informações obtidas. Este trabalho de campo, associado aos dados preliminares levantados, permite definir como produto cartas de susceptibilidade à erosão (conforme, p.ex., procedimento metodológico por Salomão (1999)).

Devem ser investigadas e registradas as ocorrências de quaisquer processos erosivos atuantes sobre os solos, tanto em condições naturais como em perfis já desconfigurados pela interferência antrópica (p.ex. cortes, terrenos decapeados e escavações): sulcos, ravinas, voçorocas, buracos, solapamentos, colapsos e outros.

Na interpretação destes processos devem ser levados em conta: a posição topográfica e a inserção do perfil no contexto geomorfológico da borda do reservatório; a drenagem do perfil e do terreno; a vegetação local e os demais condicionantes que levam a um maior ou menor fluxo superficial na área.

A susceptibilidade à erosão pela ação do fluxo superficial deve ser investigada para cada um dos principais horizontes dos perfis envolvidos. A hierarquização dos solos investigados pela susceptibilidade à erosão, realizada por meio de uma avaliação qualitativa, serve de parâmetro inicial de análise. Apesar da aparente subjetividade, conceitos como alta, média e baixa erodibilidade devem ser particularizados de modo a representar a realidade de campo. Os resultados obtidos são úteis na interpretação dos dados experimentais a serem obtidos.

Outra importante função desta etapa é a definição dos horizontes de solos a serem investigados experimentalmente. Nesta definição, devem ser levados em conta os seguintes aspectos:

- A representatividade do horizonte no perfil e no contexto dos terrenos que constituem a borda dos reservatórios – o solo investigado deve ter representatividade espacial no perfil e na configuração final de possíveis interferências antrópicas. Certos horizontes podem, por exemplo, serem totalmente removidos em terraplanagens;
- A importância de certos solos em feições particulares da erosão no perfil – como exemplo, pode-se citar o caso de certos horizontes que, mesmo de pequena espessura, podem ser responsáveis pela proteção à erosão de horizontes subjacentes ou, pelo contrário, apresentam feições estruturais que facilitam a concentração do fluxo superficial.

3.3 Avaliação da erodibilidade

Nesta proposta de abordagem geotécnica à erodibilidade, especifica-se a avaliação desta propriedade segundo duas alternativas:

- A avaliação direta da erodibilidade por ensaios de Inderbitzen e
- A avaliação indireta da erodibilidade por propriedades dos solos que melhor se relacionaram ao comportamento frente à erosão. Deve ser empregada quando da indisponibilidade da avaliação direta ou como informação complementar no estudo da erodibilidade.

Para a realização dos ensaios propostos são necessárias coletas de específicas amostras representativas (deformadas ou indeformadas) em locais estratégicos, preferencialmente onde é prevista a ação erosiva pelo fluxo d'água concentrado ou pelo embate das ondas.

3.3.1 A avaliação direta da erodibilidade

Para a avaliação direta da erodibilidade é proposta a medição de parâmetros hidráulicos de erodibilidade, em particular da taxa de erodibilidade K , através de ensaios em canais. O ensaio de Inderbitzen é o ensaio sugerido pela simplicidade e eficiência, comprovada com base em diversos estudos no Brasil. Consiste basicamente em se estabelecer um fluxo laminar a vazão constante sobre a superfície de uma amostra indeformada do solo a ser investigada a erodibilidade.

Como não existe uma norma para o ensaio, os arranjos experimentais existentes no país diferem consideravelmente, advindos em grande parte de trabalhos de pós-graduação de diferentes programas brasileiros. Apresenta-se a seguir um panorama histórico do ensaio de Inderbitzen no Brasil. Para detalhes quanto às condições das amostras ensaiadas (tamanho, condição prévia de umidade, etc...), às dimensões e inclinações das rampas e às vazões empregadas recomenda-se consulta aos trabalhos originais e também à revisão sobre o experimento apresentada em Stephan (2010).

Inderbitzen (1961) apresentou a concepção original de um canal hidráulico e de um método de ensaio empregados na avaliação da erodibilidade. Com a divulgação no meio geotécnico, o ensaio tomou o nome de ensaio de Inderbitzen (erosômetro ou ainda ensaio de erosão). A Figura 6(a) ilustra o detalhamento original do equipamento de Inderbitzen. No ensaio é medida a perda de solo em amostras cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável por onde passa um fluxo d'água com vazão controlada. Segundo o autor, o equipamento simula, em condições próximas às reais, como o solo se comporta frente a um fluxo d'água superficial, permitindo determinar a influência de fatores como a compactação do solo, a declividade da rampa, a vazão e a duração do fluxo. Os resultados são expressos em gráficos da perda de solo x tempo e da velocidade de erosão x tempo.

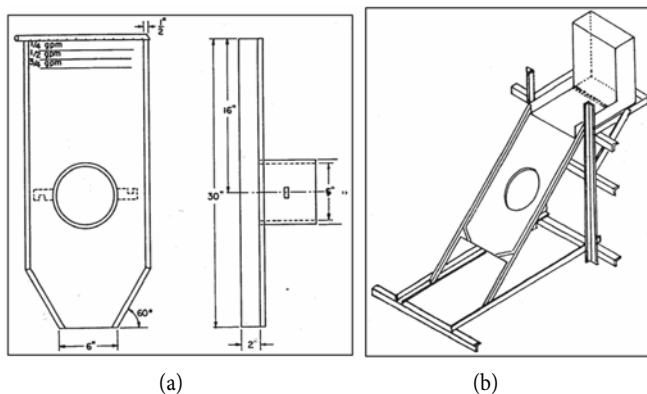


Figura 6. Equipamento do ensaio de Inderbitzen: a) vista superior e lateral da concepção original (INDERBITZEN, 1961) e b) equipamento de Inderbitzen empregado na pesquisa Estabilidade de Taludes (IPR/COPPE/TRAFECON, 1975–1978).

Na pesquisa “Estabilidade de Taludes” (IPR/COPPE/TRAFECON), desenvolvida no período de 1975 a 1978, o ensaio de Inderbitzen foi introduzido no Brasil e proposto como ensaio para avaliação da erodibilidade dos solos. O equipamento de Inderbitzen empregado, ilustrado na Figura 6(b), foi construído com base no esboço do equipamento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), trazido ao Brasil pelo engenheiro Salomão Pinto. Foram realizados ensaios em solos de alteração de gnaisse de taludes da Via Dutra. Detalhes dos métodos de ensaio são descritos em Brasil (1979) e Fonseca (1981), enquanto os resultados obtidos apresentados em Brasil (1979), Ferreira (1981) e Fonseca e Ferreira (1981).

Na mesa redonda sobre erosão em estradas no 2º Simpósio Nacional de Controle de Erosão (SNCE), realizado em 1981, o professor Job Nogami discutiu o uso do ensaio de Inder-

bitzen, destacando suas restrições. Em suas considerações, enfatiza que o ensaio não leva em conta um dos aspectos mais importantes da erosão em climas tropicais: a infiltração da água através do corpo de prova. Como não há controle na circulação ou na sucção no interior da amostra, segundo Nogami, solos com boa infiltrabilidade, pouco sujeitos ao escoamento superficial, tenderiam a mostrar acentuada erodibilidade pelo ensaio. Outra limitação discutida é decorrente dos problemas hidráulicos (perturbação do fluxo) gerados na descontinuidade entre amostra e rampa junto aos seus contornos. Na mesma discussão foi sugerida a incorporação de chuva simulada ao ensaio, visando reproduzir o efeito desagregador determinado pela gota de chuva.

Após a experiência do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), o uso do ensaio de Inderbitzen no Brasil só ressurgiu na década de 90. Fácio (1991) apresenta o equipamento de Inderbitzen construído em Brasília num convênio entre a Universidade de Brasília (UnB) e a empresa NOVACAP (Figura 7). As alterações mais importantes no equipamento, em relação ao equipamento do IPR, foram: a possibilidade de realizar três ensaios simultâneos a partir de três calhas paralelas; a criação de bacias de uniformização do fluxo e a fixação roscável das amostras. Foram ensaiados solos oriundos de erosões situadas em cidades satélites no Distrito Federal. Em Santos (1997), solos de erosões de Goiânia foram ensaiados no equipamento acima referido, com introdução de pequena alteração que restringe o fluxo na rampa na largura determinada pela seção da amostra. Ensaios com mesmo equipamento foram conduzidos por Ramidan (2003) para solos de voçorocamento junto a UHE de Itumbiara/GO.

Bastos (1999) descreve o equipamento construído no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LMS/UFRGS) com o objetivo de realizar os ensaios de Inderbitzen em perfis de solos residuais da Região Metropolitana de Porto Alegre (Figura 8). Os ensaios conduzidos foram empregados na formulação da presente proposta.

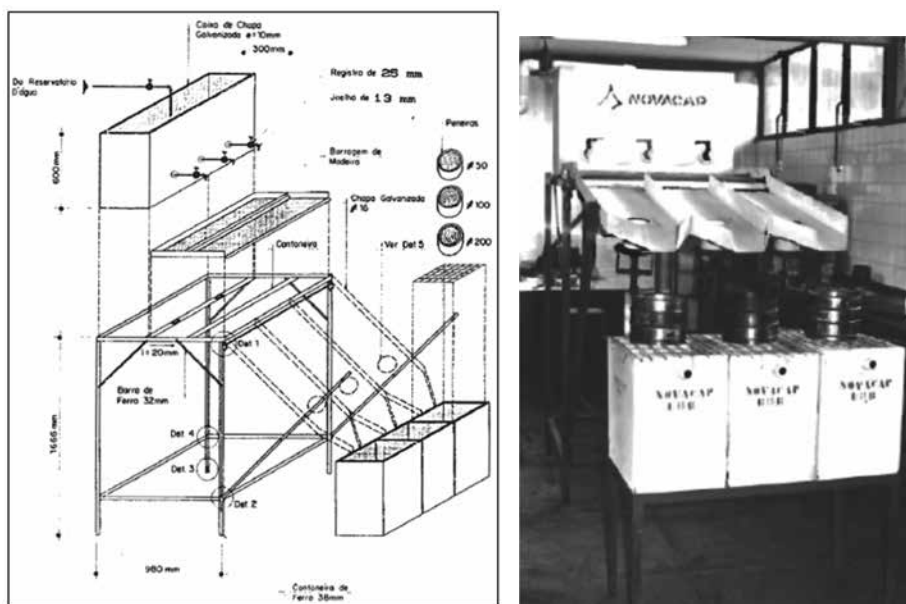
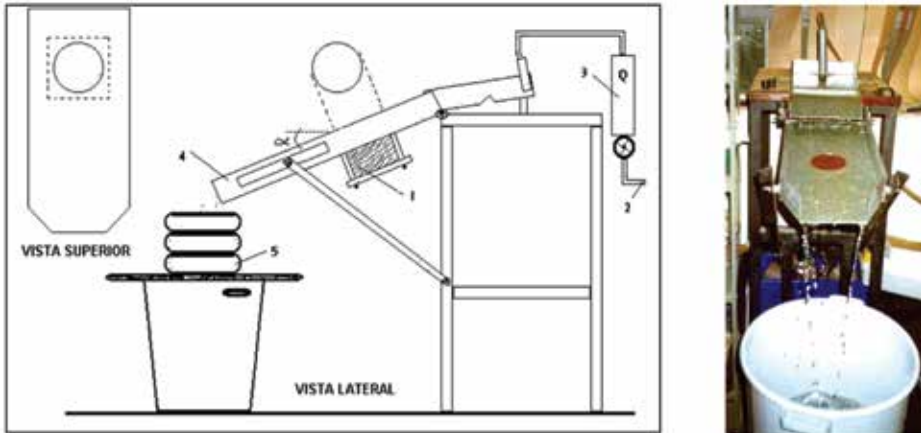


Figura 7. Equipamento de Inderbitzen desenvolvido por Fácio (1991).

Fragassi (2001) apresenta uma nova versão do equipamento desenvolvida para o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Com o equipamento ilustrado na Figura 9 foram estudados solos residuais da região de Viçosa/MG. Santos (2001) realizou ensaios para solos de um distrito de Ouro Preto/MG empregando o mesmo equipamento.



1- amostra 2 - abastecimento de água 3 - rotâmetro 4 - rampa hidráulica 5 - peneiras

Figura 8. Equipamento de Inderbitzen desenvolvido no LMS-UFRGS por Bastos (1999).

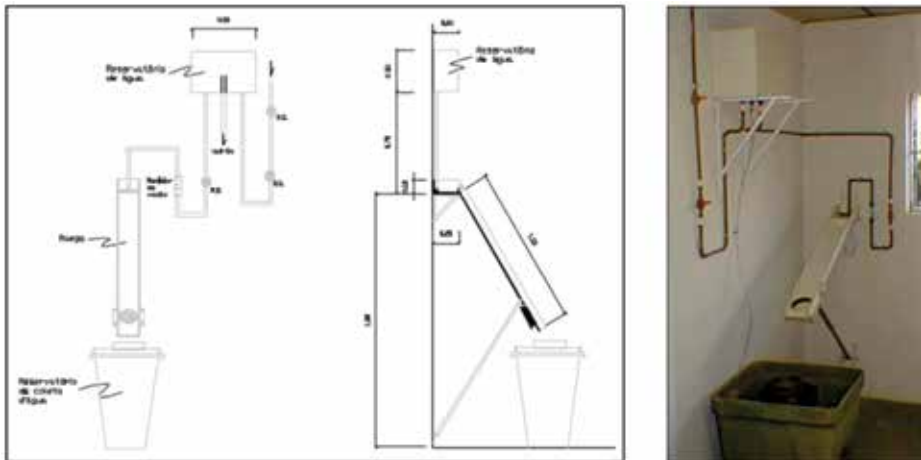


Figura 9. Equipamento de Inderbitzen desenvolvido na UFV por Fragassi (2001).

Freire (2001) propõe um novo ensaio, similar ao Inderbitzen, que procura representar as condições do solo no campo, durante as precipitações atmosféricas (Figura 10). Esse novo ensaio foi chamado de Ensaio de Inderbitzen Modificado e, segundo o proponente, permite determinar o “Grau de Erodibilidade do Solo - GES”. O equipamento simula o fenômeno da desagregação das partículas pelo impacto das gotas de chuva. Uma proposta semelhante foi apresentada por Higashi (2006) (Figura 11).

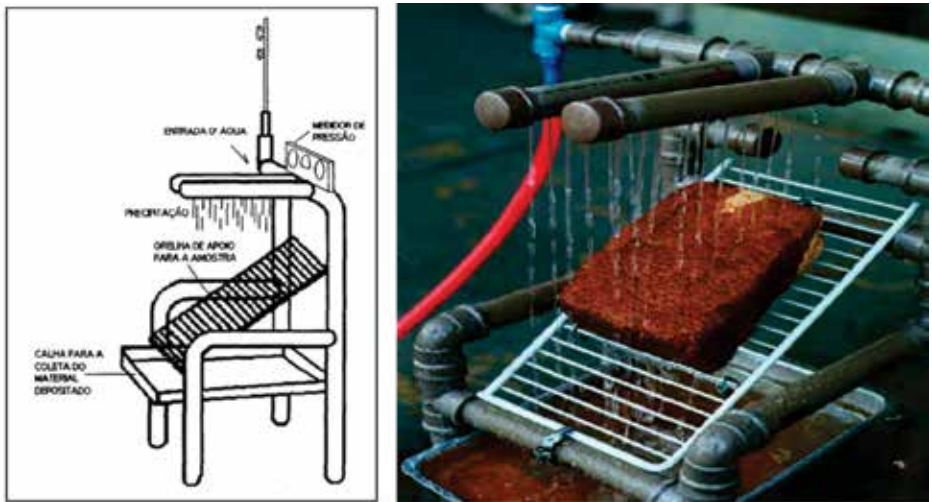


Figura 10. Equipamento de Inderbitzen modificado proposto por Freire (2001).



Figura 11. Equipamento de Inderbitzen com gotejamento proposto por Higashi (2006).

Visando também simular o efeito da chuva, Lemos (2002) apresenta o ensaio de Inderbitzen submetido simultaneamente a um simulador de chuva (Figura 12).



Figura 12. Equipamento de Inderbitzen e simulador de chuva no experimento proposto por Lemos (2002).

Como outros exemplos tem-se ainda o modelo de equipamento de Inderbitzen desenvolvido no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) por Vilela (2003) *apud* Stephan (2010) para estudar a erosão superficial de solo de uma encosta da Floresta da Tijuca no Rio de Janeiro/RJ e também empregado por Mendes (2006) para estudar os solos superficiais de uma microbacia do município de Bom Jardim/RJ (Figura 13), e também o equipamento desenvolvido no Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Infraestrutura do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) por Paiva (2004), ilustrado na Figura 14, para ensaiar solos pertencentes à bacia do Rio Una em Taubaté/SP.



Figura 13. Equipamento de Inderbitzen desenvolvido no Instituto de Geociências da UFRJ por Vilela (2003) *apud* Stephan (2010).



Figura 14. Equipamento de Inderbitzen desenvolvido no ITA por Paiva (2004).

O uso de outros materiais e geometrias variadas configuram algumas outras propostas. Aguiar (2009), por exemplo, apresenta uma rampa de acrílico numa proposta de aparelho de Inderbitzen adaptado construído na Universidade Federal de Goiás (UFG) (Figura 15).

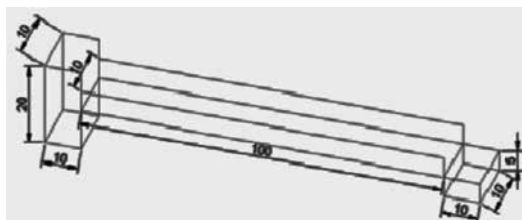


Figura 15. Equipamento de Inderbitzen adaptado na UFG por Aguiar (2009).

Um quadro resumo das características de alguns equipamentos e procedimentos de ensaios de Inderbitzen empregados na avaliação da erodibilidade de solos brasileiros foi publicado por Stephan (2010) (Tabela 2).

Tabela 2 - Equipamentos e procedimentos de ensaios de Inderbitzen. (STEPHAN, 2010)

REFERÊNCIA	LOCAL DE RETIRADA DAS AMOSTRAS	RAMPA Material/Dimensões	DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA	CONDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	VARIÁVEIS ADOTADAS Vazão/ Declividade da rampa	TEMPO TOTAL DE ENSAIO
BASTOS (1999)	Região Metropolitana de Porto Alegre – Rio Grande do Sul	Chapa metálica base =25,0 cm comprimento = 60,0 cm	$\phi = 9,76$ cm altura = 5,00 cm	secas ao ar, natural e pré-umedecidas	50,0 e 100,0 ml/s (3,0 e 6,0 l/min) 10°, 26°, 45° e 54°	20 minutos
FRAGASSI (2001)	Serra de São Geraldo-MG e campus da UFV, Viçosa-MG.	PVC base =15,0 cm comprimento = 120,0 cm	$\phi = 15,20$ cm altura = 4,00 cm	próximo à saturação	25,0 ml/s (1,5 l/min) 10°	30 minutos
SANTOS (2001)	Santo Antônio do Leite Ouro Preto-MG	PVC base =15,0 cm comprimento = 120,0 cm	$\phi = 15,20$ cm altura = 4,00 cm	amostras saturadas	25,0 ml/s (1,5 l/min) 30 min iniciais 50,0 ml/s (3,0 l/min), 100,0 ml/s (6,0 l/min) e 150,0 ml/s (9,0 l/min), (intervalos de 5 em 5 minutos) 10°	45 minutos
RAMIDAN (2003)	Área de empréstimo da UHE de Itumbiara – GO	chapa metálica base =33,0 cm comprimento = 130,0 cm	$\phi = 10,00$ cm altura = 10,00 cm (para solos lateríticos) $\phi = 10,00$ cm altura = 15,00 cm (demais solos)	umidade natural	50,0 ml/s (3,0 l/min) 10°	30 minutos
PAIVA (2004)	Bacia do rio Una em Taubaté-SP	chapa de aço revestida com PVC base =33,0 cm comprimento = 130,0 cm	$\phi = 15,00$ cm altura = 4,50 cm	secas ao ar, natural e pré-umedecidas	50,0 e 125,0 ml/s (3,0 e 7,5 l/min) 20° e 60°	120 minutos
MENEZES et al. (2006)	Encostas da cidade de Lavras-MG	PVC base =15,2 cm comprimento = 120,0 cm	$\phi = 15,00$ cm altura = 4,00 cm	umidade natural	25,0 ml/s (1,5 l/min) 10° e 80°	120 minutos
MENDES (2006)	Bom Jardim-RJ	madeira coberta por fórmica, revestida em PVC base =50,0 cm comprimento = 100,0 cm	$\phi = 15,00$ cm altura = 10,00 cm	umidade natural	50,0 ml/s (3,0 l/min) 37°	60 minutos

Outros equipamentos para ensaios de Inderbitzen divulgados na literatura são inspirados nestes anteriores, sendo a principal diferença o fato de incorporar ou não o impacto de gota.

Bastos (1999) sugere a realização de ensaios com amostras nas condições de umidade de campo e, opcionalmente, também em amostras secas ao ar, neste caso visando avaliar a mudança na susceptibilidade à erosão com a umidade inicial.

A quantificação dos esforços erosivos induzidos nos ensaios por parâmetros hidráulicos como a tensão cisalhante hidráulica é a abordagem mais apropriada. Esta tensão hidráulica atuante pode ser estimada por uma formulação simples, como a Equação 14

$$\tau_h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (14)$$

onde: τ_h = tensão cisalhante hidráulica; γ = peso específico da água (N/cm^3); h = altura da lâmina de fluxo (cm) e d = declividade da rampa. A altura da lâmina d'água pode ser medida por limnímetros ou estimada a partir da velocidade de escoamento e do valor da vazão (Equação 15).

$$h = \frac{Q}{vL} \quad (15)$$

onde: Q = vazão, v = velocidade do fluxo e L = largura da rampa.

A partir da plotagem dos dados de tensão cisalhante hidráulica aplicada versus perda de solo (por unidade de área e de tempo) é possível obter a taxa de erodibilidade (K), que representa a taxa de perda de solo, e a tensão cisalhante hidráulica crítica ($\tau_{h\text{crit}}$), entendida como a menor tensão cisalhante hidráulica capaz de produzir destacamento de partículas (Figura 16).

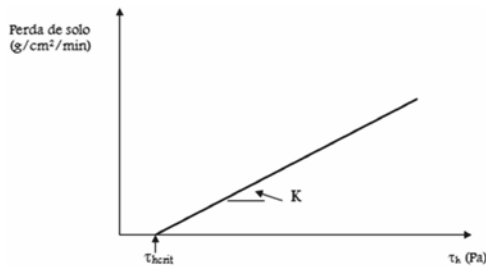


Figura 16. Definição dos parâmetros K e $\tau_{h\text{crit}}$ a partir dos resultados do ensaio de Inderbitzen (BASTOS, 1999).

O critério de erodibilidade proposto por Bastos (1999), baseado nos dados de taxa de erodibilidade obtidos em ensaios na condição de umidade natural, é o seguinte:

- $K < 0,001 \text{ g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ – solos de baixa erodibilidade
- $0,001 < K < 0,1 \text{ g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ – solos de mediana erodibilidade
- $K > 0,1 \text{ g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ – solos de alta erodibilidade

O autor destaca que, apesar da suposta razoável normalização dos resultados, imposta pela análise em termos dos parâmetros hidráulicos de erodibilidade, é importante ressaltar que a validade do critério acima está condicionada à proximidade com as especificações de ensaio expressas no seu trabalho.

3.3.2 A avaliação indireta da erodibilidade

Segundo Bastos (1999), a avaliação da erodibilidade com base em outras características físicas e propriedades dos solos permite a identificação de solos potencialmente erodíveis, isto é, solos que em condições normais são susceptíveis a processos de erosão hídrica acelerada.

A proposta de avaliação indireta da erodibilidade considera como critério preliminar uma avaliação qualitativa do potencial à desagregação em água a partir de ensaios de desagregação. Solos que desagregam em água são considerados potencialmente erodíveis.

O ensaio de desagregação (“slaking test”) evoluiu do chamado “crumb test”, ensaio preconizado para identificação de solos dispersivos através da imersão de agregados de solo em água. Como desagregação (ou “slaking”) entende-se o processo de ruína de uma amostra de solo não confinada, exposta ao ar e na seqüência imersa em água (MORIWAKI E MITCHELL, 1977). O objetivo maior deste ensaio é a verificação da estabilidade à desagregação de uma amostra de solo cúbica ou cilíndrica, independente da dispersão do material. A aplicação do ensaio de desagregação para fins geotécnicos foi idealizada pela engenheira Anna Margarida Fonseca, ao estudar propriedades dos solos para fins de fundação durante a construção de Brasília (FERREIRA, 1981).

Na pesquisa IPR/COPPE/TRAFECON (1975–1978), o ensaio de desagregação foi indicado como critério qualitativo na investigação da erodibilidade de solos em taludes de estradas. Fonseca (1981) propôs o uso da velocidade de desagregação como um índice classificatório para a erodibilidade de solos superficiais de taludes. Os resultados obtidos pelo ensaio para solos originados de gnaiss foram comparados com ensaios de Inderbitzen e o comportamento in situ dos materiais em taludes de referência (REGO, 1978).

Santos (1997) apresenta resultados de ensaios de desagregação para solos de erosões de Goiânia, também os comparando com os resultados de ensaios de Inderbitzen.

Na interpretação dos resultados, os trabalhos referem-se, em geral, à abordagem de Holmgren e Flanagan (1977) para “crumb tests” (Tabela 3), identificando como principal mecanismo observado o abatimento provocado pelo processo de saturação das amostras, que anula a sucção matricial e gera poropressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo.

O resultado do ensaio é puramente qualitativo. Em cada uma destas etapas é registrado o comportamento da amostra. São descritos o caráter, a intensidade e a velocidade dos processos atuantes: umedecimento, expansão, abatimentos, fraturamentos, rupturas, dispersão e outros.

Tabela 3. Abordagem Holmgren e Flanagan (1977) aplicada à interpretação do ensaio de desagregação.

RESPOSTA	COMPORTAMENTO
sem resposta	amostra mantém-se intacta
abatimento (“slumping”)	desintegração total da amostra causada por mecanismos de hidratação e desaeração
fraturamento	amostra se quebra em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas. O principal mecanismo atribuído ao processo é a expansão osmótica
dispersão	amostra mostra evidência de dispersão coloidal. As paredes tornam-se difusas e forma-se uma “nuvem” coloidal

Bastos (1999) realizou ensaios de desagregação com os solos residuais da Região Metropolitana de Porto Alegre. Amostras cilíndricas ($\Phi = 9,76$ cm e $h = 5$ cm) coletadas em anéis biselados de PVC foram condicionadas a duas situações distintas de umidade: secas ao ar por

um período mínimo de 72 horas e na umidade natural. Cuidadosamente extraídas do molde de amostragem, as amostras são dispostas sobre uma superfície porosa e submetidas a um processo de lenta submersão (Figura 17), segundo os seguintes estágios:

- (a) Água destilada na base por 30 min;
- (b) Água destilada a 1/3 e 2/3 da amostra por períodos de 15 min e
- (c) Submersão total, permanecendo por 24 horas.

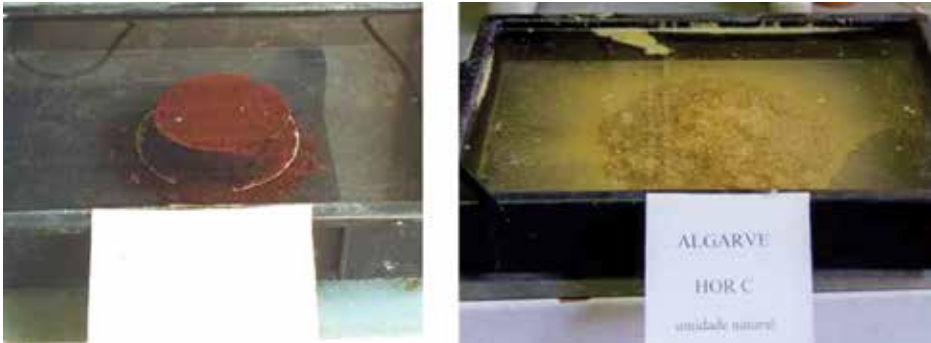


Figura 17. Amostras de solos submetidas aos ensaios de desagregação (BASTOS, 1999).

São vários outros trabalhos que se utilizam do ensaio de desagregação numa avaliação qualitativa da erodibilidade. O Tabela 4 lista alguns destes trabalhos.

Posteriormente ao critério preliminar pelo ensaio de desagregação, Bastos (1999) propõe a aplicação de critérios de erodibilidade a partir de diferentes níveis de informações obtidas de ensaios geotécnicos:

- 1º nível – caracterização geotécnica dos solos;
- 2º nível – ensaios pela Metodologia MCT;
- 3º nível – ensaios de resistência ao cisalhamento.

As informações complementam-se de tal forma que o somatório da aplicação dos critérios melhor caracteriza a erodibilidade dos solos e viabiliza a tomada de decisões.

O peso relativo dos dados na avaliação da erodibilidade é crescente com o nível da informação. Os conflitos na aplicação dos critérios de avaliação indireta devem ser julgados pelo engenheiro com base no peso relativo do nível das informações existentes.

O autor enfatiza que os critérios foram formulados com base nos solos por ele estudados e foram propostos como uma primeira aproximação. Preconizou que estes critérios deveriam ter sua validação continuamente avaliada com o aumento no universo de solos pesquisados.

3.3.2.1 1º nível–Avaliação da erodibilidade a partir de dados da caracterização geotécnica

A prática em estudos de engenharia geotécnica estabelece que, como informação básica, os solos devem ser caracterizados em laboratório quanto a sua granulometria (ensaios de granulometria) e plasticidade (ensaios de limites de Atterberg).

Tabela 4. Trabalhos onde o ensaio de desagregação foi utilizado na avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos.

AUTOR	MATERIAIS ESTUDADOS
Lima (1999)	Solos de erosões na área urbana de Manaus/AM
Silva (2000)	Solos coluvionares e saprolíticos de complexo granítico-gnaíssico da bacia do Rio Maracujá, município de Ouro Preto/MG
Gomes (2001)	Solos da Formação Barreiras e embasamento cristalino envolvidos em um processo erosivo na região costeira Cabo de Santo Agostinho / PE
Chamecki (2002)	Solos argilosos da Formação Guabirotuba
Lemos (2002)	Latossolo Vermelho Amarelo, em duas distintas áreas de cultivo: plantio direto e plantio convencional, no município de Pinhais/PR
Lima (2003)	Solos de voçorocas em substrato de metarritmitos, em cidades satélites do Distrito Federal
Ramidan (2003)	Solo residual de rochas metamórficas (muscovita gnaíse) pertencentes ao Grupo Araxá em área de empréstimo da barragem de terra da UHE de Itumbiara – Itumbiara/GO
Chuquipiondo (2007)	Cambissolos da área da UHE – CBI, entre os municípios de Araguari/MG e Uberlândia/MG
Morais <i>et al.</i> (2007)	Saprólito e solo laterítico formado de rocha gnaíssica da Bacia do Rio Maracujá, município de Ouro Preto/MG
Meira (2008)	Solos em campo experimental com ocupação urbana, sobre a Formação Barreiras, Recife/PE
Ávila (2009)	Solos residuais de rochas sedimentares da microbacia do Arroio Sarandi, voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria/RS
Fernandes (2011)	Horizonte A/B e substrato rochoso (arenito e silito) em área de voçoroca, Santa Maria/RS
Basso (2013)	Solos superficiais (horizontes A, B e C) e do substrato rochoso (camadas 2C e 1ª de arenito) de um perfil típico da área da voçoroca, São Francisco de Assis/RS
Almeida (2014)	Horizontes subsuperficiais de cambissolos e latossolos com substrato rochas metamórficas nos municípios de Senador Canedo/GO e Bonfinópolis/GO
Medeiros (2014)	Solos dos terrenos da alta bacia do Ribeirão Barreiro, município de Alexânia/GO
Quirino <i>et al.</i> (2014)	Solos sujeitos a processos erosivos no perímetro urbano de Catalão/GO

A partir destes dados da caracterização geotécnica Bastos (1999) propõe, como primeira aproximação para a avaliação da erodibilidade, a aplicação de critérios pelo teor de finos, representado pela porcentagem de solo passante na peneira #200 (% pass #200), e pela plasticidade, representada pelo índice de plasticidade (IP). O critério proposto indica que são considerados potencialmente erodíveis aqueles solos com:

- % pass #200 < 55 % e/ou
- IP < 10 %

Os dados da distribuição granulométrica permitem ainda a avaliação da erodibilidade com base no fator K da Equação Universal de Perda de Solo – USLE (K_{USLE}) e na Razão de Dispersão (RD).

A USLE foi o primeiro modelo de grande aceitação na previsão da perda de solo por erosão hídrica, publicada originalmente em Wischmeier e Smith (1960) e na sua versão definitiva em Wischmeier e Smith (1978). Sua representação clássica é a seguinte:

$$A = R K L S C P \quad (16)$$

onde: A é a taxa de erosão; R é o fator erosividade da chuva; K é o fator erodibilidade do solo; L é o fator comprimento de rampa; S é o fator inclinação de rampa; C é o fator de cobertura vegetal e P é o fator de práticas de cultivo e manejo.

Os parâmetros são obtidos de experimentos em parcelas experimentais específicas: 22 m de comprimento, 9% de declividade e superfície limpa e permanentemente arada. Com o objetivo de acelerar a obtenção dos resultados são comumente empregados simuladores de chuva.

A erodibilidade dos solos é representada pelo fator K. Várias pesquisas voltam-se à tentativa de relacionar o valor de K a outras propriedades do solo. Apesar de estas relações serem consideradas muito complexas, a busca de correlações deste tipo ocorre porque a medida direta do fator erodibilidade em parcelas experimentais é considerada dispendiosa e demorada.

A granulometria, associada a informações sobre o teor de matéria orgânica, tipo de macroestrutura e classe de permeabilidade dos solos, permite a estimativa do fator K da USLE (K_{USLE}) através do nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) (Figura 18). Os dados da granulometria de interesse na estimativa do K_{USLE} são: a porcentagem de silte mais areia muito fina (0,002 a 0,1 mm) e a porcentagem de areia (0,1 a 2 mm).

O critério proposto indica que são potencialmente erodíveis solos com:

- $K_{USLE} > 0,20$

Outro parâmetro granulométrico dos solos relacionado à erodibilidade é a comparação entre os teores de silte mais argila (< 0,05mm) obtidos em ensaios de granulometria com e sem defloculante através da Razão de Dispersão (RD). Bastos (1999) sugere a realização de ensaios de sedimentação conforme a especificação para os ensaios de dispersão SCS (Soil Conservation Service), com amostras menores e na condição de umidade natural.

O ensaio de dispersão SCS (ou ensaio sedimentométrico comparativo ou ainda ensaio duplo hidrométrico) tem por objetivo a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pela comparação entre as porcentagens (em massa) de partículas determinadas de acordo com o ensaio de sedimentação proposto para a análise granulométrica (NBR 7181/16) e de acordo com o ensaio de sedimentação realizado sem agitação mecânica e agente defloculante (Figura 19).

O ensaio foi desenvolvido pelo SCS/USDA (Soil Conservation Service/United States Department Agriculture) e recentemente normatizado no Brasil pela norma ABNT NBR

13602/96 (Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo).

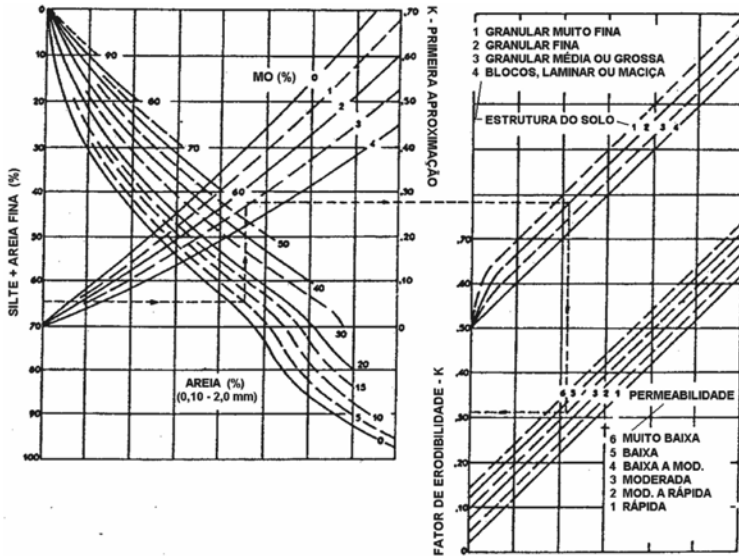


Figura 18. Nomograma de Wischmeier *et al.* (1971). (VILAR; PRANDI, 1993).

O critério proposto por Bastos (1999) para a avaliação da erodibilidade indica que são potencialmente erodíveis solos com:

- **RD > 50%**



Figura 19. Amostras de solo submetidas ao ensaio sedimentométrico comparativo (BASTOS, 1999).

3.3.2.2 2º nível – Avaliação da erodibilidade a partir de ensaios da Metodologia MCT

A obtenção da classificação MCT dos solos envolvidos nos potenciais processos erosivos nas bordas dos reservatórios, baseada nos ensaios Mini-MCV e perda por imersão (NOGA-

MI; VILLIBOR, 1995), permite a aplicação do critério proposto por Villibor *et al.* (1986), considerado satisfatório com base nos solos subtropicais estudados por Bastos (1999). Segundo o critério, solos classificados como LG' (solos argilosos lateríticos) são considerados resistentes à erosão, solos LA e LA' (areias e areias argilosas lateríticas, respectivamente) são potencialmente erodíveis, enquanto os solos NS' (solos de comportamento siltoso) são considerados altamente erodíveis. Segundo os autores, solos de outras classes apresentam difícil previsão da erodibilidade somente pela classificação MCT.

Entretanto, o critério definitivo proposto por Bastos (1999) para este nível de avaliação da susceptibilidade à erosão é o critério de erodibilidade MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1979). Para sua aplicação devem ser realizados os ensaios de infiltrabilidade e de erodibilidade específica, considerados complementares na Metodologia MCT.

A infiltrabilidade, propriedade hidráulica de solos não saturados, representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície. É controlada sobretudo pelas tensões de sucção. Nos climas tropicais e subtropicais úmidos, apesar da elevada pluviosidade, devido à forte evapotranspiração e à boa drenagem da maioria solos residuais, a infiltrabilidade é mais representativa que a permeabilidade saturada como a propriedade que regula a quantidade de escoamento superficial. A velocidade com que ocorre a infiltração é medida em um ensaio específico pelo coeficiente de sorção (“sorptivity”).

O chamado ensaio de infiltrabilidade consiste em submeter uma amostra cilíndrica, confinada lateralmente pelo tubo de amostragem, a um fluxo ascendente por ascensão capilar. A velocidade de infiltração é quantificada através da cronometragem do fluxo por um tubo capilar horizontal no nível da base da amostra (Figura 20). Os resultados das leituras da distância percorrida no tubo capilar são plotados pelo tempo cronometrado (em $\text{min}^{1/2}$). Uma curva ajustada aos pontos mostra um nítido encurvamento, com um íngreme trecho retilíneo inicial seguido por outro de tendência horizontal, significando que a frente de umidade atinge o topo do corpo de prova (Figura 21). O gradiente do trecho retilíneo inicial da curva é o coeficiente de sorção s (em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$) (Equação 17). O valor de s é geralmente determinado em amostras na umidade natural e em amostras previamente secas ao ar.

$$s = \frac{(L_b - L_a) S}{10 (t_b - t_a) A} \quad (17)$$

onde: S é a área da seção do tubo capilar e A é a área da seção da amostra.



Figura 20. Ensaio de infiltrabilidade pela Metodologia MCT (BASTOS, 1999).

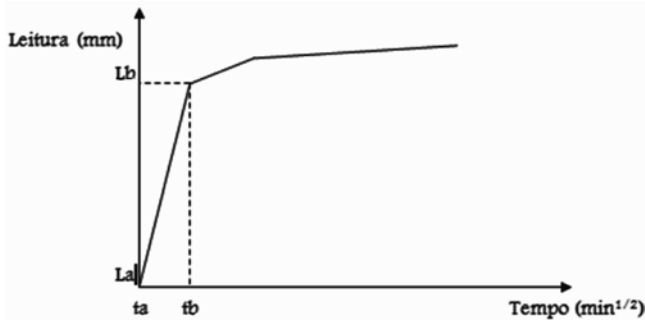


Figura 21. Curva típica $L \times t^{1/2}$ e elementos para estimativa do coeficiente de sorção (s) no ensaio de infiltração da Metodologia MCT (BASTOS, 1999).

A erodibilidade específica é avaliada por um ensaio de perda de massa por imersão, similar àquele estabelecido pela Metodologia MCT como ensaio classificatório. Amostras indeformadas do solo, confinadas lateralmente pelo tubo de amostragem e com topo coincidente com a borda do tubo, são imersas em água por um período de 20 horas (Figura 22). O percentual de perda de solo seco em massa em relação ao peso seco total da amostra representa a erodibilidade específica (π_i).

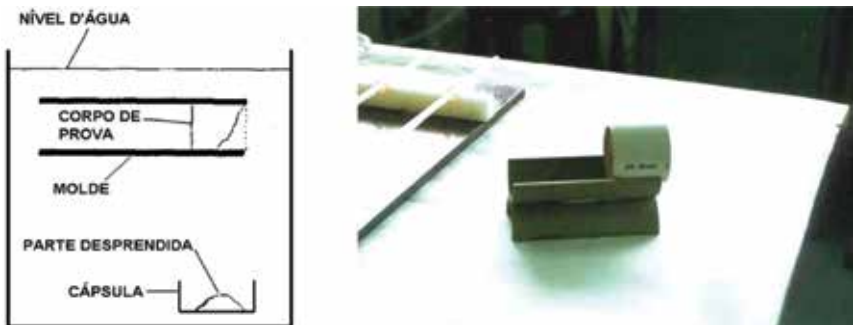


Figura 22. Esquema e amostra preparada do ensaio de erodibilidade específica (BASTOS, 1999).

A partir dos dados de coeficiente de sorção e perda de massa por imersão modificado, Nogami e Villibor (1979) estabelece a relação $\pi_i/s = 52$ como limite ao critério de erodibilidade. Solos com $\pi_i/s > 52$ são considerados erodíveis, alertando para adequadas medidas de proteção à erosão em taludes de corte. Em Nogami e Villibor (1995) o mesmo critério é proposto, mas expresso graficamente. Baseado em um maior número de ensaios (também com solos paulistas), em Pejon (1992) é proposta uma modificação ao limite do critério para $\pi_i/s = 40$. O Tabela 5 destaca outros trabalhos onde o critério pela Metodologia MCT foi adotado.

O limite para a razão π_i/s (perda por imersão / coeficiente de sorção) igual a 52 (proposto originalmente por NOGAMI; VILLIBOR, 1979) é sugerido por Bastos (1999) para distinguir solos potencialmente erodíveis. Logo, pelo critério proposto indica-se como potencialmente erodíveis solos com:

- $\pi_i/s > 52$

3.3.2.3 2º nível – Avaliação da erodibilidade a partir de ensaios de resistência ao cisalhamento

Este é considerado o nível mais elevado na avaliação indireta da erodibilidade segundo Bastos (1999). Segundo o autor, a resistência ao cisalhamento, em particular a coesão superficial, é a propriedade dos solos que melhor explica física e mecanicamente a resistência à erosão por fluxo d'água superficial dos solos residuais não saturados. Para a avaliação da erodibilidade é sugerida a realização de ensaios de cisalhamento direto, mais simples e mais adequados à obtenção dos parâmetros de resistência necessários.

Tabela 5. Trabalhos onde o critério de erodibilidade pela Metodologia MCT. foi empregado

AUTOR	MATERIAIS ESTUDADOS
Silva (2000)	Solos coluvionares e saprolíticos de complexo granítico-gnaíssico da bacia do Rio Maracujá, município de Ouro Preto/MG
Gomes (2001)	Solos da Formação Barreiras e embasamento cristalino envolvidos em um processo erosivo na região costeira Cabo de Santo Agostinho / PE
Lemos (2002)	Latossolo Vermelho Amarelo, em duas distintas áreas de cultivo: plantio direto e plantio convencional, no município de Pinhais/PR
Ramidan (2003)	Solo residual de rochas metamórficas (muscovita gnaíse) pertencentes ao Grupo Araxá em área de empréstimo da barragem de terra da UHE de Itumbiara - Itumbiara/GO
Ferreira (2004)	Solos de formações sedimentares presentes em feições erosivas da cabeceira do Córrego Tucum, São Pedro/SP
Morais <i>et al.</i> (2007)	Saprólito e solo laterítico formado de rocha gnáíssica da Bacia do Rio Maracujá, município de Ouro Preto/MG,
Meira (2008)	Solos em campo experimental com ocupação urbana, sobre a Formação Barreiras, Recife/PE
Ávila (2009)	Solos residuais de rochas sedimentares da microbacia do Arroio Sarandi, voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria/RS
Ide (2009)	Solos arenosos em processos erosivos, resultantes das Formações do Grupo Baurú e Sedimentos Cenozóicos, município de Baurú/SP
Fernandes (2011)	Horizonte A/B e substrato rochoso (arenito e siltito) em área de voçoroca, Santa Maria/RS
Basso (2013)	Solos superficiais (horizontes A, B e C) e do substrato rochoso (camadas 2C e 1ª de arenito) de um perfil típico da área da voçoroca, São Francisco de Assis/RS
Medeiros (2014)	Solos dos terrenos da alta bacia do ribeirão Barreiro, município de Alexânia/GO
Quirino <i>et al.</i> (2014)	Solos sujeitos a processos erosivos no perímetro urbano de Catalão/GO

O emprego de ensaios de cisalhamento direto nos estudos sobre a erodibilidade dos solos também consta nos estudos de Lima (1999 e 2003), Fragassi (2001), Gomes (2001), Ferreira (2004), Lafayette (2006), Chuquipiondo (2007), Ide (2009), Mattos (2009), Stephan (2010), Fernandes (2011), Basso (2013) e Campos (2014)

A análise estatística de dados experimentais de solos residuais, realizada por Bastos (1999), provou ser o potencial à redução da coesão do solo por inundação, representado pela variação de coesão (Δc), a propriedade de comportamento melhor relacionada à erodibilidade medida em ensaios de Inderbitzen. O parâmetro Δc é calculado a partir da coesão medida em ensaios de cisalhamento direto convencionais ou com controle de sucção com amostras na umidade de campo e em ensaios inundados.

Os solos potencialmente erodíveis apresentam elevada variação na coesão com a inundação. Numa primeira aproximação, o critério proposto proposto por Bastos (1999) indica como solos potencialmente erodíveis:

- $\Delta c > 85 \%$

Como alternativa à realização de ensaios de cisalhamento direto, a variação na coesão pode ser estimada indiretamente pelo ensaio de cone de laboratório (Alcântara, 1997, Morais *et al*, 2007 e Ide *et al*, 2009), ilustrado na Figura 23, através do parâmetro de penetração DP (Equação 18).



Figura 23. Ensaio de cone de laboratório (BASTOS, 1999).

$$DP = \frac{Psat - Pwnat}{Pwnat} \quad (18)$$

Onde $Psat$: penetração na amostra saturada e $Pwnat$: penetração na amostra no teor de umidade natural

Entretanto, o critério de erodibilidade difere muito com as variantes do ensaio e este fato limita sua generalização. O emprego deste ensaio torna necessário o estabelecimento de critérios específicos às condições do equipamento, ao método de ensaio e ao tamanho de amostra.

3.4 Roteiro e fluxograma do método proposto por Bastos (1999)

A sequência de procedimentos propostos para uma abordagem geotécnica à erodibilidade de solos residuais tropicais e subtropicais não saturados, visando o enfrentamento da situação dos problemas de erosão de bordas de reservatórios, é a seguinte:

1º passo) Levantamento de dados preliminares

- 1.a) Descrição das características geométricas do problema;
- 1.b) Caracterização geológica e pedológica dos perfis de solos envolvidos;
- 1.c) Posição dos perfis no contexto da encosta;
- 1.d) Descrição in situ de características morfológicas do perfil: distribuição e espessura dos horizontes, macroestrutura e drenagem.

2º passo) Investigação in situ do comportamento dos solos frente à erosão

Descrição dos processos erosivos envolvendo os solos de interesse na área de influência do reservatório: presença de sulcos, ravinas, voçorocas, buracos, solapamentos, colapsos, entre outros. Estimativa da erodibilidade relativa dos solos.

3º passo) Avaliação da erodibilidade – indireta (3.a) ou direta (3.b)

3.a) Avaliação direta da erodibilidade

Realização de ensaios de Inderbitzen para a estimativa dos parâmetros hidráulicos de erodibilidade, no mínimo com amostras na condição de umidade natural.

Aplicação do critério de erodibilidade pela taxa de erodibilidade K

- $K < 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ – solos de baixa erodibilidade
- $0,001 < K < 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ – solos de mediana erodibilidade
- $K > 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ – solos de alta erodibilidade

3.b) Avaliação indireta da erodibilidade

3.b.i) Realização de ensaios de desagregação do solo em água. Principal indicativo: solos que desagregam em água são potencialmente erodíveis.

3.b.ii) Realização de ensaios de caracterização – granulometria com e sem defloculante e limites de Atterberg.

Avaliação da erodibilidade pelo teor de finos e índice de plasticidade:

$\% \text{ pass } \#200 < 55 \% / \text{IP} < 10 \%$ – solos potencialmente erodíveis

Avaliação da erodibilidade pelo fator K_{USLE} estimado pelo nomograma de Wischmeier *et al.* (1971):

$K_{\text{USLE}} > 0,20$ – solos potencialmente erodíveis

Avaliação da erodibilidade pela Razão de Dispersão:

$\text{RD} > 50 \%$ – solos potencialmente erodíveis

3.b.iii) Realização de ensaios da Metodologia MCT: Mini-MCV, perda por imersão, infiltrabilidade e erodibilidade específica

Obtenção da classificação MCT (ensaios Mini-MCV e perda por imersão) e identificação de solos altamente erodíveis: NS', potencialmente erodíveis:

LA e LA' e resistentes à erosão: LG'

Obtenção da razão pi/s (ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica) e aplicação do critério de erodibilidade MCT:

$\text{pi/s} > 52$ – solos potencialmente erodíveis

3.b.iv) Realização de ensaios de cisalhamento direto com amostras na condição de umidade natural e inundados

Avaliação da erodibilidade pela variação de coesão Δc :

$\Delta c > 85 \%$ – solos potencialmente erodíveis

O fluxograma apresentado na Figura 24 ilustra a seqüência de procedimentos listadas acima e que constituem a proposta de avaliação geotécnica da erodibilidade de solos dos terrenos marginais a bordas de reservatórios.

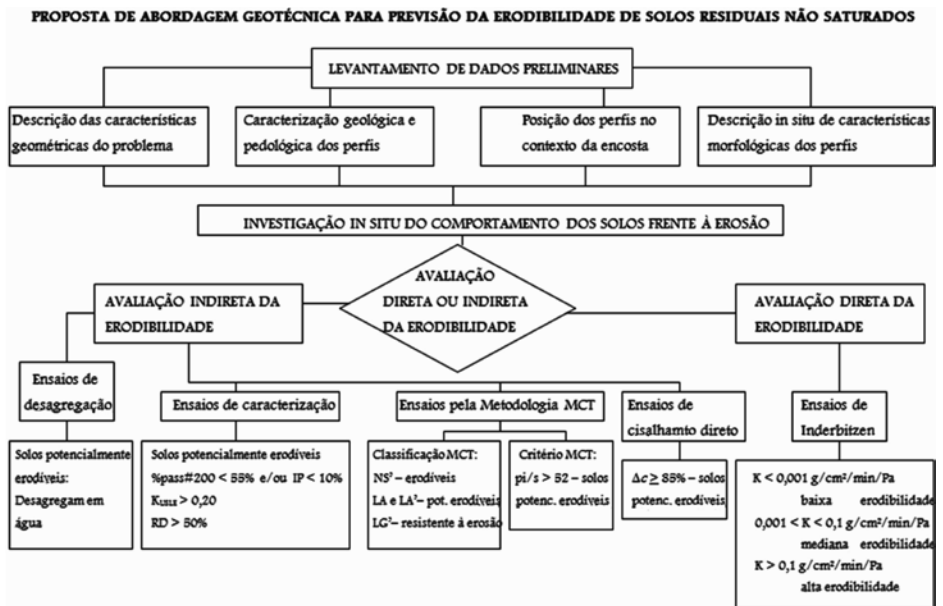


Figura 24. Fluxograma que ilustra proposta metodológica para avaliação da erodibilidade de solos residuais não saturados de Bastos (1999) potencialmente aplicada à terrenos marginais a reservatórios.

4 Comentários Finais

Este capítulo apresentou uma ampla revisão sobre temas associados com solos não saturados e processos erosivos. Na primeira parte foi discutido o papel da não saturação na resistência ao cisalhamento de solos não saturados. Foi realizada uma revisão dos principais modelos de resistências ao cisalhamento considerando sucção. Na segunda parte foi apresentada a associação entre a não saturação do solo e processos de erosão.

Apesar da extensa revisão apresentada para os temas, a complexidade inerente dos processos erosivos não permite que todos os aspectos importantes sejam explorados. O papel da não saturação, como fator determinante da resposta do solo aos agentes erosivos, pôde ser claramente demonstrado. Apesar da avaliação da erosão ser por vezes qualitativa, a solução prática de problemas passa sempre pelo entendimento do comportamento dos materiais envolvidos e, nesse sentido, a incorporação de variáveis como a sucção pode levar a hipóteses e soluções mais adequadas.

Bibliografia

AGUIAR, V.G. Bacia Hidrográfica do Córrego Granada – Aparecida de Goiânia – GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana. Goiânia/GO, 2009, 95p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.

ALCÂNTARA, M.A.T. Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos. São Carlos/SP, 1997, 128p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, J.G.R. Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO. Goiânia/GO, 2014, 134p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.

ÁVILA, L.O. Erosão na microbacia do Arroio Sarandi: voçoroca do buraco fundo, Santa Maria/RS. Santa Maria/RS, 2009, 103p. Dissertação de Mestrado em Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Universidade Federal de Santa Maria.

BAO, C.; GONG, B.; ZHAN, L. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soils, Keynote lecture. Proc. 2nd Inter. Conf. on Unsaturated Soils, Pequim, v. 1, p. 71–98, 1998.

BASSO, L. Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis – RS. Santa Maria/RS, 2013, 139p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

BASTOS, C.A.B. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Porto Alegre/RS, 1999, 269p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BRASIL. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisas. Recomendações para proteção de taludes contra erosão. Rio de Janeiro/RJ: IPR/DNER, 1979. 59p.

CAMPOS, C.J.M. Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em solo não saturado da região de Bauru – SP. Bauru/SP, 2014, 140p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.

CHAMECKI, P.R. Metodologias de laboratório para estudos da erosão hídrica em solos: aplicação a uma argila da Formação Guabirotuba. Curitiba/PR, 2002, 232p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná.

CHUQUIPIONDO, I.G.V. Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água: estudo de caso trecho de vazão reduzida Capim Branco I Araguari

Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2007, 195p. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.

FÁCIO, J.A. Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal. Brasília/DF, 1991, 107p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

FERNANDES, J.A. Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca de São Valentim, RS. Santa Maria/RS, 2011, 123p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria.

FERREIRA, C.S.M. Erosão – Investigações de campo e laboratório desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981, São Paulo/SP. Anais... São Paulo/SP: ABGE, 1981. v.1, p.203–216.

FERREIRA, M.D. Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação – Córrego do Tucum (São Pedro/SP). São Carlos/SP, 2004, 171p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FONSECA, A.M.M.C.C. – Técnicas para previsão, prevenção e contenção da erosão em taludes e encostas. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981, São Paulo/SP. Anais... São Paulo/SP: ABGE, 1981. v.1, p.217–234.

FONSECA, A.M.M.C.C.; FERREIRA, C.S.M. Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS, 1., 1981, Rio de Janeiro/RJ. Anais..., Rio de Janeiro/RJ: COPPE/ABMS, 1981. p.646–667.

FRAGASSI, P.E.M. Estudo da erodibilidade dos solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG). Viçosa/MG, 2001, 136p. Dissertação de Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R.; Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division - ASCE, USA*, v. 103, p. 447–466. 1977.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R.; WIDGER, R.A. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal, Canada*, v. 15, n. 3, p. 313–321, 1978.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soil*. John Wiley & Sons, Inc: New York, USA, 1993. 517p.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. FREDLUND, M. D.; *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc: New Jersey, USA, 2012. 926p.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; FREDLUND, M.D.; BARBOUR, S.L. Relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal, Canada*, v. 33, n° 3, p. 440–448, 1996.

FREIRE, E.P. Ensaio Inderbitzen Modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, VII, 2001, Goiânia/GO. Anais..., Goiânia/GO: ABGE, 2001.

GOMES, F.S. Estudo da erodibilidade e parâmetros geotécnicos de um solo em processo erosivo. Recife/PE, 2001, 209p. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco

HIGASHI, R.A.R. Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental. Florianópolis/SC, 2006, 486p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

HOLMGREN, G.G.S.; FLANAGAN, C.P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.623, p.218–239, 1977. (Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, Eds: Sherard, J.L. and Decker, R.S.).

IDE, D.M. Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana. São Carlos/SP, 2009, 129p. Dissertação de Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

IDE, D.M.; SILVA, R.A.; GIACHETI, H.L. Emprego de diferentes métodos para avaliação geotécnica da erodibilidade de um solo. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 5, 2009, São Paulo/SP. Anais... São Paul/SP:ABMS, 2009.

ESCARIO, V.; SAEZ, J. Shear Strength of partly saturated soils. Géotechnique, England, v. 36, n° 3, p. 453-456, 1986.

GAN, J.K.M.; FREDLUND, D.G. Multistage direct shear testing of unsaturated soils. Geotechnical Testing Journal, USA, v. 11, n° 2, p. 132–138, 1988.

INDERBITZEN, A.L. An erosion test for soils. Materials Research & Standards, Philadelphia, v.1, n.7, p.553–554, 1961.

INFANTE SEDANO, J. A.; VANAPALLI, S. K. The relationship between the critical state shear strength of unsaturated soils and the soil-water characteristic curve. Unsaturated Soils – Alonso e Gens (ed). London, p. 253-258, 2011.

KÜHN, V. O. Resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado considerando altas sucções. 2014, 194 P. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia 2014.

LAFAYETTE, K.P.V. Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE. Recife/PE, 2006, 358p. Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

LEMOS, C.F. Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen. Curitiba/PR, 2002, 82p. Dissertação de Mestrado em Agronomia, Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná.

LIMA, M.C. Contribuição ao estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus. Brasília/DF, 1999, 150p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília.

LIMA, M.C. Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília/DF, 2003, 336p. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

MATTOS, K.C.A. Processos de instabilização em taludes rodoviários em solos residuais arenosos: Estudo na rodovia Castello Branco (SP 280), km 305 a 313. São Carlos/SP, 2009, 111p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MEDEIROS, G.F. Susceptibilidade à erosão na Alta Bacia do Ribeirão Barreiro – Alexânia-GO. Goiânia/GO, 2014, 172p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.

MEIRA, F.F.D.A. Estudo de processos erosivos em encostas ocupadas. Recife/PE, 2008, 474p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

MENDES, C.A.R. Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ. Rio de Janeiro/RJ, 2006, 227p. Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MENEZES, S.M.; CARVALHO, D.; ALBUQUERQUE, P.J.R. Estudo da erodibilidade de solos em encostas no sudeste do Brasil. Revista Tecnologia, Fortaleza/CE, v. 27, n. 1, p. 58-63, 2006.

MORAIS, F.; BACELLAR, L.A.P.; SOBREIRA, F.G. Avaliação da susceptibilidade de solos gnáissicos à erosão subsuperficial. Sociedade & Natureza, Uberlândia/MG, 19 (2), p.233-241, 2007.

MORIWAKI, Y.; MITCHELL, J.K. The role of dispersion in the slaking of intact clay. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.623, p.172-190, 1977. (Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, Eds: Sherard, J.L. and Decker, R.S.).

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Krefeld, n.19, p.196-199, 1979.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo/SP: Editora Villibor, 1995. Cap.7: Erosão na faixa marginal, p.169-196.

PAIVA, C.F.E Avaliação da erodibilidade de alguns horizontes residuais pertencentes à Bacia do Rio Una – Taubaté – SP. São José dos Campos/SP, 2004, 194p. Tese de Doutorado em Ciências. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico da Aeronáutica.

PEJON, O.J. Mapeamento geotécnico da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:1000.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos. São Carlos/SP, 1992, 213p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

QUIRINO, G.H.A.; MORAIS, L.S.; SILVA, P.B.; MELO, M.T.S. Erodibilidade de Solos: Comparação entre os ensaios Inderbitzen Modificado e Slaking Test. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XVII, 2014, Goiânia/GO. Anais... Goiânia/GO:ABMS, 2014.

RAMIDAN, M.A.S. Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara-GO. Rio de Janeiro/RJ, 2003, 242p. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia Civil: Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

REGO, J.J.V. – Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaiss. Rio de Janeiro/RJ, 1978. 125p. Dissertação de Mestrado em Ciências – Coordenação de Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

SANTOS C.A. Comportamento hidrológico superficial, subsuperficial e a erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto - MG. Ouro Preto/MG, Minas Gerais, 2001, 107p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade Federal de Ouro Preto.

SANTOS, R.M.M. Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia. Brasília/DF, 1997, 120p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

SILVA, T.R.M. Caracterização e erodibilidade dos solos de uma voçoroca na região de Ouro Preto, Minas Gerais. Rio de Janeiro/RJ, 2000, 107p. Dissertação de Mestrado em Ciência em Engenharia Civil, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SIQUEIRA, A.G.; AZEVEDO, A.A.; DUARTE, H. Erosão em margens de reservatórios. Revista ABGE, n.89, p.4, 2011.

STEPHAN, A.M. Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen. Viçosa/MG, 2010, 165p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa.\

VANAPALLI, S. K. Shear Strength of unsaturated soils and its applications in geotechnical engineering practice. Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, Newcastle, v. 2, p. 579-598, 2010.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E.; CLIFTON, A.W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, Canadá, v. 33, n° 3, p. 379–392, 1996.

VILAR, O.M. A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, Canada, v. 43, p. 1088–1095. 2006.

VILAR, O.M.; PRANDI, E.C. Erosão dos solos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Solos do interior de São Paulo. São Carlos/SP: ABMS / EESC–USP, 1993. Cap.7, p.177–206.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.; FABBRI, G.T.P. Proteção à erosão em pavimentos de baixo custo. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21., 1986, Salvador/BA. Anais... Rio de Janeiro/RJ: ABPv, 1986. v.2, p.413–430.

WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. – A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation, v.26, n.5, p.189–193, 1971.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 7., 1960. Transactions... 1960. v.1, p.418–425.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Handbook, Washington, n.537, 57p., 1978.

CAPÍTULO 6

Interação solo-atmosfera e a sua relação com erosão em borda de reservatórios

Gislaine Cristina Luiz
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Patrícia de Araújo Romão
Fillipe de Paula Almeida

Palavras-chave: Escalas Climáticas. Erosão de borda. Erosividade.

1 Introdução

No Brasil, estudos realizados com o objetivo de investigar os diversos impactos inerentes à construção de reservatórios como fonte de obtenção de água ou como recurso para produção de energia hidrelétrica abordam, entre outros temas, aqueles que se relacionam à qualidade da água dos reservatórios, às modificações do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, às alterações climáticas locais. Entre os impactos ambientais inerentes à construção, ressaltam-se aqueles relacionados à disseminação de doenças; às perdas do patrimônio histórico e cultural; à modificação das atividades econômicas, tanto local quanto regionalmente; às inundações de áreas agrícolas e urbanas; à modificação do padrão migratório de peixes e à perda de fauna e flora aquática. Tais impactos estão relacionados diretamente ao tamanho e ao volume do reservatório (TUNDISI, 1994).

Em referência a esses impactos, destacam-se aqueles que são deflagrados a partir da alteração nos processos físicos que se estabelecem na camada limite entre atmosfera e superfície, devido à presença da lâmina d'água no local em que antes não existia o reservatório. Entre eles, a deflagração ou mesmo a aceleração dos processos erosivos podem ocorrer em áreas marginais, nas quais se retirou material para a sua construção ou mesmo onde foram alterados ou intensificados o uso e a ocupação. Até mesmo áreas não sujeitas a uso e ocupação podem sofrer aceleração de processos erosivos, já que a presença do reservatório altera os complexos e dinâmicos processos de interação entre o solo e a atmosfera.

Em relação aos processos físicos atuantes em áreas de borda de reservatórios e relacionados à dissipação de energia, a sua determinação e previsão constituem ainda desafios aos pesquisadores, pois existem poucos estudos. Nesse sentido, Geiger (1990) coloca que, na escala microclimática, um dos aspectos de maior complexidade para a determinação e compreensão desses processos é o movimento do ar e a conseqüente alteração do potencial de erosão eólica. Morais (2011) apresenta a necessidade de serem consideradas as diferenças entre as temperaturas do ar e da água e que dificilmente são obtidas informações sobre a velocidade dos ventos sobre essas superfícies.

Quanto à interação energética entre escoamentos oscilatórios e a vegetação submersa na produção de ondas nos reservatórios, há o desconhecimento de detalhes sobre o fenômeno no Brasil (MORAIS, 2011). Aspectos como vegetação submersa e pista de formação de ventos influenciam diretamente na dissipação da energia de escoamentos. No caso da vegetação submersa, ela deixa de ser apenas um obstáculo ao escoamento e atua como agente efetivo na dissipação da energia da onda. Especificamente, os processos de formação de ondas são abordados no Cap. 11. A erosão de borda de reservatório pode ocorrer como resultado do impacto das ondas, produzidas tanto pelas embarcações quanto pela alteração microclimática, resultante da variação do fluxo de energia entre superfície e atmosfera.

Outra forma de entender a dinâmica do meio físico na evolução da erosão de borda de reservatório deve-se à perda de resistência do solo abaixo do nível d'água, devido à ocorrência de fenômenos termoquímicos e às modificações na interação solo-atmosfera acima do nível freático (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015). O fato de haver a presença de lâmina d'água com nível variável em local antes não banhado por água gera uma nova condição de umidade e saturação, o que suscita variações de sucção que afetam a estabilidade dos taludes dos maciços, podendo ocasionar rupturas e o desencadeamento de processos erosivos (CAMAPUM DE CARVALHO, et al., 2014). A quantidade de escoamento superficial também pode ser ampliada, já que a elevação do nível do lençol freático compromete parte da capacidade de armazenamento do solo.

De um modo geral e já bastante discutido pela comunidade acadêmica, os impactos provenientes dos processos erosivos apresentam ligação direta à relação entre superfície e atmosfera, como resultado do balanço de energia que proporciona variação do fluxo de umidade e, conseqüentemente, variação da sucção do maciço. O fluxo de energia solar incidente sobre o globo terrestre é respondido pela atmosfera, oceanos, criosfera e biosfera de várias maneiras, tais como pelo armazenamento, pela reemissão ou redistribuição da energia eletromagnética.

No caso da variação da temperatura, considera-se que o processo de fluxo de calor entre superfície e atmosfera é modificado em razão da presença do extenso corpo hídrico. Essa modificação se deve ao fato de que, na superfície aquática, prevalece o fluxo do calor latente, sendo que o aquecimento e o resfriamento ocorrem mais lentamente, pois o calor específico da água é mais elevado do que da superfície terrestre. O corpo hídrico é semitransparente à penetração da energia solar e apresenta baixo albedo, sendo a energia absorvida transferida para as profundidades superiores. Durante o dia, essa energia fica disponível no corpo hídrico na forma de calor latente, e as trocas de calor entre água e ar são mais lentas.

Por outro lado, o fluxo de troca de energia entre a superfície terrestre, aqui considerando o solo e a atmosfera, ocorre por meio do calor sensível. A superfície se apresenta opaca à radiação solar e de albedo elevado, o que implica considerar que há maior disponibilidade da energia incidente para o processo de troca de fluxo de calor com a atmosfera. Nessa superfície, a transferência da energia solar incidente para a atmosfera ocorre mais rapidamente quando comparada com a superfície aquática, aquecendo mais rapidamente o ar sobrejacente a essas superfícies. Como consequência, a água se aquece e se resfria mais lentamente que o solo.

Nos corpos hídricos, a energia absorvida e transformada em calor latente fica disponível nas moléculas de água e transferida lentamente para a atmosfera, equilibrando a

variação de temperatura, principalmente no período noturno, momento em que cessa o *input* de energia solar. Já a superfície terrestre se aquece mais rapidamente, pois apresenta maior disponibilidade de energia no ambiente na forma de calor sensível e apresenta elevado albedo quando comparada com a superfície hídrica. Essas superfícies perdem a energia e se resfriam mais rapidamente quando comparadas com o corpo hídrico, após cessar o fornecimento da radiação solar. Esse processo pode ser observado em escala diária, quando, durante o dia, a superfície terrestre se aquece mais rapidamente do que a superfície aquática, por apresentar maior disponibilidade de energia na forma de calor sensível na camada limite entre superfície-atmosfera, favorecendo o maior aquecimento da superfície e a troca mais efetiva de calor com a camada da atmosfera sobrejacente. Logo, durante o dia, as áreas na borda do reservatório apresentam-se mais aquecidas, com maior disponibilidade de calor sensível, se comparadas com superfícies hídricas. Contudo, à noite, o processo se inverte, e as áreas na borda do reservatório perdem energia mais rapidamente do que o corpo hídrico, resultando no aquecimento mais intenso sobre a lâmina d'água, que, nesse momento, transfere calor latente para a atmosfera. Como consequência dessa variação diferenciada de aquecimento entre superfície aquática e terrestre, estabelece-se gradiente de pressão e são intensificados os mecanismos de brisas.

Por outro lado, considerando-se a disponibilidade de umidade no reservatório e ainda a consequente absorção da energia solar, o processo de evaporação se intensifica no local. Nesse processo, há um consumo de energia pelas moléculas d'água; aproximadamente 600 calorias por grama ficam retidas nas moléculas d'água e, assim, a evaporação consome calor sensível, o que contribui para o resfriamento do ar na superfície adjacente, pois a energia consumida no processo de evaporação não mais ficará disponível para o aquecimento do ambiente, inclusive do ar (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Como consequência dessa variação no fluxo de energia entre superfície hídrica e atmosfera, apresenta-se a redução das amplitudes térmicas e ainda o favorecimento à formação de brisa e à mistura do ar, reduzindo-se os contrastes diários de temperatura. Ainda como efeito dessas novas relações de fluxo que se estabelecem na camada limite entre superfície hídrica e atmosfera, um dos elementos climáticos, o vento, poderá ser potencializado por causa da diferença de pressão estabelecida na fronteira entre a superfície e a atmosfera.

O vento é o movimento do ar; sua origem é diretamente relacionada ao gradiente de pressão atmosférica, o que resulta no deslocamento de ar na atmosfera. A velocidade dos ventos depende da diferença entre gradientes de pressão. Além desse aspecto, está diretamente relacionada à fisiografia, principalmente à altitude e à morfometria, além de depender também das características do reservatório (Cap. 11).

Assim, entre os processos referentes à erosão em margens de reservatórios, destacam-se, neste capítulo, aqueles que estão associados à dinâmica climática, levando-se em conta o fato de se considerar fundamental o entendimento do clima, a partir de abordagens em diferentes níveis escalares, temática sobre a qual se discorre no item seguinte. Depois disso, são apresentadas as aplicações dessas análises aos casos dos Estados de Goiás e de Minas Gerais, onde se encontram três reservatórios considerados exemplos, com destaque às condições climáticas que influenciam na análise da erosividade das chuvas.

2 Dinâmica climática e os diferentes níveis escalares do clima no entendimento dos processos erosivos de borda de reservatório

A dinâmica de troca de energia, principalmente por meio da circulação de calor e umidade, desencadeia uma série de processos no meio físico (BERTALANY, 1975). Desses processos resultam a pedogênese; as formas do relevo; o ciclo hidrológico; o crescimento, o desenvolvimento e a distribuição das plantas e animais (DREW, 1994; SANTOS, 2000).

Sob essa perspectiva, o clima assume importante papel nos estudos integrados do meio físico, por estabelecer relação de interdependência entre os diferentes sistemas que compõem a biosfera. A característica climática de uma determinada localidade é descrita como variável e irregular, tanto no espaço quanto no tempo cronológico (SORRE, 1951), e essa variabilidade e irregularidade são expressas nos diferentes quadros fisionômicos na natureza, a partir dos processos físicos e químicos comandados pela dinâmica da atmosfera.

Essa dinâmica pode ser notada a partir das variações diárias, mensais, sazonais, anuais e interanuais e, até mesmo, por eventos extremos, como os que ocorrem nas regiões tropicais, no que se refere às chuvas intensas, por exemplo. Essa variabilidade temporal e espacial atribui ao clima condição de insumo natural aos processos físicos e químicos, a partir das características e variações dos atributos atmosféricos, entre os quais a radiação solar, a temperatura, a umidade, a pressão atmosférica, os ventos (velocidade e direção) e a precipitação (SANT'ANNA NETO, 1988).

Entre os fatores que comandam a dinâmica geológica externa, a análise do clima permite o entendimento, por exemplo, dos processos que influenciam na formação e também do comportamento hidromecânico dos solos. Na formação dos solos, o clima influencia os processos de intemperismo, a partir da variação da temperatura e da umidade, e diretamente, a variação das propriedades físico-químicas e mineralógicas. Embora a formação e a evolução dos solos sejam determinadas no tempo geológico, alterações físico-estruturais decorrentes da ocupação e uso do solo podem ocorrer em curto espaço de tempo (cronológico), como demonstrado por Lima (2003), quando identificou perda de material fino, redução nos limites de plasticidade e na quantidade relativa dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, devido à maior exposição de taludes de erosão às intempéries climáticas, como já discutido no Cap. 4. Por outro lado, o comportamento dos solos e a variação do fluxo de umidade e temperatura no maciço apresentam estreita relação com as variáveis climáticas na interface solo-atmosfera, como a radiação solar, a temperatura, a umidade relativa do ar, a precipitação e o vento.

Dessa forma, a complexa dinâmica que se estabelece no ambiente físico é comandada pela atmosfera, sendo a formação e o desenvolvimento de cada elemento desse meio mutuamente dependentes entre si (BIGARELA, et al., 1994). Nessa dinâmica, o clima se constitui, a partir da camada limite entre atmosfera e superfície, em um dos agentes que determina a formação do solo e também as características das suas propriedades, resultantes das condições climáticas regionais e/ou microclimáticas (PALMIERI; LARACH, 1996).

Nesse contexto, a compreensão dessas relações deve ser feita por uma análise geográfica, considerando-se que a dinâmica da atmosfera ocorre a partir de espaços climáticos organizados em diferentes escalas (LUIZ, 2012a). Essas escalas compreendem níveis hierárquicos de grandezas climáticas, tanto espaciais quanto temporais (Tabela 1). É a partir da análise do clima nas suas diferentes escalas, desde a macroclimática à microclimática, que se pode com-

prender a evolução das classes dos solos, nas variações das propriedades químico-mineralógicas, físicas e estruturais do maciço e, conseqüentemente, em seu comportamento hidromecânico, constituindo-se elemento físico imprescindível à compreensão dos processos erosivos.

Tabela 1. Organização das escalas espacial e temporal do clima. (Modificado de MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Ordem de Grandeza	Subdivisões	Escla Horizontal	Escala Vertical	Temporalidades das Variações mais Representativas	Exemplificação Espacial
Macroclima	Clima zonal Clima regional	> 2.000 km	3 a 12 km	Algumas semanas a vários decênios	O globo, um hemisfério, oceano, continente, mares, etc.
Mesoclima	Clima regional Clima local Topoclima	2.000 km a 10 km	12 km a 100 m	Várias horas a alguns dias	Região natural, montanha, região metropolitana, cidade, etc.
Microclima		10 km a alguns metros	Abaixo de 100 m	De minutos ao dia	Bosque, uma rua, uma edificação/casa, etc.

Ao se considerarem as diferentes grandezas escalares da dinâmica atmosférica, a determinação das grandes classes de solos, como, por exemplo, os Latossolos, uma das classes que predominam no Brasil, deve-se à interação do substrato rochoso com as características climáticas da região onde se insere, sendo influenciado pela grandeza escalar mesoclimática. Nessa escala, a característica do clima é dada pela dinâmica da atmosfera superior, determinada por sistemas atmosféricos, popularmente conhecidos como massas de ar. Esses sistemas são formados sobre extensas áreas com características de temperatura e umidade homogêneas e irão configurar as escalas verticais superiores do clima (conforme Tabela 1) (LUIZ, 2012a).

Esse nível escalar determina a organização climática gerada pelos mecanismos da circulação regional, dada a partir do movimento da atmosfera (ventos), que ora avança ora recua, mantendo o ritmo temporal dos estados atmosféricos definidos pelas condições da pressão atmosférica, da temperatura, da umidade e dos ventos (MONTEIRO, 1976). Essas características, oriundas da atmosfera, determinam as condições gerais de tempo atmosférico, seja quente, frio, seco, úmido, chuvoso; a sucessão habitual dessas condições de tempo atmosférico determina as características do clima no lugar. Nesse nível escalar, a interação atmosfera-superfície, a deflagração e mesmo a aceleração dos processos erosivos em bordas de reservatórios podem ser compreendidas a partir da atuação de diferentes sistemas de massas de ar que atuam no território brasileiro e do respectivo potencial de erosividade das chuvas que essas massas de ar podem representar.

No geral, em função da abrangência territorial, as massas de ar atuantes no Brasil e que representam os sistemas produtores de chuvas são provenientes do extremo sul (massa polar); da região equatorial (massa continental); correntes de ar ascendentes associadas às perturbações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e vindas do oceano Atlântico; ascensão de ar quente por processo de convecção termodinâmica no interior do território, decorrente das elevadas temperaturas; e sistema definido como Zona de Convergência do Atlântico

Sul (ZCAS) (DIAS; SILVA, 2009). Esses sistemas respondem pelas precipitações de origem orográfica; de origem ciclônica, tanto frentes frias, de origem polar, quanto chuvas de longa duração e de baixa e média intensidade, mas também frentes quentes e úmidas oriundas da região equatorial; precipitações convectivas de alta intensidade e curta duração, de pequeno alcance espacial, mas que produzem evento de chuva com elevado potencial erosivo. Entre esses sistemas atmosféricos, ressalte-se que o sistema definido como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), associado com os sistemas ciclônicos, gera grandes volumes de precipitações, podendo ocorrer chuvas durante vários dias consecutivos (MELLO et al., 2007), o que potencializa a deflagração dos processos erosivos e dos movimentos de massa.

Em suma, os mecanismos da circulação do ar nos níveis da alta e média atmosfera respondem pelas características do clima de determinada localidade da superfície terrestre. Já a interação atmosfera-superfície, compreendida no âmbito da escala microclimática, gera condições de temperatura e umidade específicas ao local ao interagir com a superfície. Caracteriza-se essa interação pela descontinuidade da morfologia e da cobertura e uso do solo (Cap. 15), influenciando, no caso específico do perfil de solo, na variação espacial das propriedades físico-químicas e mineralógicas do maciço. Destaque-se que, apesar de específicas, as características microclimáticas são comandadas pela escala superior do clima (macroclimática) (LUIZ, 2012).

Ao se considerar a escala microclimática influenciando os processos erosivos de bordas de reservatórios, a presença da lâmina d'água, antes não existente no local, promove variações microclimáticas no entorno dos reservatórios, com alterações no regime de ventos, temperatura e umidade, podendo ocorrer variações também no comportamento das chuvas. Tais alterações decorrem da variação do fluxo de energia que se estabelece no local, entre a superfície (lâmina d'água) e a atmosfera.

Estudos realizados com o intuito de analisar as variações meteorológicas, que ocorrem com a construção de reservatórios, apontam que a presença de um grande lago artificial pode alterar a circulação do ar e o clima das regiões circunvizinhas (GUIDON, 1991). Tais alterações podem: a) promover modificações no comportamento da temperatura máxima e mínima, implicando a diminuição da primeira e o aumento da segunda (GRIMM, 1988); b) modificar o comportamento das chuvas, como, por exemplo, aumentando o número de dias com chuvas fracas e moderadas no final do período seco, resultante da maior disponibilidade de umidade por evaporação, oriunda do reservatório (SANCHES; FISCH, 2005), e aumentando, em média, em até 13%, a pluviosidade junto às cidades próximas ao reservatório e ainda aumentando as precipitações, em média, em até 16%, no trimestre mais chuvoso (CAMPOS, 1990).

Como discorrido, além de ocorrerem variações meteorológicas decorrentes da instalação do lago artificial, é relevante considerar que, nos reservatórios, estabelece-se nova condição de umidade e temperatura, resultante da troca de fluxo entre atmosfera e superfície aquática. Normalmente, as características do clima no entorno do reservatório, associadas aos ciclos sazonais da radiação solar, influenciam na troca de energia entre atmosfera e superfície aquática, gerando condições térmicas no reservatório, que se diferenciam no tempo (cronológico), horizontalmente e em profundidade. Além de a sazonalidade climática influenciar nessa dinâmica do fluxo entre superfície aquática e atmosfera, o fato de haver extensa superfície aquática em local antes ocupado com superfícies de outra natureza implica variação da

temperatura local (superfície aquática), resultando em modificação no comportamento da temperatura e umidade na camada limite da atmosfera. Tal sucessão de eventos influencia os processos físicos atuantes na superfície aquática, contribuindo para a deflagração de novos processos, como, por exemplo, a dinâmica dos ventos, gerando ondas que irão atuar nas bordas dos reservatórios, desagregando e transportando sedimentos.

Nesse contexto, conforme afirma Camapum de Carvalho et al. (2015), as erosões de borda de reservatório podem ser oriundas das novas condições de equilíbrio estabelecidas na fronteira solo-atmosfera e solo-água, pois a lâmina d'água de uma superfície, anteriormente com ocupação e uso distinto ao corpo d'água, altera o fluxo de energia entre superfície e atmosfera, bem como modifica as condições microclimáticas locais. Nova relação de troca de energia na camada limite entre a superfície (no caso a lâmina d'água) e a atmosfera se estabelece, controlada pelas radiações (ondas longas e curtas); fluxos de calor sensível e latente; e energias associadas às entradas e saídas de radiação do sistema aquático (HENDERSON-SELLERS, 1986), o que resulta tanto na variação espacial quanto temporal da temperatura da superfície d'água, mas também na variação estratigráfica da temperatura d'água de um reservatório, denominada de termoclima. Ressalte-se que as características biogeoquímicas do corpo d'água também irão influenciar diretamente na variação em perfil da temperatura em reservatórios (ALCÂNTARA; STECH, 2011).

2.1 Variações espacial e temporal da temperatura, microclima e erosões de borda de reservatórios

As manifestações dinâmicas ou termodinâmicas causadas por esses processos naturais podem ser avaliadas instantaneamente (tempo atmosférico) ou em um período mais longo (clima). Não há, entretanto, uma divisão clara entre o término do estudo do tempo e o começo do estudo do clima (PITTOCK et al., 1978). Apesar dessa dificuldade, o estudo do clima é relevante no entendimento dos processos erosivos em borda de reservatório, pois, conforme Alcântara e Stech (2011), os sistemas aquáticos respondem às condições climáticas, as quais variam no espaço e no tempo (cronológico). A existência da lâmina d'água sobre uma superfície onde anteriormente existiam ocupação e uso distintos altera o fluxo de energia entre superfície e atmosfera e modifica as condições microclimáticas, gerando nova relação de troca de energia na camada limite entre a superfície da lâmina d'água e a atmosfera, da qual decorrem variações nos processos físicos na superfície.

O fluxo de energia entre atmosfera e superfície aquática nos reservatórios ocorre a partir da transferência de energia entre os sistemas água/atmosfera e terra/atmosfera. A radiação solar que atinge a superfície aquática é transformada em calor e, por convecção, de forma lenta, é transferida às profundidades superiores, gerando camadas de diferentes temperaturas. Essa mudança na temperatura da água superficial e a configuração da estratificação térmica podem causar determinados efeitos sobre os processos físicos, químicos e biológicos de reservatórios, sendo o vento a principal componente capaz de misturar as camadas com diferenças térmicas. Caso a energia do vento não seja suficiente para promover a mistura d'água e dissolver a estratigrafia térmica, a estratigrafia permanece por longo período de tempo (FERREIRA; CUNHA, 2013).

A resposta térmica do reservatório depende das condições climáticas influenciadas pelos ciclos sazonais dos fluxos de energia, no caso, comandadas pelos fluxos de radiação solar. Em função do movimento de translação, ao longo de um ano, a inclinação dos raios solares atinge a superfície terrestre de maneira distinta, o que afeta diretamente em maior ou menor taxa de aquecimento da superfície. Isso ocorre devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano da órbita, interferindo diretamente no ângulo de incidência solar sobre a superfície. Os raios solares atingem a superfície, ora muito próximos da vertical, ora perpendiculares à superfície (Figura 1), e essa variação distribui a radiação de forma diferenciada, o que resulta em maior ou menor energia incidente por metro quadrado, influenciando diretamente no maior ou menor aquecimento das superfícies, seja terrestre seja aquática.

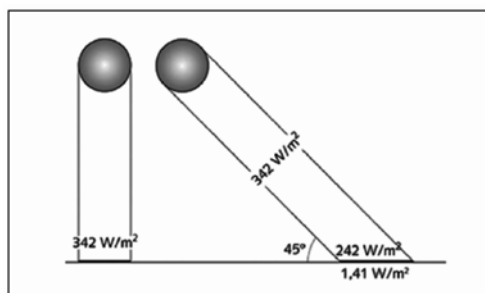


Figura 1. Variação da radiação conforme variação do ângulo de incidência da energia solar sobre uma superfície. Fonte: modificado de Dias e Silva (2009).

Assim, a variação da temperatura nos reservatórios apresenta estreita relação com o ciclo sazonal da radiação, que, especificamente para a latitude dos trópicos, quanto maior a latitude, maiores variações entre o verão e o inverno. Conforme observado a partir da Figura 1, no momento em que a radiação atinge a superfície, formando ângulo de incidência vertical ou próximo ao vertical (ângulo de 90°), a superfície atingida é menor que no caso da superfície que é atingida por energia cujo ângulo de incidência seja menor que 90° . Quanto menor é o ângulo de incidência de energia solar sobre uma superfície, maior é a superfície, em metros quadrados, atingida pela radiação, interferindo no fluxo de energia sobre a superfície, consequentemente, menores temperaturas são observadas.

Essa variação sazonal da energia solar incidente sobre uma superfície aquática pode ser observada a partir de Alcântara (2010), quando apresenta o ganho e a perda de calor ao longo do ano para o Reservatório de Itumbiara-GO (Figura 2), situado na porção sudeste do Estado de Goiás. É possível relacionar os momentos de ganho e perda de calor no reservatório à sazonalidade climática da região, portanto, com a variação da radiação solar incidente sobre a superfície. A estimativa do conteúdo de calor aponta que o reservatório de Itumbiara começa a acumular calor de julho ($12\,453,35 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{mês}^{-1}$) a fevereiro ($19\,618,28 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{mês}^{-1}$), quando atinge o máximo de armazenamento de calor.

O respectivo período corresponde à transição do inverno para a primavera, todo o período da primavera e também o verão. Nesse mesmo período, considerando-se as condições do clima comandado pela atmosfera superior, verifica-se o aumento gradativo da disponibilidade de energia no sistema atmosférico, em função da variação anual do ângulo de incidência da radiação solar. Por outro lado, a partir de março ($18\,561,43 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{mês}^{-1}$), que corresponde

ao final do verão, o outono e o inverno, o reservatório começa a perder o calor armazenado, adquirido na fase anterior, atingindo o mínimo de calor no mês de junho ($11\,949,43 \text{ cal.cm}^{-2} \cdot \text{mês}^{-1}$) (ALCÂNTARA; STECH, 2011).

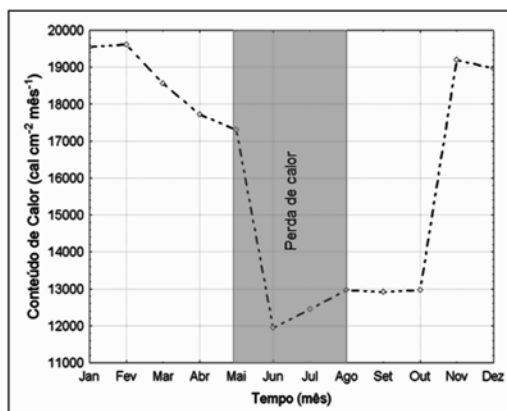


Figura 2. Variação sazonal do ganho e da perda de calor: Reservatório Itumbiara/GO. Fonte: Alcântara (2010).

Considerando o comportamento da variação térmica no reservatório de Itumbiara-GO, Alcântara (2010) encontrou expressivas variações, tanto superficiais quanto ao longo da coluna d'água. Ao considerar variação térmica na seção horizontal da superfície aquática, o autor coloca que as temperaturas durante o dia apresentam comportamento que decresce da borda para o centro do reservatório, e o contrário é observado à noite, quando o comportamento da temperatura se inverte, ocorrendo temperaturas mais elevadas do centro do reservatório, as quais descessem em direção à borda. Essa dinâmica está relacionada com a profundidade, volume d'água e influência do fluxo de troca de calor terra/atmosfera e água/atmosfera. Durante o dia, a radiação solar penetra até o fundo da borda do reservatório, influenciando na dinâmica de troca de calor pela dinâmica de fluxos terra/atmosfera. Assim, há o aquecimento de toda a camada; nesse caso, não ocorrem processos convectivos na transferência do calor da superfície para a camada d'água mais profunda.

Já na região mais profunda do reservatório, com maior volume de água e sem influência da terra, o processo de transferência do calor é comandado pela dinâmica entre água/atmosfera. Tal processo demanda certo tempo, devido ao calor específico d'água, para que todo o perfil seja aquecido, resultante da transferência de calor pelo processo convectivo, configurando-se a formação de gradiente de temperatura na coluna d'água (termoclima). Assim, para as bordas, ocorre o aquecimento e também o resfriamento mais rapidamente do que ocorre para as áreas mais profundas do reservatório, estabelecendo-se gradiente de temperatura conforme a profundidade, mas também observado na seção longitudinal ao longo da superfície aquática.

Considerando-se ainda a variação espacial e temporal da temperatura da superfície do reservatório de Itumbiara-GO, conforme Figura 3, os meses janeiro, fevereiro e abril apresentam maior ganho de calor na porção nordeste, quando comparado com a porção sudeste, justificando-se essa dinâmica devido ao fato de a direção preferencial do vento no reservatório ocorrer de sudeste para nordeste, propiciando, por meio do processo de advecção, o deslocamento da massa de água aquecida para a porção nordeste do reservatório. É possível

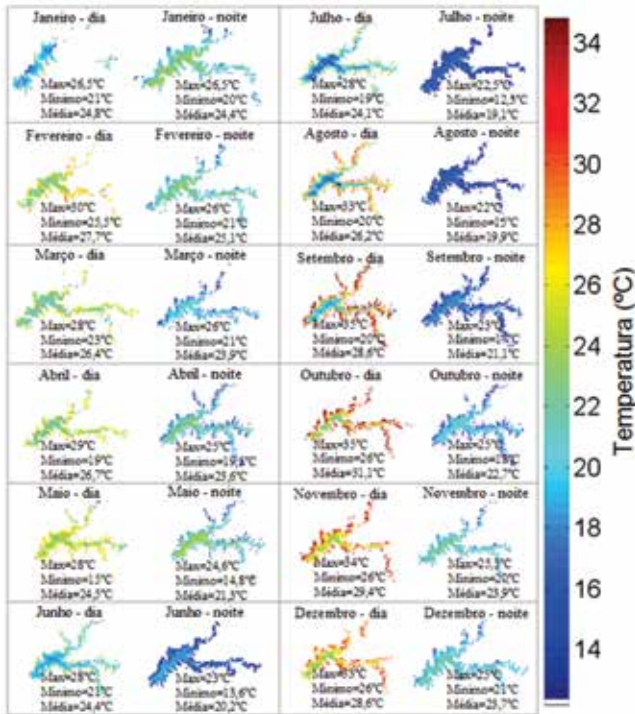


Figura 3. Variação anual da variação mensal da temperatura da superfície do reservatório de Itumbiara/GO. Fonte: Alcântara (2010).

observar a variação sazonal da temperatura na superfície do reservatório, em conformidade com a variação sazonal do clima da região, pois, de junho a julho, há o predomínio da perda de calor; de agosto a dezembro, o reservatório novamente apresenta temperatura mais elevada, obedecendo à dinâmica de aquecimento da borda para o centro do reservatório.

Alcântara (2010) apresenta modelo termodinâmico para o referido reservatório, referente à variação temporal da temperatura da coluna d'água (Figura 4). O modelo demonstra a relação da termografia do reservatório, acompanhando a variação da radiação solar (ondas curtas e longas), portanto, em conformidade com a sazonalidade climática para a região. A partir da Figura 4, é possível observar que, de janeiro a maio, a estratificação é acentuada e a superfície aquática aquece mais rapidamente. A estratificação ocorre quando há maior disponibilidade de radiação, que, nesse momento, incide fortemente na superfície da água, pois corresponde ao verão e ao início do outono no hemisfério sul, podendo a temperatura da água durante a noite se apresentar até 6°C mais elevada que durante o dia.

Os meses de junho a setembro não apresentam a formação da estratigrafia. Esse momento representa o inverno para a região e, devido ao elevado ângulo de incidência de radiação solar sobre a superfície aquática, característico do momento, ocorre a mistura da coluna d'água e a termoclima não é formada. Segundo Alcântara e Setch (2011), nesse momento, devido ao aquecimento nas regiões rasas e em vista de o transporte da massa líquida se suceder no mesmo sentido da direção do vento e, quando não há mais energia para o transporte, pode ocorrer, por processo de advecção, o afundamento da massa d'água mais quente. Já, no local

em que se iniciou o vento, pode ocorrer a ressurgência da massa d'água mais fria, podendo gerar convecção turbulenta (ALCÂNTARA, 2010). A Figura 4 apresenta modelo da dinâmica termográfica da coluna d'água, estabelecida a partir da variação da temperatura.

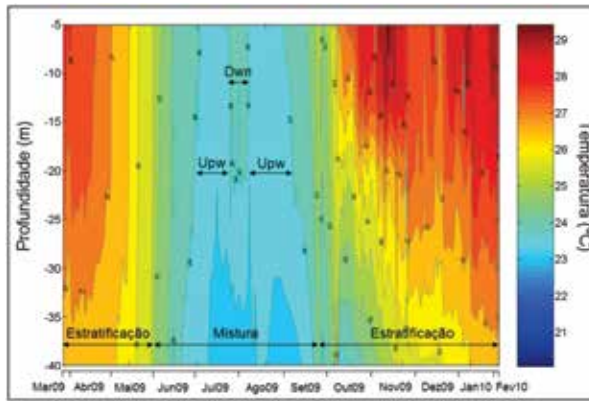


Figura 4. Variação sazonal da temperatura da coluna d'água no reservatório de Itumbiara. Em que Upw = ressurgência e Dwn = entranhamento. Fonte: Alcântara (2010).

Segundo Alcântara e Setch (2011), nos meses de junho e julho, para o reservatório estudado, a radiação de onda curta é baixa, indicando balanço de calor negativo, o que possibilita aumento dos processos de convecção turbulenta, permitindo que o gradiente de temperatura seja diminuído, propiciando homogeneidade da temperatura na superfície (Figura 5). Durante o inverno, Alcântara (2010) chama a atenção para a passagem das frentes frias, por constituir um fator a ser considerado na homogeneidade da temperatura da superfície, visto representar processo atmosférico que acentua a perda de energia no reservatório. Durante os

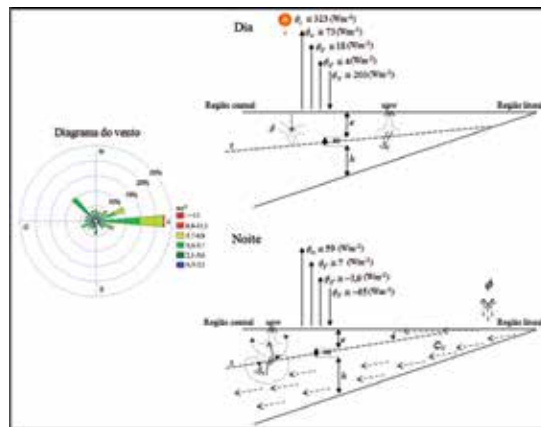


Figura 5. Modelo conceitual para o período de junho a setembro (caso dia e noite). Sendo: $s\phi$ é a radiação de onda curta, $ri\phi$ é a radiação de onda longa, $lf\phi$ é o fluxo de calor latente, $sf\phi$ é o fluxo de calor sensível, $N\phi$ é o saldo de radiação, VE é a evaporação, δ é aquecimento das mais rasas, IF é uma corrente de densidade intermediária (*interflow*) upw é a ressurgência, Dow é o afundamento de uma massa d'água, θ é a convecção turbulenta, VC é a transferência de água mais fria e densa da região rasa para a profunda e ϕ é a perda de calor nas regiões rasas durante a noite. Fonte: Modificado de Alcântara & Fech (2011).

meses junho e julho, a entrada de frentes frias na região do reservatório é comum. Seguindo a trajetória da variação da radiação solar (ondas curtas e longas), de outubro a dezembro, a estratificação se restabelece ao longo da coluna d'água, contudo, nesse momento, não ocorre o processo de ressurgência, pois há estabilidade da coluna d'água.

Além da variação da temperatura em reservatórios acompanhar o fluxo de radiação solar, podendo ser observado tanto na escala diária quanto sazonal, outro importante elemento atmosférico que favorece a deflagração de processos erosivos na borda dos reservatórios é o vento. O vento também pode ser relacionado aos ciclos sazonais da radiação solar, em resposta à variação da temperatura na interface atmosfera/superfície aquática. Segundo Moura et al. (2004), as brisas de lago apresentam-se bem definidas e mais bem caracterizadas no período mais quente do dia, entre 10 e 14 horas.

Morais (2009) identificou, para o Reservatório de Ilha Solteira (SP), ventos que ocorrem com maior frequência e maior velocidade, soprando de Nordeste (de outubro a março) e de Leste (de abril a setembro), conforme pode ser observado a partir da Figura 6. As informações apresentadas pelo autor nos indicam que tanto a direção quanto a velocidade dos ventos ocorrem em conformidade com padrão da climatologia regional. Pois, ao considerar a dinâmica dos sistemas atmosféricos atuantes no Brasil para os respectivos períodos, observa-se a predominância dos ventos regionais, influenciando, para o período entre outubro a março, com maior incursão dos sistemas atmosféricos do quadrante NE – nesse momento, ocorre, em todo o Brasil, a entrada dos sistemas da Região Norte, com maior predominância, o que interfere no aumento da precipitação. Por outro lado, no período considerado pelo autor, de abril a setembro, o sistema atmosférico com maior incursão no país é de origem leste, o que justifica maior possibilidade de entrada de frentes frias. No que se refere à velocidade dos ventos ocorrerem também para esse mesmo período, deve-se ao fato de que os respectivos momentos representam maiores temperaturas – outubro a março – e, também, entradas de frente – abril a setembro – favorecendo, segundo Alcantara (2010), o aumento na velocidade dos ventos.

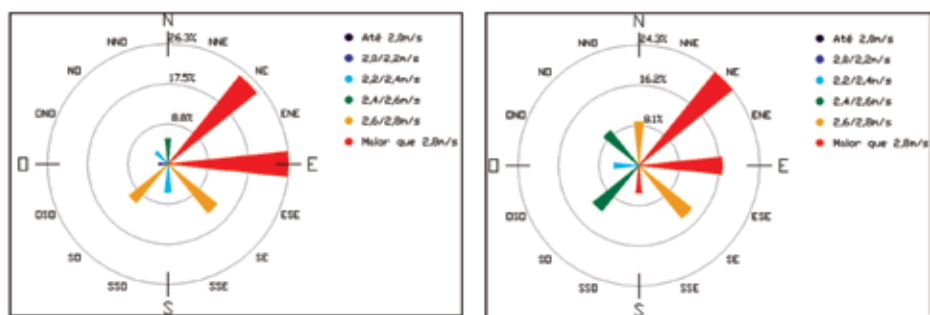


Figura 6. Rosa dos ventos – Ilha Solteira (SP): predominância e velocidades dos ventos, (a) mês junho e, (b) mês novembro. Fonte: Alcantara (2010).

Essa direção e velocidade dos ventos, observadas para os respectivos períodos, consistiram em um importante fator na formação de ondas no respectivo reservatório. Os ventos provenientes das direções NNE e NNO provocam pistas de até 12 e 9 km respectivamente (MORAIS, 2009). Compreendendo que as ondas é uma resposta local, entre os outros fatores

(abordados no Cap. 11) da troca de fluxos de energia entre a superfície aquática e atmosfera, Morais (2009) entende que, apesar de a vegetação submersa provocar o fenômeno conhecido como eutrofização, o fato de haver vegetação submersa nos reservatórios serve como obstáculo ao escoamento das ondas e, quando há vegetação nas bordas do reservatório, essa também atua como barreira natural, promovendo a queda da energia hidrodinâmica, conforme demonstrado a partir da Figura 7. Embora a revegetação das bordas dos reservatórios represente mecanismo para amenização dos processos físicos, Camapum de Carvalho et al. (2014) advertem ser necessário haver a contextualização dos procedimentos de revegetação, pois devem ser consideradas a sucção oriunda da morfologia do terreno e a capacidade de retenção de água das espécies vegetais utilizadas.



Figura 7. Vegetação na borda do reservatório de Ilha Solteira (SP): amenização do efeito das ondas para deflagrar e ou acelerar processos erosivos na borda do reservatório. Fonte: Morais (2009).

Se, por um lado, as ondas representam importante processo físico de impacto na borda dos reservatórios, propiciando a deflagração de processos erosivos, por outro lado, há que se considerarem também os efeitos da variação do fluxo de energia entre atmosfera/superfície aquática e atmosfera/terra na variação da umidade e saturação do maciço. Na borda dos reservatórios, prevalece o fluxo de energia terra/atmosfera, o que gera, conforme apresentado neste capítulo, variação diária da temperatura da água em toda a sua seção, da superfície ao fundo da borda, o que pode gerar modificações na estrutura físico-química do maciço. Esse aspecto – associado ainda à variação sazonal no nível d'água, que promove a variação de umidade e saturação dos maciços, gerando variações de sucção (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2014) – pode atuar no favorecimento de rupturas e desestabilização dos taludes, desencadeando processos erosivos. Outro importante aspecto a ser considerado é que a variação do nível d'água pode levar aos processos de umidificação e secagem sazonal da borda do reservatório, e tal desdobramento pode implicar a densificação, resultante do processo de redução da porosidade do solo, como resposta a ciclos sucessivos de umedecimento e secagem (FARIA, 2000).

Nesse contexto, o entendimento da dinâmica da atmosfera auxilia na compreensão dos processos erosivos em borda de reservatório, a partir da análise da influência das características do clima, considerando escala regional, além da local, na qual a superfície do reservatório gera novas relações de fluxos de temperatura e umidade, resultantes da interação entre a radiação solar e a lâmina d'água, o que é abordado a seguir.

2.2 Radiação solar e a escala microclimática

As condições microclimáticas resultantes das interações na fronteira superfície-atmosfera são de interesse ao entendimento dos processos erosivos em borda de reservatório. Segundo Azevedo et al. (1990), entre os fatores relacionados às características microclimáticas, a energia solar incidente sobre uma superfície consiste na principal fonte de energia para os processos físicos e químicos, como o aquecimento do ar e da superfície e o fluxo da água e dos ventos, que ocorrem na interface superfície-atmosfera. A radiação solar depende da declinação solar (δ) e da latitude (φ), que está diretamente relacionada à altura solar (h) de cada lugar. A radiação solar pode ser expressa segundo a Lei do Cosseno de Lambert (TUBELIS; NASCIMENTO, 1992), a qual permite o entendimento da variação diária e sazonal da irradiância solar. Essa variação irá influenciar o comportamento dos elementos meteorológicos, como, por exemplo, da temperatura da superfície e do ar.

A Lei do Cosseno de Lambert considera que os raios solares incidentes sobre uma superfície dependem da orientação da radiação (Figura 8). Devido ao movimento de rotação e translação da Terra, o ângulo zenital (Z), ângulo formado entre o zênite e os raios solares, varia de acordo com a latitude, ao longo do dia e do ano. Ao nascer do sol, o ângulo zenital é igual a 90° , sendo a irradiância solar igual a zero. A partir da diminuição desse ângulo, a irradiância aumenta até atingir o seu valor máximo, que, durante o dia, é ao meio dia, momento em que o sol passa pelo meridiano local.

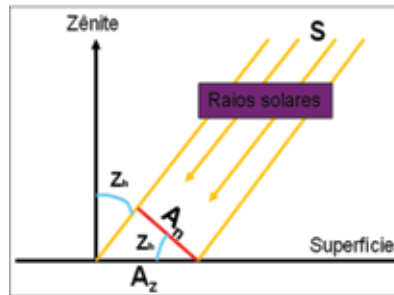


Figura 8. Variação da elevação solar e do ângulo zenital. Fonte: modificado de Sentelhas e Angelocci (2010).

A Lei do Cosseno de Lambert mostra a relação entre a irradiância solar e o ângulo zenital (Z) a partir da Equação 1:

$$I_z = I_n \cos Z_h \quad (1)$$

Onde:

I_n = constante solar

Z_h = ângulo zenital em determinado instante

$\cos Z_h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h$

φ = latitude (0 a $\pm 90^\circ$)

δ = declinação solar (0 a $\pm 23,45^\circ$)

$\delta = 23,45 \sin [(360/365) \cdot (NDA - 80)]$

h = ângulo horário = $[(\text{Hora local} - 12) \cdot 15]$

Quanto mais perpendicular à superfície for o ângulo de incidência da energia solar, menor será a área da superfície atingida, o que leva à maior concentração de energia por unidade de área, e, conseqüentemente, o aquecimento dessas superfícies será maior. A compreensão dos processos deflagrados a partir da interação entre superfície e atmosfera constitui um aspecto a ser considerado na análise da erosão em borda de reservatório, principalmente quando se consideram reservatórios situados nas regiões tropicais.

Nessas regiões, a disponibilidade de energia solar ocorre o ano todo, e a variação sazonal da altura do ângulo solar influencia diretamente nas características climáticas, conseqüentemente, na distribuição e na variabilidade das chuvas, quanto à irregularidade, totais pluviométricos anuais e sazonais. Outro importante aspecto se refere à intensidade dos episódios das chuvas, sendo comum episódio de chuva de elevada intensidade (grande quantidade pluviométrica em curto intervalo de tempo). Tais características, associadas à modificação do uso e cobertura no entorno dos reservatórios; aspectos fisiográficos, como os aspectos morfométricos; características físico-químicas e mineralógicas dos solos tropicais não saturados são fatores que, somados à dinâmica da atmosfera local e regional, atuam, em conjunto, na deflagração e na aceleração dos processos erosivos em bordas de reservatórios.

3 Aplicação dos estudos climáticos aos estudos de erosão de borda

Conforme apresentado no item anterior, a compreensão da influência do clima no processo de erosão de borda de reservatório passa pelo entendimento da circulação regional da atmosfera, a qual influencia nas características climáticas de uma determinada região, mas também passa pela compreensão dos processos que se estabelecem no nível escalar do microclima, ao se analisar os fluxos de umidade e temperatura que se estabelecem na fronteira atmosfera/superfície aquática. Nesse sentido, este tópico irá apresentar a organização climática para os Estados de Goiás e Minas Gerais, a partir da influência regional do clima.

3.1 Influência regional do clima na determinação das características climáticas nos Estados de Goiás e Minas Gerais

Os Estados de Goiás e de Minas Gerais apresentam características climáticas segundo a dinâmica das massas de ar que atuam na América do Sul e os aspectos físico-geográficos inerentes a cada estado, relativamente à: localização; extensão latitudinal e longitudinal; uso e ocupação do solo; e parâmetros morfométricos, os quais, associados às massas de ar, irão determinar a variação espacial das características climáticas nos respectivos estados. As massas de ar atuam em todo o território nacional, mas irão atuar nos Estados de Goiás e Minas Gerais conforme intensidade, duração e frequência, de acordo com o local da sua formação e o percurso até atingir os respectivos estados.

A atuação das massas de ar, ao longo do ano, está relacionada à variação sazonal da distribuição da radiação da energia solar, podendo ser de origem equatorial, continental e polar. A Figura 9 apresenta as massas de ar que atuam no território brasileiro, indicando a influência

de cada uma delas no decorrer do ano. Dois momentos, o verão e o inverno, são decisivos para fortalecer determinada massa de ar, em detrimento do enfraquecimento de outra.

As massas de ar atuantes nos Estados de Goiás e de Minas Gerais são de origem dos centros de ação positivos, o anticiclone do Atlântico Sul e o anticiclone Migratório Polar, os quais correspondem respectivamente às massas de ar Tropical Atlântica (mTa) e Polar Atlântica (mPa). Os centros de ação negativos atuantes, as depressões Amazônica e do Chaco, formam respectivamente as massas de ar Equatorial (mEc) e Continental (mTc). É importante considerar a formação e a atuação da Zona de Convergência Intertropical Atlântico Sul (ZCAS), pois esse sistema se forma a partir da conjugação com outros sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul e determinará período de maior ocorrência de incidência de chuvas, começando na primavera e se intensificando no verão. Especificamente, a massa de ar Tropical Atlântica atua de forma bastante significativa durante o período inverno/primavera; sua atuação se inicia no final do outono e se prolonga até a primavera. Na sua origem, apresenta características de massa de ar quente e úmida, mas, quando atinge o interior do país, não há episódios de precipitação significativos; quando ocorrem, estão vinculados à conjugação de sistemas frontais. Uma característica marcante é os baixos valores de umidade relativa do ar, principalmente durante o trimestre junho/julho/agosto, os quais, em determinadas localidades, podem atingir índices inferiores a 20% (NIMER, 1989).

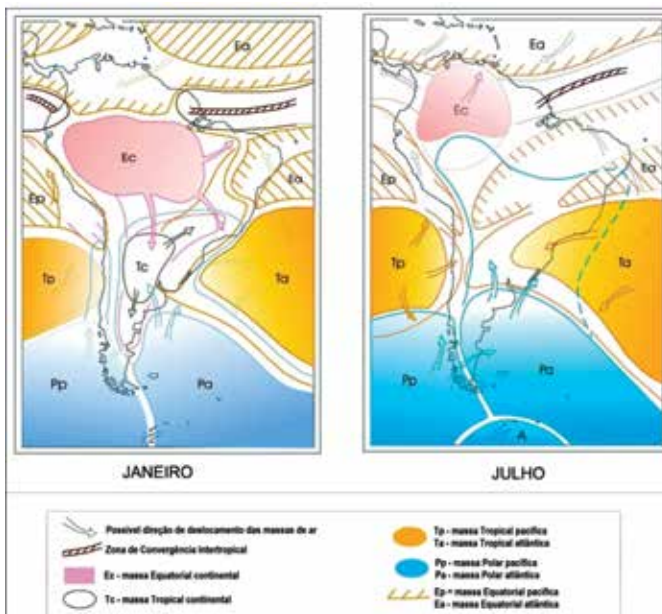


Figura 9. Massas de ar que atuam no Brasil e que influenciam nas características do clima dos Estados de Goiás e de Minas Gerais. Fonte: Modificado de Monteiro (2000).

A massa de ar Tropical Atlântica Polar (mPa) tem a penetração facilitada pela configuração do relevo, ocorrendo de sul para norte no Estado de Goiás, ao longo dos eixos dos grandes vales fluviais. A influência do aludido fenômeno favorece os episódios de chuvas frontais durante a primavera-verão (MONTEIRO, 1968).

No Estado de Minas Gerais, a respectiva massa de ar irá atuar de forma mais intensa na porção sul. A massa de ar Equatorial avança para o interior do país, favorecendo as chuvas convectivas de verão, resultantes do efeito térmico e da elevada umidade (NIMER, 1989). O fenômeno denominado de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), formado a partir da junção da Zona de Convergência Intertropical (ZCTI), da Alta da Bolívia e de sistemas frontais oriundos das regiões subtropicais, propicia elevada atividade convectiva, que se instala sobre o interior do continente, configura uma faixa de nebulosidade orientada de noroeste para sudeste (ZCAS) e ocasiona períodos prolongados de chuvas e altos índices pluviométricos (VIANELLO; ALVES, 1991; QUADRO, 1994). A dinâmica da ZCAS é bastante complexa; manifesta-se desde a baixa troposfera até os altos níveis. Em relação a sua posição, Quadro (1994) aponta que geralmente ela estaciona sobre a Região Sudeste, Brasil Central, norte do Paraná e sul do Estado da Bahia, conforme é possível verificar em imagens de satélite e cartas de superfície (Figura 10).

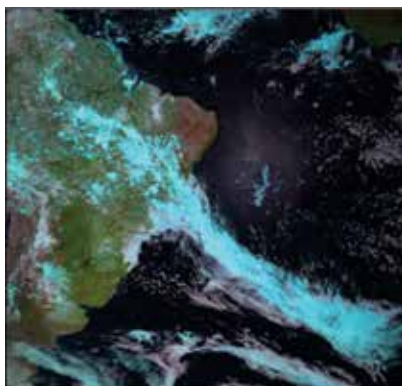


Figura 10. Imagem de Satélite indicando a configuração da ZCAS. Fonte: Sistema Meteosat em 12/12/2013/ LAPIG/IESA/UFG.

Em decorrência da atuação das respectivas massas de ar e dos aspectos físico-geográficos, o clima no Estado de Goiás é definido de acordo com o sistema de Köppen, do tipo Aw, com inverno seco e verão quente, temperatura média anual de 22°C, sendo o mês frio 18°C (NIMER, 1989). A precipitação anual é em torno de 1.550mm, os meses de maior incidência de chuvas de outubro a março, momento em que ocorre 87% do índice pluviométrico anual total no estado. Por outro lado, o período entre abril e setembro corresponde ao período seco, indicando a possibilidade de nos meses de junho/julho/ agosto não ocorrer chuva. Conforme pode ser observado a partir da Tabela 2, a capacidade erosiva da chuva no Estado de Goiás apresenta estreita relação com a sazonalidade climática. Cerca de 94% do total anual da erosividade no território goiano também se insere no período de outubro a março. A erosividade anual no Estado de Goiás é classificada como forte e apresenta variação entre 7.425 MJ mm há⁻¹ h⁻¹ e 9.633 MJ mm há⁻¹ h⁻¹. Em relação à variação espacial, as porções sudeste e noroeste do estado apresentam maior índice de erosão quando comparadas com outras porções. As áreas com valores de erosividade mais elevados constituem áreas de maior vulnerabilidade natural à erosão hídrica, e fatores como relevo, vegetação, uso e ocupação do solo, erodibilidade do solo contribuem para essa maior vulnerabilidade (GALDINO, 2015).

Tabela 2. Variação temporal da precipitação e da capacidade de erosividade da chuva no Estado de Goiás.

Mês	Precipitação		Erosividade da chuva	
	(mm)	(%)	(MJ mm há ⁻¹ h ⁻¹)	(%)
Janeiro	280,6	18,30	1.873	22,49
Fevereiro	214,3	13,98	1.206	14,49
Março	218,7	14,26	1.235	14,83
Abril	98,7	6,43	324	3,89
Mai	30,5	1,99	52	0,63
Junho	9,0	0,59	8	0,09
Julho	5,7	0,37	3	0,04
Agosto	12,9	0,84	12	0,15
Setembro	46,3	3,02	102	1,22
Outubro	129,0	8,41	497	5,97
Novembro	210,6	13,73	1.159	13,91
Dezembro	277,1	18,07	1.857	22,30

Fonte: modificado de Galdino (2015).

O clima do Estado de Minas Gerais recebe influência da massa de ar polar (mPa); da Equatorial (mEc); da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS); e dos sistemas de convecção, que propiciam chuvas de elevada intensidade e curta duração. Ressalte-se que o sistema ZCAS, quando potencializado por sistemas frontais oriundos do sul do país, potencializa as chuvas na região, podendo, como isso, incidirem chuvas de longa duração, de até vários dias, principalmente na porção sudeste do estado. O fato é que, em função da influência das massas de ar, associada à extensão territorial do estado, na sua seção latitudinal e longitudinal, Minas Gerais apresenta complexidade climática. Na porção noroeste e no Triângulo Mineiro, o clima recebe influência da continentalidade, por outro lado, a porção leste do estado está sujeita à influência oceânica e à expressiva variação do relevo, desde cadeias montanhosas que contrastam com vales extensos, com variações de 250m a 2.700m, fatores que influenciam fortemente na variação espacial e distribuição das chuvas (TORNIETTO; VIANELLO; REGINA, 2005).

As características climáticas de Minas Gerais apresentam, espacialmente, variabilidade. Em razão disso, com base na classificação de Köppen, assumem característica de clima do tipo Cwb, temperado com invernos frios e verões brandos, no Sul de Minas; do tipo BSw, caracterizado como semiárido, no extremo norte e nordeste do Estado; Cwa predomina nas regiões serranas no centro e no sul do estado e no norte da Serra do Espinhaço; Cwb predomina nas altitudes mais elevadas da Serra da Canastra, Espinhaço e Mantiqueira, apresentando características de clima temperado chuvoso, subtropical de altitude (ANTUNES, 1986). Essa expressiva variação climática se deve à atuação dos diferentes sistemas de massas de ar, conforme demonstrado na Figura 9, associados principalmente à extensão territorial, em combinação com a altitude.

A variação espacial das chuvas se reflete fortemente também na variação espacial da erosividade. A precipitação anual para Minas Gerais apresenta variações entre 800 a 1.700 mm e erosividade média anual de 5.000 a mais de 12.000 MJ mm⁻¹ há ano⁻¹. Esses valores são distribuídos em três zonas de erosividade, apresentadas como média a alta; alta e muito alta. Os maiores valores de erosividade média anual atingem níveis superiores a 10.000 MJ mm⁻¹ há ano⁻¹ e ocorrem no Triângulo Mineiro, na região do Vale do Rio doce, Alto Paranaíba. Por outro lado, o mês de dezembro é quando ocorrem os maiores índices de erosividade, 3.000 MJ mm⁻¹ há ano⁻¹ (MELLO, et al., 2007).

3.2 Influência do clima na erosividade dos reservatórios de Itumbiara/GO, de Furnas/MG e de Batalha/MG

A característica climática inerente às regiões dos Reservatórios de Itumbiara/GO, de Furnas/MG e de Batalha/MG (Figura 11) é compreendida a partir da atuação dos sistemas climáticos atuantes nos Estados de Goiás e de Minas Gerais. As condições físico-geográficas determinam o clima das respectivas regiões, ao passo que a sazonalidade que se configura a partir da dinâmica das massas de ar descritas determina a variação dos elementos climáticos: precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade e direção dos ventos. Os fatores físico-geográficos, principalmente altitude, exposição e orientação de vertentes, uso e cobertura do solo influenciam a variação desses elementos (abordados no Capítulo 8). Esses elementos climáticos e fatores físico-geográficos, em conjunto com os efeitos da própria ocupação humana, atuam nos processos de infiltração, evaporação e escoamento superficial e, conseqüentemente, na deflagração ou mesmo aceleração dos processos erosivos.

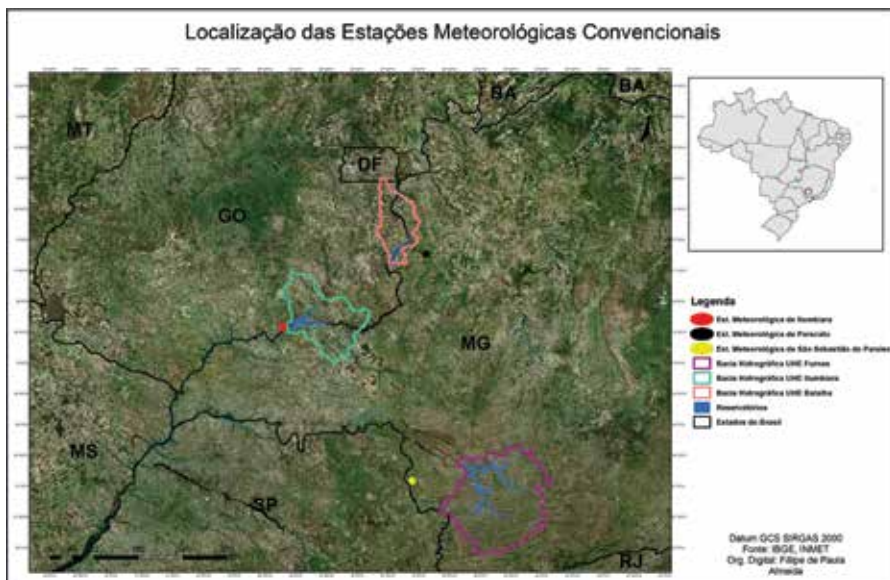


Figura 11. Mapa de Localização das estações meteorológicas e das bacias hidrográficas dos Reservatórios de Itumbiara; de Batalha e de Furnas. Fonte: Elaborado pelos autores.

É possível observar a variação média da precipitação (Tabela 3), a partir das informações meteorológicas obtidas junto à Estação Meteorológica Itumbiara/GO, situada na porção sudeste do Estado de Goiás – divisa com Minas Gerais, para área próxima ao Reservatório de Itumbiara/GO. As chuvas se concentram principalmente nos meses de novembro a março, cuja média de precipitação anual é em torno de 1.342,20mm, sendo que 82,01% desse total se concentra nos meses de novembro a março. A variação da intensidade mensal ao longo do ano apresenta expressiva variabilidade, pois, no mês de julho, a média para o período é em torno de 4,30mm, e no mês de dezembro, a média mensal é de 266,68mm. A erosividade para a área do respectivo reservatório é classificada, conforme Galdino (2015), como forte, pois, ao longo do ano, o índice de erosividade, em média, é de 7.708,00 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. A capacidade erosiva da chuva indica que 91,91% da erosividade ocorre nos meses de novembro a março. Contudo, os meses de dezembro e janeiro apresentam os maiores índices de erosividade no decorrer do ano, respectivamente 1.645,24 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ e 1.937,17 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

Tabela 3. Variação da média anual da precipitação e da capacidade erosiva da chuva nas imediações do Reservatório de Itumbiara (Estação Meteorológica Itumbiara-GO).

Reservatório Itumbiara (Estação Itumbiara/GO)				
Mês	Precipitação		Erosividade	
	(mm)	(%)	(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)	(%)
Janeiro	266,68	19,60	1937,17	25,13
Fevereiro	195,67	14,58	1150,79	14,93
Março	201,05	15,25	1204,51	15,63
Abril	72,51	5,40	216,69	2,81
Maiο	24,29	1,81	34,43	0,45
Junho	9,10	0,68	6,60	0,09
Julho	4,30	0,32	1,87	0,02
Agosto	5,40	0,40	2,74	0,04
Setembro	43,30	3,23	91,04	1,18
Outubro	82,60	6,15	269,78	3,50
Novembro	195,30	14,55	1147,13	14,88
Dezembro	242,00	18,03	1645,24	21,34

Fonte: Dados de Precipitação - Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): Estação Meteorológica Itumbiara/GO – 1990-2015.

A Tabela 4 apresenta a variação média da precipitação e do índice de erosividade para a área próxima ao Reservatório de Batalha, obtidos a partir das informações meteorológicas da Estação Meteorológica de Paracatu/MG, situada no noroeste de Minas Gerais, divisa com o Estado de Goiás. Conforme pode ser observado, a Estação Meteorológica de Paracatu apresenta média total de precipitação anual em torno de 1.394,93mm, também concentrada prin-

principalmente nos meses de novembro a março, sendo que esse período responde por 77,77% das chuvas do ano. Para essa estação meteorológica, a variação anual da chuva apresenta índice desde 2,96mm no mês de julho a 322,00mm no mês de dezembro. A capacidade erosiva da chuva para a respectiva área é tida como forte (GALDINO, 2015), pois, em média, ao longo do ano, o índice de erosividade é de 8.875,40 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. O período de maior concentração das chuvas responde por uma capacidade erosiva em torno de 93,58%, sendo que os meses que apresentam os índices mais elevados são dezembro e janeiro, respectivamente 2.575,14 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ e 1.652,47 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

Tabela 4. Variação da média anual da precipitação e da capacidade erosiva da chuva nas imediações do Reservatório de Batalha (Estação Meteorológica Paracatu/MG).

Reservatório Batalha (Estação Paracatu/MG)				
Mês	Precipitação		Erosividade	
	(mm)	(%)	(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)	(%)
Janeiro	247,35	17,73	1652,47	19,97
Fevereiro	189,55	13,59	1056,09	12,76
Março	212,78	15,25	1282,79	15,50
Abril	76,41	5,48	229,10	2,77
Mai	20,57	1,47	25,20	0,30
Junho	6,69	0,48	3,81	0,05
Julho	2,96	0,21	0,97	0,01
Agosto	11,27	0,81	9,16	0,11
Setembro	28,67	2,06	44,05	0,53
Outubro	74,49	5,34	219,52	2,65
Novembro	202,19	14,49	1177,22	14,23
Dezembro	322,00	23,08	2575,14	31,12

Fonte: Dados de Precipitação - Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): Estação Meteorológica Paracatu/MG - 1990-2015.

A variação média anual da precipitação e da capacidade de erosão da chuva para a área próxima ao Reservatório de Furnas foi obtida a partir de dados da Estação Meteorológica de São Sebastião do Paraíso/ MG, situada na parte sul do Estado de Minas Gerais. Conforme Tabela 5, a média anual da precipitação é em torno de 1.664,17mm, sendo que a variação mensal ocorre entre 13,54mm no mês de julho e agosto e, 331,04mm, no mês de janeiro. Os meses mais chuvosos compreendem o período entre outubro e março, quando concentram aproximadamente 86,16% das chuvas que ocorrem ao longo do ano. A capacidade erosiva da chuva apresenta média em torno de 8.875,40, considerada por Galdino (2015) também como erosividade forte. Os meses que apresentam os índices mais elevados de erosividade ocorrem de outubro a março. Ressalta-se a capacidade erosiva das chuvas para o mês de dezembro, janeiro e fevereiro, os quais apresentam, juntos, cerca de 65,53% da capacidade de erosão no ano.

Tabela 5. Variação da média anual da precipitação e da capacidade erosiva da chuva nas imediações do Reservatório de Furnas (Estação Meteorológica São Sebastião-MG).

Reservatório Furnas (Estação São Sebastião do Paraíso/MG)				
Mês	Precipitação		Erosividade	
	(mm)	(%)	(MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)	(%)
Janeiro	331,04	19,89	2325,73	26,20
Fevereiro	252,08	15,15	1470,63	16,57
Março	187,58	11,27	894,58	10,08
Abril	71,46	4,29	176,45	1,99
Mai	44,78	2,69	80,39	0,91
Junho	19,37	1,16	19,63	0,22
Julho	13,54	0,81	10,76	0,12
Agosto	13,64	0,82	10,88	0,12
Setembro	67,59	4,06	160,69	1,81
Outubro	139,54	8,39	543,89	6,13
Novembro	219,14	13,17	1161,99	13,09
Dezembro	304,41	18,29	2019,76	22,76

Fonte: Dados de Precipitação - Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): Estação Meteorológica São Sebastião do Paraíso/MG - 1990-2015.

Os exemplos da capacidade erosiva da chuva apresentados para os três reservatórios indicam a relação da dinâmica da sazonalidade das chuvas para as unidades federativas ora estudadas, Estados de Goiás e de Minas Gerais, em conformidade com o avanço e o recuo dos sistemas de massas de ar ao longo do ano. A variabilidade anual indicada pelos totais de chuva é justificada pelos aspectos físico-geográficos, como relevo, localização das estações meteorológicas no estado e a intensidade diferenciada que cada massa de ar atua em função da localização das Estações Meteorológicas.

Se, por um lado, as chuvas indicam o potencial erosivo, por outro lado, ao se relacionar erosão de borda de reservatório, variação sazonal de fluxo de temperatura e umidade no maciço, respondem por variações no perfil de umidade, o que implica variações da sucção e da infiltração do solo e, conseqüentemente, a perda da coesão do solo no maciço.

Referências

ALCÂNTARA, E. H. **Sensoriamento remoto da temperatura e dos fluxos de calor na superfície da água do reservatório de Itumbiara - GO**. São Jose dos Campos: INPE, 2010. Disponível em: <[http:// URLIB, NET/8_JMKD3MGP7W37tsrj2](http://URLIB,NET/8_JMKD3MGP7W37tsrj2)>. Acesso em: 02/01/2016.

ALCÂNTARA, E. H.; STECH, J. L. Desenvolvimento de modelo conceitual termodinâmico para o reservatório hidrelétrico de Itumbiara baseado em dados de satélite em telemétricos. **Revista ambiente & água – an interdisciplinary journal of applied science**: v.6, n.2, 2011.

ANTUNES, F. Z. Caracterização climática do Estado de Minas Gere: climatologia agrícola. **Informe agropecuário**, v.12, p. 9 – 13. 1986.

BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F.; PASSOS, E.; SUGUIO, K. **Estrutura e origem das pesquisas tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. UFSC, 1994. 389 p.

CAIO, L. M.; JERÔNIMO, I. G. M.; CRUZ, C. E. C.; CAMPELO, C. S. BAPTISTA, J. H. R.; MURILO S. L.; PINTO, H. F. F. **Monitoramento ambiental em bordas de grandes reservatórios hidrelétricos**. Departamento de Sistemas e Computação Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) - Campina Grande.

CAMAPUM, C. J.; GOUTTE, M.; GITIRANA, Jr. G.; MASCARENHA, M. M.A.; GUIMARÃES, R.C.; LUZ, M. P. A sucção no contexto dos processos erosivos. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG. ABMS. Goiânia-GO. **Anais**, p. 1-8. 2014.

CAMAPUM, C. J.; LELIS, A.C., SALES, M.M., MASCARENHA, M.M.D.A., ANGELIM, R.R.; PEREIRA, L.M. Erosão de bordo de reservatório. **Cartilha projeto de pesquisa monitoramento e estudo de técnicas alternativas na estabilização de processos erosivos em reservatórios de UHEs**. GECOM/UFG, Goiânia – GO, vol.1, 53p. 2015.

CAMPOS, F. S. **Estudo da variabilidade de precipitação**. 1990. 56 p. Monografia. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos. 1990.

DIAS, M. A. F. S.; SILVA, M. G. A. J. Para entender tempo e clima. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. J.; SILVA, D. M. A. (Organizadores). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S004459672004000400012&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 14 jul. 2008.

DREW, D. **Processos interativos homem – meio ambiente**. São Paulo: Difel, 1986.

FARIA, J.C. **Modelagem da propensão à densificação do solo em resposta aos ciclos de umedecimento e secagem**. 2000. 78 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Fitotecnia. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2000.

FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. **Eng. sanitária ambiental**. v. 18, n.1, p:83-93, jan/mar 2013.

GALDINO, S. Distribuição espacial da erosividade da chuva no Estado de Goiás e no Distrito Federal. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2015.

GEIGER, R. **Manual de microclimatologia**: o clima da camada de ar junto ao solo. 2. ed., Lisboa: Fundação Calouste Glbenkian. 1990. 556 p.

GRIMM, A. M. Verificação de variações climáticas na área do lago de Itaipu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 5. 1988. Rio de Janeiro. (**Anais**). Rio de Janeiro, 1988.

GUIDON, M. A. A. O. **Estudo das variações climáticas na área do lago de Tucuruí**. 1991. Dissertação de Mestrado em Geografia Física. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991, 2v.

HENSEN-SELLERS, B. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: a review. **Reviews of geophysics**, v. 24, p. 625-649, 1986. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/rg02i003p00625>>. Acesso em: 02/01/2016.

LIMA, M. C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas**. 2003. 336 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília. Publicação G.TD – 017ª/03; 2003.

LUIZ, G. C. **Influência na relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso - Município de Goiânia – GO**. 2012. 271 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

LUIZ, G. C.; MARTINS, L.F.R.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. A influência do clima na infiltrabilidade do solo. c. 3. 49 p. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. N.F.; CARVALHO, E. T. L. (Orgs.). **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais**. Brasília: Faculdade de tecnologia (Série Geotecnia – UnB, v. 4.), 2012.

MELLO, C. R.; SÁ, M. A.C.; CURI, N.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R.; SILVA, A. M. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.42, n.4, p.537-545, abr. 2007.

MENDONÇA, F.A.; DANNI OLIVEIRA, I.M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MONTEIRO, C. A. F. O clima da Região Sul. **Geografia do Brasil: grande Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, pp. 66-116. 1968.

MORAIS, V. S. **Previsão de ondas geradas por ventos em águas interiores e sua alteração devido à presença de vegetação aquática em margens de lagos/ Vinicius Souza Moraes – Ilha Solteira**. 2009. Dissertação de mestrado. Ciências Térmicas. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista. .2009.

MOURA, M. A. L; MEIXNER, F.X; . TREBS, M.; LYRA, R.F.F; ANDREAE, M.O.; NASCIMENTO FILHO, M.F. Evidência observacional das brisas do lago de Balbina (Amazonas) e seus efeitos sobre a concentração do ozônio. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 4, 2004.

NIMER, E. A circulação atmosférica e as condições de tempo como fundamento para a compreensão do clima. **Geografia do Brasil: Região Centro-Oeste**. Rio de Janeiro: IBGE. v. 1, p. 23-34. 1989.

PALMIERE, F.; LARACH, J.O.I. Pedologia e geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Orgs.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro, p. 59-89. 1996.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 1994. 97 p. Dissertação de Mestrado. – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. São José dos Campos. 1994.

SANCHES, F. FISCH, G. As possíveis alterações microclimáticas devido à formação do lago artificial da hidrelétrica de Tucuruí - PA. **Acta amazônica**, v. 35(1). 2005:41-50.

SANT'ANNA NETO, J. L. Clima e organização do espaço. **Boletim de geografia**. Maringá, v. 1, n.16, p.119-131. 1998.

SORRE, M. **Les fondements de la géographie humaine**. Primeiro tomo: Les fondements biologiques (Essai d'une écologie de l'homme). 3. ed., Paris: Armand Colin. 32 p. 1951.

TORNETTO, J.; VIANELLO, R. L.; REGINA, M. A. Caracterização macroclimática e potencial enológico de diferentes regiões com vitícola de Minas Gerais. **Informe agropecuário**. Belo Horizonte, v. 27. n. 234, p. 32-55, set./out., 2005.

TUBELS, A.; NASCIMENTO, F. J. Ç. **Meteorologia descritiva**. 7ª impressão. São Paulo: Nober, 1992. 374 p.

TUNDISI, J. G. Tropical South America: presents and perspectives: In: MARGALEF, R. (ed) **Limnology now: a paradigm of planetary problems**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.

TUNDISI, J. G. T; MATSUMURA-TUNDISI, J. D; ARANTES JUNIOR, J. E. M.; TUNDISI, N.F; MANZINI & R. DUCROT. The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical and biological variables. **Brazilian journal of biology**, v. 64, p. 177–186, 2004.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449 p.

CAPÍTULO 7

Aspectos geológicos e hidrogeológicos na deflagração e evolução da erosão hídrica em margens de reservatórios

Patrícia de Araújo Romão
Newton Moreira de Souza

Palavras chaves: Erosão. Geologia. Hidrogeologia.

1. Introdução

O processo erosivo hídrico nas regiões intertropicais, caso da maior parte do Brasil, é um dos principais processos da dinâmica geológica externa, o qual ocorre naturalmente, tendo em vista o clima quente e úmido, com a atuação das chuvas sobre o meio físico em expressiva parte do ano. Tal processo ocorre em intensidades diferentes em determinado terreno, dependendo das condições climáticas; das geológicas, incluindo as hidrogeológicas; das geomorfológicas; além das condições pedológicas. Todos esses condicionantes atuam mutuamente entre si (SALOMÃO; CANIL; RODRIGUES, 2012), influenciam e são influenciados pela cobertura vegetal existente.

Em condições naturais, o tempo de ocorrência do processo erosivo hídrico pode ser considerado lento, isto é, considerando um tempo geológico e levando-se em conta a atuação dos processos da dinâmica externa. A intervenção humana nas condições do meio físico, principalmente alterando e/ou retirando a cobertura vegetal, bem como modificando as condições de drenagem superficial e subsuperficial, pode induzir a aceleração ou mesmo a deflagração da erosão hídrica, podendo ser observados e seus efeitos sentidos em um tempo histórico, normalmente em intervalos de poucos anos ou até de poucos dias.

A deflagração e a evolução do processo da erosão hídrica ocorrem associadas a diversos fatores complexos e difíceis de definir. No caso da erosão hídrica laminar, destacam-se, durante o processo, as atuações iniciais da gota de água da chuva sobre o terreno e da correspondente lâmina do escoamento superficial difuso, ambas na desagregação e transporte de partículas do solo.

No caso da deflagração e evolução do processo erosivo hídrico linear, outros fatores podem ainda ser destacados. Além da atuação da gota de água da chuva, nesse processo em específico atua também o escoamento concentrado do fluxo superficial, gerando sulcos e ravinamentos. Os ravinamentos podem evoluir de tal modo a atingir o nível freático, transformando-se assim o processo em voçorocamento. A erosão linear ainda pode ser deflagrada ou intensificada pela erosão interna associada à percolação da água, gerando também voçorocas. O processo de voçorocamento pode evoluir com a ocorrência de movimentos de massa em suas encostas, como deslizamentos e quedas de blocos.

Quando ocorre desaceleração do fluxo do escoamento laminar ou concentrado, as partículas em transporte tendem a se depositar, evento que se sucede, parcial ou totalmente, quando surgem condições satisfatórias, como barreiras naturais ou artificiais ao longo do transporte; meandros côncavos de cursos d'água; ou lagos, lagoas e reservatórios. O depósito desse material pode culminar em assoreamento dos mananciais hídricos. Desses problemas de assoreamento, destacam-se os que podem ocorrer nos reservatórios das Usinas Hidrelétricas (UHE), abordados especificamente no Cap. 18.

Ainda, considerando-se o tempo rápido de ocorrência dos processos da dinâmica externa e analisando-se, em específico, as bordas imediatas de reservatórios, podem ocorrer também movimentos de massa, associados ou não a processos erosivos hídricos. Esses processos rápidos, em geral, são causados pela modificação das condições de umidade nesses locais, induzidas pela oscilação diária da lâmina d'água ou mesmo de suas variações sazonais e/ou por causa do efeito das ondas originadas pelos ventos gerados nos reservatórios (Cap. 16). A oscilação do nível d'água e o efeito das ondas podem ainda intensificar processos erosivos existentes, anteriores ao enchimento do reservatório, por causa da modificação do nível de base de erosão (Cap. 8).

Especificamente para o caso das margens/bordas de reservatórios, é possível apontar que as erosões nesses locais podem ocorrer em decorrência das novas condições de equilíbrio solo-atmosfera e solo-água ou por interferência antrópica na apropriação inadequada das margens, bem como por efeito das ondas da água do reservatório. As erosões nas bordas, associadas à construção de reservatórios, podem ocorrer a partir da existência de áreas de empréstimo abandonadas. Já no que concerne à possibilidade de ocorrência de erosões nas bordas, associadas ao reservatório em fase de operação, tal fato pode ser dar pelo efeito das ondas advindas do próprio reservatório ou do movimento de embarcações ou mesmo pela perda de resistência dos solos, devido ao aumento de umidade, em contato com a água do reservatório, atuando esses fatores isoladamente ou em conjunto (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Logo, a partir do exposto, são descritos a seguir os condicionantes geológicos/hidrogeológicos dos processos erosivos hídricos relacionados ao escoamento difuso e, em item seguinte, aqueles associados ao escoamento concentrado, considerando-se as margens de reservatórios (áreas próximas aos reservatórios) que tiveram seu uso alterado ou intensificado (Cap. 15). Ao final deste capítulo, são apresentados exemplos dessas ocorrências. Os reservatórios exemplificados incluem as usinas hidrelétricas de Batalha, de Itumbiara e de Furnas, todas da Eletrobrás-Furnas, cujo mapa de localização é apresentado no Cap. 15. Os aspectos climáticos; geomorfológicos; pedológicos e do uso e cobertura do solo, relacionados aos processos erosivos em margens de reservatórios, são abordados detalhadamente nos Capítulos 6, 8, 5, bem assim nos Capítulos 17 e 15, respectivamente.

2 Condicionantes geológicos da erodibilidade e da suscetibilidade à erosão hídrica laminar

Como discutido anteriormente, é possível ressaltar, a respeito dos condicionantes do processo erosivo hídrico, os principais materiais sobre os quais atuam a gota de água da chuva e o posterior escoamento difuso dessa água, no caso da erosão laminar. Nas regiões in-

terropicais brasileiras, a maior parte dos materiais existentes na superfície constitui-se em materiais inconsolidados (DIAS, 1995). A compreensão desse quadro considera o fato de, principalmente, na maior parte do Brasil, reinarem condições tectônicas relativamente estáveis e condições climáticas que possibilitaram a atuação intensa do intemperismo sobre o substrato rochoso, durante um tempo geológico tal que os materiais expostos hoje na superfície constituem-se, em sua maioria, em espessas camadas de materiais inconsolidados. Consequentemente, em geral, quando o substrato rochoso aflora em superfície, ou seja, no caso em que os materiais inconsolidados subjacentes inexistem ou formam delgadas camadas, é porque as rochas praticamente são ou pouco alteradas resistiram aos processos intempéricos, sobressaindo em maiores altitudes no relevo.

Assim, no Brasil, a maior parte dos materiais sobre os quais atua o processo erosivo hídrico pode ser considerada constituída de materiais inconsolidados, os quais ocorrem sobre um substrato rochoso, tendo sido originados ou não desse substrato, sendo, por isso, denominados de materiais residuais – caso originados de um substrato rochoso – ou transportados – caso possuam outra origem. Esse material inconsolidado pode ainda ser classificado como jovem (residual) ou maduro (residual ou transportado), conforme o tempo de ação das intempéries sobre ele e de acordo com a resistência desse material ao intemperismo. Dos materiais transportados, destacam-se principalmente aqueles que são deslocados do local de origem e depositados por ação da gravidade (colúvios e depósitos de tálus), por ação fluvial (aluviões e terraços aluviais) ou por ambos (colúvio-aluviais). Podem ser citados ainda os solos orgânicos e os materiais transportados e depositados por ação marinha, eólica e glacial.

O substrato rochoso, bem como os materiais inconsolidados, transportados ou residuais podem ser descritos por meio da sua litologia, ou seja, pela sua composição mineralógica, textura e estrutura, além da profundidade dos materiais inconsolidados no perfil de alteração (SALOMÃO; ANTUNES, 1998). A suscetibilidade à erosão hídrica dos materiais rochosos, consolidados e inconsolidados, pode ser analisada a partir de sua erodibilidade, ou seja, do comportamento desses materiais quanto à resistência ao processo erosivo, considerando desde a desagregação das partículas, pela ação da gota da chuva (efeito *splash*), até o transporte dessas partículas. A desagregação das partículas pode ocorrer de igual modo pela ação da própria água do escoamento superficial. No caso da erosão laminar, como já citado, a análise pode ser realizada de acordo com a erodibilidade e com a suscetibilidade dos materiais inconsolidados, residuais jovens, transportados e/ou maduros.

No caso dos materiais inconsolidados residuais, a erodibilidade e a suscetibilidade aos processos erosivos são proporcionais, entre outros: ao grau de alteração; ao de fraturamento e ao de xistosidade ou de foliação (SERRA JÚNIOR; OJIMA, 1998). Associados a esses fatores, é possível afirmar também que, em relação à coesão do material, quanto menor, menos resistentes são os materiais à desagregação e ao transporte dessas partículas. Além disso, a espessura da camada correspondente aos materiais inconsolidados no perfil de alteração influencia as condições de infiltração e percolação da água da chuva e, consequentemente, a condutividade hidráulica do material.

Quando se tratam de materiais inconsolidados residuais jovens, a textura e a estrutura da rocha que deram origem a esse material recebem a denominação de reliquiar, possuindo uma composição mineralógica associada à rocha de origem. Além disso, destaca-se a possibilidade de existirem planos de fraqueza herdados, como é o caso dos planos de xistosidade, de fraturas, de falhas ou de juntas. Outra questão que influencia no comportamento desses mate-

riais residuais jovens é o fato de serem, na maior parte, materiais de pequenas espessuras, considerados rasos, o que condiciona um maior escoamento superficial em relação à infiltração da água da chuva. Quanto menor a espessura, menor a possibilidade de infiltração da água da chuva, correspondendo assim a áreas mais suscetíveis ao processo erosivo hídrico laminar.

Especificamente, para o caso de rochas alteradas, com diversos planos de fratura ou de juntas e de xistosidades em exposição na superfície, é comum a ocorrência de materiais que sofreram processos de empastilhamento. O empastilhamento consiste no processo de desagregação superficial das rochas, quando submetidas a ciclos naturais de umidificação e secagem. Frazão, Mioto e Santos (1976) descrevem esse processo para o caso de rochas sedimentares (arenitos argilosos, siltitos, argilitos e folhelhos) do Grupo Tubarão, da Bacia Sedimentar do Paraná. Em se tratando de margens de reservatórios, análise em questão, o processo de empastilhamento ocorre não só pela modificação das condições de umidade do maciço por meio das oscilações climáticas sazonais, mas também pela oscilação do nível d'água (diária ou sazonal) do manancial, refletindo em suas bordas mais próximas. A modificação das condições de umidade e de percolação da água nessas bordas imediatas não somente cria superfícies com materiais desagregados como também gera planos de fraqueza, pela ação da água, percolando em planos de descontinuidade, como planos de fraturas, de falhas e de juntas, por meio dos quais podem ser deflagrados ou intensificados movimentos de massa.

No caso de materiais transportados, o transporte e depósito podem ter sido de tal modo que a coesão entre as partículas depositadas é baixa, como é o caso dos depósitos aluviais recentes, apresentando grãos bem selecionados e arredondados; ou de materiais correspondentes a colúvios, com grãos não selecionados, ou seja, angulosos e de tamanhos diversos. O fato de ser de baixa coesão, por si só, aumentaria a erodibilidade do material, porém, a alta porosidade e a permeabilidade facilitam a infiltração da água da chuva, diminuindo o escoamento superficial e, conseqüentemente, a erodibilidade, que, nesses materiais, é classificada como baixa.

Já em relação aos materiais inconsolidados maduros, a estrutura é mais homogênea que a dos residuais jovens, geralmente, não guardando mais semelhança com a rocha de origem, podendo inclusive corresponder tanto a materiais residuais quanto a materiais transportados. Nas condições tropicais brasileiras, destaca-se o fato de que, em geral, esses materiais têm uma composição mineralógica predominante de minerais secundários, argilominerais e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A textura característica de tais materiais corresponde a agregações de partículas, conferindo-lhes comportamento geotécnico parecido com o de materiais de textura arenosa (LUIZ; MARTINS; CAMAPUM DE CARVALHO, 2014) ou granular, formando espessas camadas no perfil de alteração e, ao mesmo tempo, possibilitando um aumento na capacidade de infiltração, por causa da maior condutividade hidráulica (Cap. 5). Por isso, a suscetibilidade desses materiais maduros, quanto aos processos erosivos hídricos laminares, é, em geral, classificada como baixa a moderada.

Associados aos materiais inconsolidados como descritos, citam-se os tipos de solo, classificados segundo as características pedológicas (SALOMÃO; ANTUNES, 1998). Ao ser analisada a erodibilidade em relação à suscetibilidade à erosão hídrica laminar na bacia hidrográfica do rio Manso, na qual se localiza o reservatório homônimo, Xavier et al. (2010) classificaram o grau de erodibilidade de acordo com o tipo de solo: a) Muito Fraco, para os solos hidromórficos e Gleissolos; b) Fraco, para Latossolo Vermelho-Escuro; c) Médio, para Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo; d) Forte, para Cambissolos e

Plintossolos; e) Muito Forte, para Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos. Segundo esses autores, a referida bacia hidrográfica possui problemas de assoreamento, causados pelo transporte de sedimentos provenientes de suas cabeceiras, significando uma ameaça à vida útil do respectivo reservatório.

Salomão, Canil e Rodrigues (2012), na apresentação de exemplos de aplicação da Geologia de Engenharia no controle de erosões, analisaram os materiais inconsolidados existentes na bacia hidrográfica do rio São Francisco, MT, quanto à erodibilidade e suscetibilidade aos processos erosivos hídricos. Nessa análise, os materiais inconsolidados transportados aluviais (Neossolo Flúvico) – localizados em terraços e planícies com inclinações menores que 3%, com funcionamento hídrico apresentando relativa facilidade de infiltração da água até o nível freático – foram classificados como de baixa erodibilidade e baixa suscetibilidade à erosão laminar. Quanto aos materiais inconsolidados residuais jovens (Neossolo Litólico e Cambissolo) – localizados nas encostas de morros com inclinações maiores que 20%; com infiltração parcial da água da chuva no horizonte superficial raso, escoando em superfície – foram classificados como possuindo erodibilidade muito alta e extremamente suscetíveis à erosão laminar. Já os materiais inconsolidados maduros (Latossolo Vermelho) – situados em colinas amplas com inclinações menores que 6%, com porção média e superior das vertentes apresentando alta taxa de infiltração da água da chuva e nível freático profundo – foram classificados como de baixa erodibilidade e pouco a não suscetível à erosão laminar.

Em suma, de acordo com Calderano Filho et al. (2009), a erodibilidade do solo está diretamente relacionada à sua permeabilidade e à estabilidade de suas agregações, por causa de suas próprias características físicas, químicas e morfológicas, como: textura, estrutura, gradiente textural, teor de argila, teor de matéria orgânica, pH, teor de argila dispersa, presença ou não de camadas de impedimento. Assim, segundo esses autores, pode-se afirmar que interferem no processo erosivo, entre outros, as variáveis, os atributos e as propriedades do solo: profundidade, permeabilidade, textura, estrutura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade das agregações, pH do solo, porcentagem de argilo-minerais, fertilidade e conteúdo de matéria orgânica. Esses autores destacaram os aludidos fatores na descrição dos conceitos e critérios adotados no diagnóstico geoambiental realizado por eles para a área do entorno do reservatório da UHE de Tombos, MG.

De modo similar, conforme Calderano Filho et al. (2009), são fatores associados à suscetibilidade à erosão: as classes de textura, consideradas por eles como um dos fatores que mais influenciam na perda de solos; os tipos e graus de estrutura dos solos, como é o caso das estruturas prismáticas e em blocos, que, quanto mais desenvolvidas e com a existência de cerosidade, conferem maior suscetibilidade à erosão hídrica; a profundidade dos solos, que, quanto mais rasos (profundidades menores que 50 cm, como é o caso de Neossolos Litólicos), maior a suscetibilidade; e o gradiente textural entre o horizonte superficial e o subsuperficial, salientando-se que solos que apresentam esse gradiente têm, correspondentemente, maior suscetibilidade à erosão hídrica.

A partir do contexto apresentado, é possível afirmar que, além do conhecimento do estado de alteração e grau de fraturamento, é necessária ainda a observação da composição mineralógica e da textura, ou mesmo de outras estruturas porventura existentes, para a estimativa indireta da suscetibilidade à erosão hídrica laminar ou à perda de solo. Crepani et al. (2001, p.73) apontam uma escala (com valores de 1,0 até 3,0) –segundo eles, “absolutamente relativa e empírica” – de vulnerabilidade natural à perda de solo, de litologias mais comumen-

te encontradas na superfície terrestre, denominada por eles de vulnerabilidade à denudação (intemperismo e erosão). De acordo com esses autores, com relação ao grau de coesão das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, conforme apresentado na Tabela 1, considera-se o fato de que, em rochas pouco coesas, podem prevalecer os processos erosivos. Quanto ao comportamento geológico-geotécnico dessas rochas, o termo denominado de grau de coesão pode ser associado ao seu grau de consistência. Na escala desenvolvida por Crepani et al. (2001), a unidade de paisagem natural pode ser considerada estável quando os eventos naturais que nela ocorrem favorecem os processos de formação e desenvolvimento do solo, com ocorrência de solos bastante desenvolvidos e intemperizados. Por conseguinte, esses autores definem que a unidade é considerada vulnerável quando prevalecem os processos modificadores do relevo, predominando, nessa unidade, processos de erosão, ao invés de processos de formação e desenvolvimento do solo.

Tabela 1. Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns.

Litologia	Escala de vulnerabilidade à perda de solos
Quartzitos ou metaquartzitos (metamórficas)	1,0 (estável)
Riolito, Granito, Dacito (ígneas)	1,1 (estável)
Granodiorito, Quartzo Diorito (ígneas) Granulitos (metamórficas)	1,2 (estável)
Migmatitos, Gnaisses (metamórficas)	1,3 (estável)
Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito (ígneas)	1,4 (mod. estável)
Andesito, Diorito, Basalto (ígneas)	1,5 (mod. estável)
Anortosito, Gabro, Peridotito (ígneas)	1,6 (mod. estável)
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto (metamórficas)	1,7 (mod. estável)
Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito (ígneas)	1,8 (median. estável)
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto (metamórficas)	1,9 (median. estável)
Estauroлита xisto, Xistos granatíferos (metamórficas)	2,0 (median. estável)
Filito, Metassilito (metamórficas)	2,1 (median. estável)
Ardósia, Metargilito (metamórficas)	2,2 (median. estável)
Mármore (metamórficas)	2,3 (mod.vulnerável)
Arenitos quartzosos (sedimentares) ou ortoquartzitos (metam.)	2,4 (mod.vulnerável)
Conglomerados, Subgrauvacas (sedimentares)	2,5 (mod.vulnerável)
Grauvacas, Arcósios (sedimentares)	2,6 (mod. vulnerável)
Siltitos, Argilitos (sedimentares)	2,7 (vulnerável)
Folhelhos (sedimentares)	2,8 (vulnerável)
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos (sedimentares)	2,9 (vulnerável)
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc. (sedimentares inconsolidadas)	3,0 (vulnerável)

Modificado de Crepani et al. (2001).

3 Condicionantes geológicos e hidrogeológicos da deflagração e/ou evolução da erosão linear hídrica e processos associados

A partir do exposto neste capítulo até aqui, é possível afirmar que o entendimento dos principais condicionantes geológicos e hidrogeológicos do processo erosivo hídrico linear, bem como do processo laminar envolve o conhecimento da erodibilidade do material inconsolidado. No caso da erosão linear, especificamente, é necessária a observação de que a suscetibilidade à erosão hídrica, no que se refere aos aspectos geológicos e hidrogeológicos, é condicionada tanto pela resistência à desagregação e ao transporte das partículas, inicialmente pela gota da água da chuva e pelo seu escoamento superficial, quanto pela resistência ao transporte pelo escoamento concentrado das linhas de fluxo, gerando sulcos e ravinas, e, quando associada aos processos de erosão interna, originando voçorocamentos. A erosão interna, também condicionada pela resistência do material à desagregação e ao transporte de partículas, internamente, pode também dar origem a voçorocas, por meio de processos de subsidência ou colapso na superfície do terreno, por vezes formando grandes cavidades, lentamente ou em curtos espaços de tempo.

Desse modo, é possível classificar as erosões lineares em sulcos, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, podendo evoluir por aprofundamento em ravinas e em erosão em voçoroca, a qual ocorre porque, no seu desenvolvimento, há a atuação da água subsuperficial, incluindo o aquífero freático, com ocorrência de erosão interna, fenômeno denominado de *piping*. Assim, ao serem observadas as possibilidades de infiltração e escoamento superficial e subterrâneo das águas, a compreensão do desenvolvimento dos processos erosivos pode ser materializada a partir da análise integrada entre os elementos que compõem o meio físico e a interpretação do funcionamento hídrico dos materiais (SALOMÃO; CANIL; RODRIGUES, 2012) ao longo do perfil de alteração.

A concentração das linhas de fluxo em superfície pode-se dar principalmente em virtude da própria configuração do relevo, basicamente pela forma convergente em superfície (Cap. 8). Também pode ser induzida pelo escoamento preferencial ao longo de lineamentos, expressos por foliações, falhamentos e fraturamentos, originando descontinuidades, correspondentes a linhas de fraqueza, nas quais surgem reentrâncias (sulcos), podendo evoluir conforme a continuidade e resistência ao entalhamento desses planos, em profundidade (ravinas) ou ainda atingir o nível freático (voçorocas).

Ainda, considerando-se o fato da existência de reservatórios advindos da construção de UHE e tendo em vista os processos erosivos terem sido deflagrados e/ou intensificados, na faixa de sua influência, é importante analisar o histórico de oscilação diária e sazonal do nível d'água do manancial, modificando o nível d'água freático, principalmente nas suas bordas. Outro fato fundamental trata-se da evolução dos focos erosivos lineares preexistentes e dos movimentos de massa associados, antes e depois da construção do manancial.

Nos próximos três subitens, são abordados os aspectos referentes aos condicionantes geológicos e hidrogeológicos associados especificamente ao processo erosivo linear em margens de reservatórios, relacionados principalmente à litologia, à estrutura geológica e às condições do funcionamento hídrico das águas do fluxo subsuperficial, apresentados nessa ordem.

3.1 Suscetibilidade à erosão hídrica linear – Deflagração e evolução quanto à litologia e perfil de alteração

Do que foi discutido, referente à erodibilidade dos materiais inconsolidados, associada ao perfil de alteração e à origem, se residual ou transportado, destaca-se, neste subitem, a resistência do material, principalmente, à evolução do processo, quando o escoamento difuso torna-se concentrado em linhas de fluxo.

Assim, em se tratando da suscetibilidade aos processos erosivos lineares, a erodibilidade dos materiais ao longo do perfil é condicionada por fatores, como: quando em profundidade ocorrem variações texturais, em geral, um material mais permeável, sobrejacente a um material menos permeável (MORTARI, 1994), condicionando a formação de dutos internos preferenciais de fluxo da água; quando o fluxo interno acompanha caminhos preferenciais preexistentes, como as feições criadas de origem biológica; quando são criadas e/ou intensificadas, linhas internas preferenciais de erosão, ou seja, o fenômeno de *piping* é deflagrado e/ou intensificado, podendo culminar em processos de voçorocamentos, ou também ressurgindo nas paredes de voçorocas, nas quais aflora o nível freático. Ainda, essas feições erosivas lineares podem estar ou não associadas ao sistema de drenagem fluvial, sendo, por isso, denominadas de erosões conectadas ou desconectadas (Cap. 8) do curso d'água superficial, respectivamente.

De acordo com Silva et al. (2003), as voçorocas conectadas à rede de drenagem, em geral, localizam-se em locais baixos da topografia, como fundos de cabeceiras de drenagem, e em antigos leitos, com a presença de depósitos aluviais ou alúvio-colviais, evoluindo em direção à montante. Segundo esses autores, esse tipo de erosão é formado por solapamento das bases dessas feições, a partir do canal de drenagem, por causa da atuação de fluxos internos, subsuperficiais. Já as desconectadas, segundo esses mesmos autores, comumente localizam-se no terço médio e mais alto das vertentes, em materiais residuais ou transportados, podendo ser deflagradas a partir da implantação de canais preferenciais de escoamento superficial da água da chuva, também evoluindo em direção à montante, desde sulcos até ravinas e voçorocas.

Quanto à evolução das paredes das voçorocas e a resistência litológica ao processo, localizadas nas bordas imediatas, influenciado pela construção do próprio reservatório, tal se refere principalmente à ocorrência de movimentos de massa, especificamente à ruptura de taludes, o que é abordado no Cap. 16.

3.2 Suscetibilidade à Erosão hídrica linear – Deflagração e Evolução quanto às Estruturas geológicas

Outros condicionantes associados aos aspectos geológicos, além dos já apresentados, tratam-se das estruturas geológicas (foliações, fraturamentos e falhamentos), gerando lineamentos, em geral, visíveis e mapeáveis a partir da superfície. As estruturas litológicas do substrato podem condicionar não somente a deflagração, mas também a evolução das feições erosivas, principalmente de voçorocas.

Mortari (1994) destacou, por exemplo, para o caso das foliações existentes no substrato rochoso, associadas aos materiais inconsolidados residuais jovens de alteração de rochas do

tipo ardósia e metarritmitos (rochas metamórficas de baixo grau de metamorfismo, do Grupo Paranoá), localizados no Distrito Federal, a evolução de processos de voçorocamentos encaixados em “V”, diferentemente, segundo ele, para os casos de ocorrências de processos erosivos lineares em rochas sedimentares da Bacia do Paraná, cujas estruturas horizontais condicionaram a evolução em “U”, para esse último caso. Na evolução em “U”, o principal condicionante consiste em camadas mais resistentes no fundo da feição erosiva, cuja litologia impede a evolução vertical, continuando o processo de voçorocamento a evoluir a partir de suas paredes.

Quanto ao mapeamento dos lineamentos estruturais em superfície, Silva et al. (2003) destacaram, na área estudada por eles, localizada no médio-baixo vale do ribeirão do Secretário, em Paty dos alferes (RJ), o comportamento de feições erosivas lineares (ravinas/voçorocas), principalmente as desconectadas, que ocorrem associadas às direções principais das falhas, das fraturas e das juntas existentes. Esses autores observaram uma série de ravinas/voçorocas desconectadas, alinhadas paralelamente, e outras com lineamentos muito semelhantes aos das estruturas representadas pelo adensamento da drenagem, ocorrendo as orientações das ravinas/voçorocas desconectadas, coincidentes com as direções estruturais principais na área (NW-SE e N-S). Segundo Silva et al. (2003), a forte influência da estrutura geológica nas ravinas/voçorocas desconectadas pode ser explicada tomando por fundamento o desenvolvimento dessas feições nas encostas em que os materiais inconsolidados são residuais, ou seja, de alteração direta do substrato rochoso, os quais ainda preservam as zonas de fraqueza da rocha. Vieiro (2004) também sinalizou situação semelhante de correlação das ocorrências da maioria das voçorocas coincidentes com os lineamentos estruturais existentes na área estudada por ela.

O processo de voçorocamento pode ainda estar associado à existência de descontinuidades, formadas por falhamentos, fraturamentos ou juntas não preenchidos ou preenchidos com material de textura granular, mais permeáveis, criando planos e dutos de alívio de pressão para os quais fluem as águas subterrâneas (SILVA; PIETROBELLI; TRATZ, 2013), originando fenômenos associados à erosão interna.

3.3 Nível d'água freático e deflagração/evolução dos processos erosivos lineares de voçorocamentos

Apesar da complexidade do processo erosivo de voçorocamento, é possível apontar que existe uma estreita relação, desde a sua deflagração até a sua evolução: com a variação da profundidade do nível freático (com a sazonalidade, por exemplo); com as características dos materiais ao longo do perfil de alteração; com a existência de descontinuidades em subsuperfície, como fraturas, falhas e outros lineamentos; com as características dos aquíferos; com o fluxo de água subsuperficial; e, conseqüentemente, com a erosão interna ou ainda com as modificações impostas pela construção e operação de reservatórios, como, por exemplo, o efeito do rebaixamento rápido do reservatório sobre os processos que ocorrem em suas margens. Esse último exemplo, em específico, é abordado no Cap. 16.

Drumond e Bacellar (2006) destacaram que o nível d'água influencia na evolução das voçorocas, por meio de estudo de caso em terrenos gnáissicos, pertencentes ao Complexo Bação, cuja superfície freática encontra-se, em geral, na base do saprolito, e sua exfiltração, no

sopé dos taludes. De acordo com Drumond e Bacellar (2006), a voçoroca analisada evoluiu, entre outros processos, por erosão superficial, com a formação, por exemplo, de cachoeiras em alcovas de regressão, ou por movimentos gravitacionais facilitados pela ocorrência de trincas de tração e pela exfiltração de água no sopé. Esse processo de exfiltração de água no sopé também auxiliou na movimentação dos taludes da voçoroca, por rastejo.

Segundo Drumond e Bacellar (2006), mesmo com a disponibilidade de vasta literatura sobre voçorocas, existem poucas informações sobre a influência da sazonalidade do nível freático na sua evolução. A sazonalidade pode influenciar na evolução de um processo de voçorocamento tanto pelo aumento da pluviosidade e consequente aumento da vazão do canal superficial no interior da feição como também pela influência indireta na variação da profundidade do nível freático, o que pode ocorrer inclusive no período de estiagem, conforme relatado por Drumond e Bacellar (2006). No primeiro caso de aumento da vazão, durante e imediatamente após eventos de precipitação, aumentou a capacidade de transporte de sedimentos, fazendo crescer a probabilidade de ocorrer solapamento basal, favorecendo movimentos de massa. No segundo caso, mesmo no período de estiagem, no auge da estação seca, a ascensão gradativa do nível freático depois do período chuvoso fez com que ocorressem – ou se intensificassem – processos de rastejo e pequenos escorregamentos rotacionais no sopé dos taludes.

Quanto ao perfil de alteração, a espessura do material inconsolidado pode influenciar no funcionamento hídrico da vertente. Por exemplo, quando o substrato rochoso está a pequenas profundidades, ou seja, os materiais inconsolidados são rasos, como no caso de solos do tipo Neossolo Litólico e Cambissolo, a água infiltra parcialmente, escoando a maior parte em superfície. Nesse exemplo, o terreno se torna “extremamente suscetível à erosão laminar, suscetível a sulcos e ravinas, e não suscetível” a voçorocas (SALOMÃO; CANIL; RODRIGUES, 2012).

No caso de materiais inconsolidados transportados, como é o caso dos solos do tipo Neossolo Flúvico, comuns em Terraços e Planícies aluviais, ou do tipo Gleissolo, Salomão, Canil e Rodrigues (2012) descrevem como de baixa suscetibilidade à erosão laminar (como já comentado anteriormente), mas extremamente suscetíveis a ravinas e voçorocas, pois a água da chuva costuma infiltrar com relativa facilidade, ficando retida no aquífero freático, aflorante e subaflorante, escoando em direção ao fundo do vale. Entre as voçorocas estudadas por Viero (2004), especificamente aquelas em que foram identificados fenômenos de erosão interna por *piping*, na grande maioria dos casos, as feições encontravam-se no horizonte C dos solos, local em que, segundo a autora, o fluxo subsuperficial era mais evidente.

Quando se trata das margens de reservatórios, podem ocorrer, além de movimentos de massa, dado o efeito de seu rebaixamento (Cap.16), a intensificação e/ou a deflagração de processos erosivos. Isso ocorre devido ao fato de o entorno dos reservatórios sofrer ação da variação significativa do nível de sua lâmina d'água e da própria existência dessa lâmina d'água, alterando as condições climáticas locais (Cap. 6).

Assim, a condição de umidade e saturação dos materiais existentes nos maciços da borda de reservatórios pode variar e desencadear variações de sucção capazes, por sua vez, de instabilizar as encostas dos maciços, deflagrando os processos erosivos. Essa variação da lâmina d'água pode inclusive modificar a morfologia e o fluxo das águas subterrâneas, quando comparados às condições reinantes antes de seu enchimento e funcionamento (CAMAPUM

DE CARVALHO et al., 2014, 2015), dependendo dos condicionantes geológicos e hidrogeológicos, principalmente do tipo de material, do perfil de alteração e das estruturas associadas.

4 Processos erosivos hídricos no Entorno da UHE de batalha, Furnas e Itumbiara, segundo a Geologia e a Hidrogeologia

A análise da erodibilidade e da suscetibilidade aos processos erosivos hídricos, laminares e lineares no entorno e nas margens dos reservatórios de Batalha, Furnas e Itumbiara foi realizada nas áreas correspondentes a bacias hidrográficas próximas, conforme a existência de outras represas à montante ou considerando uma distância média de 50 km dos respectivos reservatórios. A seguir, são apresentados alguns mapas correspondentes a essas áreas, bem como alguns detalhes para exemplificação das ocorrências erosivas e de movimentos de massa em relação, principalmente, aos seus condicionantes geológicos e hidrogeológicos, nas margens e entornos dos reservatórios em questão. Também como exemplos são apresentados os mapas de suscetibilidade à erosão para o entorno de Itumbiara.

A Figura 1 apresenta o mapa relativo às unidades litológicas nas bacias hidrográficas do entorno do Reservatório de Batalha. A geologia dessa área consiste em rochas inconsolidadas correspondentes a depósitos aluvionares, coberturas detriticas e detrito-lateríticas ferruginosas; e em rochas das formações: Canastra Indiviso, Chapada dos Pilões, Paracatu, Serra do Landim, Topázio, Vazante e Formações Córrego do Barreiro, Córrego do Sansão e Ribeirão Contagem, do Grupo Paranoá.

As litologias que ocorrem nas proximidades do reservatório de Batalha, na porção sul, consistem principalmente em depósitos de areia, no caso dos depósitos aluvionares, solos lateríticos associados aos materiais, coberturas e filitos. O destaque à porção sul dessa área deve-se à maior largura do reservatório nesse local. Nas margens do reservatório, as feições erosivas laminares e lineares ocorrem principalmente sobre o substrato rochoso correspondente aos filitos, em solos do tipo Cambissolo, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo (MATAMOROS SEVILLA, 2016). Especificamente no caso dos filitos, destacam-se o fenômeno de empastilhamento e a ocorrência de feições erosivas lineares, apresentados na Figura 2.

Quanto à hidrogeologia, os filitos correspondem ao Subsistema Fraturado, cuja maioria dos poços apresenta baixas vazões. Segundo Almeida et al. (2006), o funcionamento hídrico desse subsistema é controlado principalmente pela foliação principal dos filitos e pelos sistemas de fraturamento. Também conforme esses autores, as características dos filitos – foliação de alto ângulo (>60° de mergulho); considerável aumento da porosidade no perfil dos materiais inconsolidados residuais, nas camadas mais alteradas, às vezes de 1 a 2% para 25% – melhoram as características do aquífero como armazenador e como transmissor de água, favorecendo a infiltração das águas das chuvas; e ainda, quando esse substrato rochoso é recoberto por solos do tipo Latossolo, as condições desse aquífero são otimizadas. Porém, quando o relevo torna-se dissecado – como sucede em grande parte das áreas de ocorrência desse subsistema, com declividades moderadas a elevadas, associadas a solos rasos, pouco permeáveis –, o escoamento superficial aumenta em relação à infiltração das águas pluviais (ALMEIDA et al., 2006). Esse fato por si só indica um aumento da suscetibilidade dessa área aos processos erosivos hídricos, tanto laminares quanto lineares.

A Figura 3 apresenta as litologias que ocorrem no entorno do reservatório de Itumbiara. São principalmente rochas metamórficas e ígneas, pertencentes à Faixa de Dobramentos de Brasília, e rochas sedimentares e ígneas, da Bacia Sedimentar do Paraná. Tais rochas são compostas basicamente de xistos, clorita xistos, quartzo mica xistos, muscovita biotita xistos, sericita xistos, muscovita quartzitos, ortognaisses, dacitos, arenitos, argilitos arenosos, e localmente metagranitos e metatonalitos, com maior ocorrência de rochas xistosas nas margens do reservatório. Sotopondo as rochas sedimentares, em geral em formas de relevo de topo plano, ocorrem coberturas detrito-lateríticas, com concreções ferruginosas.

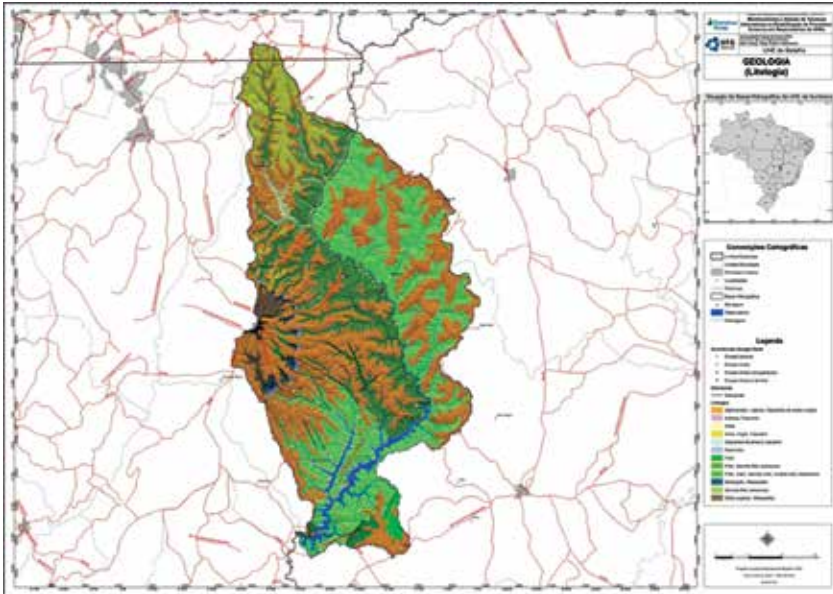


Figura 1. Mapa da litologia referente à área do entorno do reservatório de Batalha.



Figura 2. Fenômeno de empastilhamento e feições erosivas lineares em sulcos, próximo ao curso d'água Rapaz Grande, afluente do reservatório de Batalha, em Cristalina - GO (Foto: Mascarenha, 2016; Relatório de Campo, maio de 2016).

Como citado, no entorno do reservatório de Itumbiara, a litologia predominante é composta basicamente por rochas xistosas, que, em conjunto com o material de cobertura, correspondentes, na maioria, a materiais inconsolidados residuais jovens (solos do tipo Cambissolo,

Associação Cambissolo e Latossolo e Neossolo Litólico), possuem alta erodibilidade. As feições erosivas ocorrem em áreas mapeadas, variando de moderada a alta suscetibilidade aos processos erosivos (Figura 4 e Figura 5). A alta suscetibilidade ocorre nas áreas dissecadas, com substrato rochoso de rochas xistosas. A maior suscetibilidade à erosão linear também ocorre nos locais de maior dissecação, com maiores desníveis, apresentando a maioria das alturas relativas às drenagens mais próximas entre 16 e 50 m.

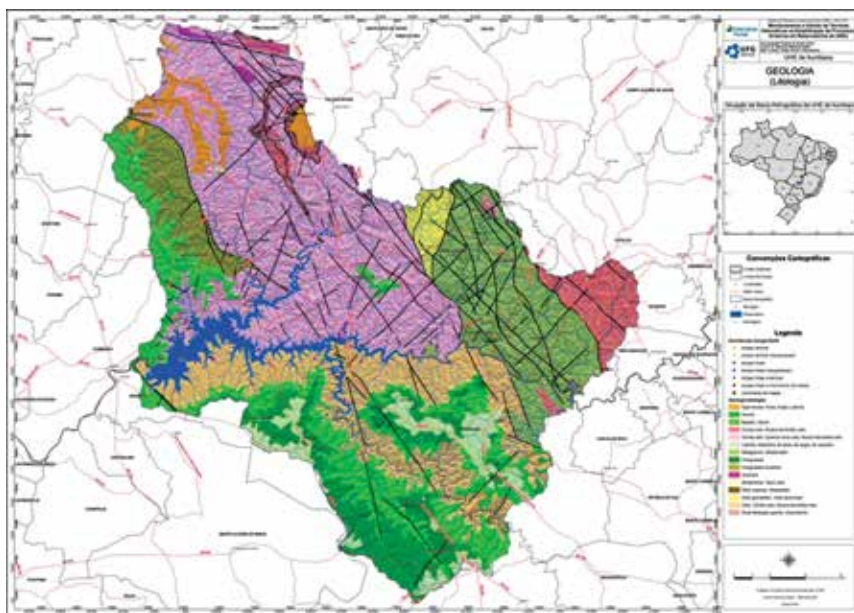


Figura 3. Mapa da litologia referente à área do entorno do reservatório de Itumbiara.

No contexto hidrogeológico, as rochas xistosas, de maior ocorrência, correspondentes à Unidade B do Grupo Araxá, apresentam baixa porosidade e baixo ângulo de mergulho da foliação e, conseqüentemente, baixa vocação hidrogeológica, com ocorrência expressiva de poços secos ou com vazão muito baixa, em alguns casos, podendo ter sua vazão aumentada na área, quando ocorrem fraturas abertas (ALMEIDA et al., 2006). Essas características, como já descrito, aumentam a suscetibilidade aos processos erosivos hídricos, pois se associam a um maior potencial ao escoamento que à infiltração das águas das chuvas. Conforme Ramidan, Campos e Antunes (2005, p.9), as voçorocas existentes nesse local “envolvem materiais não saturados até suas profundidades máximas expostas, com surgências de água no fundo das erosões possivelmente representando um nível de base perene”.

O substrato rochoso, no caso do entorno do reservatório da UHE Furnas, é complexo (Figura 6). São basicamente rochas metamórficas e ígneas, sotopostas por Depósitos Aluvionares e por Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas. Destacam-se os materiais inconsolidados residuais jovens, de maior erodibilidade (solos do tipo Cambissolo e Neossolo Litólico), que ocorrem sobre o substrato rochoso composto por xistos do Grupo Araxá (Unidade A); filitos da Formação Canastra; granodioritos e granitos do Corpo Intrusivo Porto Mendes; granitos, migmatitos e granitoides do Complexo Lavras. Contudo, as maiores incidências de

processos erosivos hídricos lineares e de movimentos de massa ocorrem em materiais de baixa erodibilidade, correspondentes principalmente a solos do tipo Latossolo, o qual recobre litologias diversas na área (Figura 7), além de estarem associados a desníveis expressivos nas formas de relevo, com valores entre 16 e 50 m.



Figura 4. Mapa da suscetibilidade à erosão laminar do entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.



Figura 5. Mapa da suscetibilidade à erosão linear do entorno do reservatório da UHE de Itumbiara.

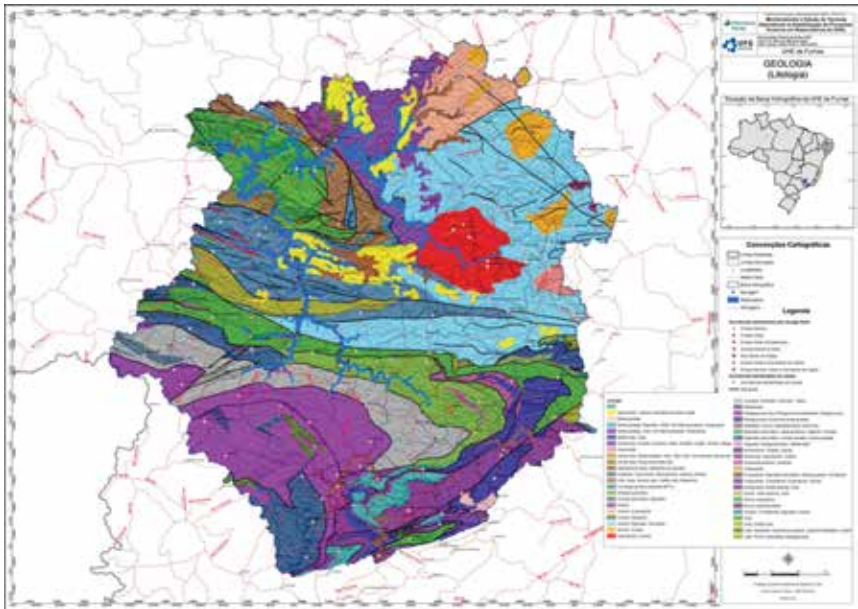


Figura 6. Mapa da litologia referente à área do entorno do reservatório de Furnas.

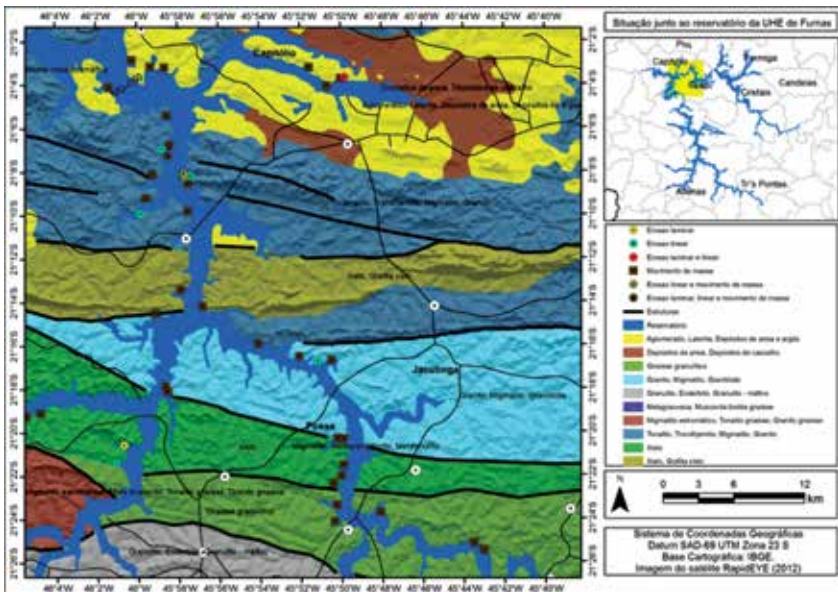


Figura 7. Detalhe do mapa litológico referente à área do entorno do reservatório de Furnas, em que se concentra a maioria dos fenômenos associados a movimentos de massa.

A hidrogeologia do entorno do reservatório da UHE Furnas pode, de igual modo, ser considerada complexa, tendo em vista a diversidade litológica e as diversas estruturas de falhamentos, de dobramentos e de fraturamentos existentes na área. No entanto, quanto ao

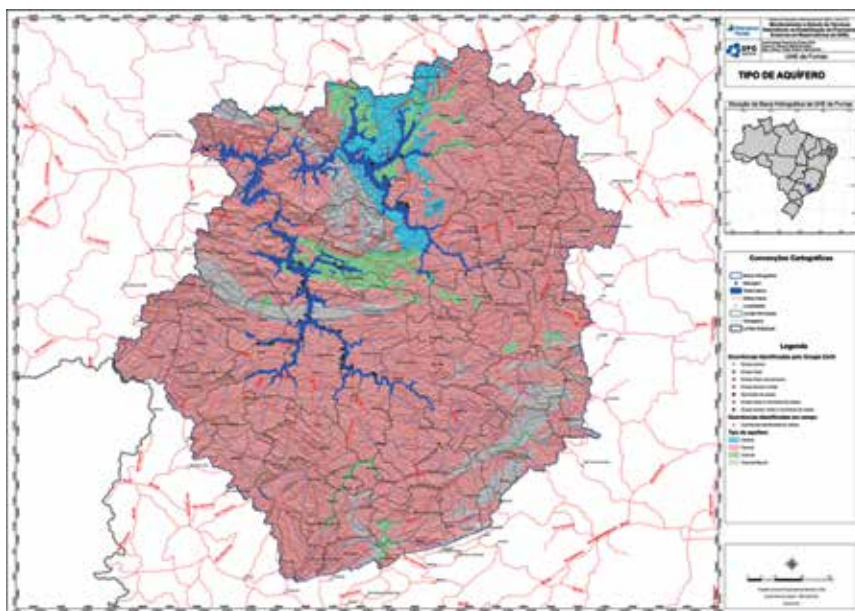


Figura 8. Mapa dos tipos de aquífero das bacias hidrográficas do entorno do reservatório da UHE de Furnas.

tipo de aquífero (Figura 8), é possível ressaltar a ocorrência da maior parte dos fenômenos de movimentos de massa, associados a substratos rochosos que formam aquíferos do tipo fissural, e, subordinadamente, a materiais inconsolidados maduros, correspondentes a aquíferos classificados como do tipo granular.

5 Considerações finais

Quanto à estimativa da suscetibilidade à erosão hídrica laminar, além do conhecimento da erodibilidade dos materiais ao longo do perfil geológico, a qual pode ser correlacionada com o estado de alteração e grau de fraturamento, é necessário observar principalmente: a composição mineralógica; as classes de textura, incluindo o gradiente textural, se existir; as estruturas geológicas e a profundidade dos materiais inconsolidados, ao longo do perfil de alteração, considerando-se a ação desde a gota de água da chuva até o seu escoamento superficial, em relação às condições de infiltração dessa água.

Quanto aos processos erosivos lineares, é importante analisar a suscetibilidade à erosão hídrica no que se refere aos aspectos geológicos e hidrogeológicos, associados principalmente à litologia, à estrutura geológica e às condições do funcionamento hídrico das águas do fluxo subsuperficial. Logo, esses processos são condicionados tanto pela resistência à desagregação e ao transporte das partículas – inicialmente pela gota da água da chuva e pelo seu escoamento superficial, o qual, por sua vez, associa-se à quantidade dessa água que infiltra – quanto pela resistência ao transporte pelo escoamento concentrado das linhas de fluxo, gerando sulcos, ravinas e voçorocamentos, nesse último caso, associado ao afloramento do nível freático.

É necessário observar-se ainda a evolução dos focos erosivos lineares preexistentes e dos movimentos de massa associados, antes e depois da construção do manancial. Considerando-se o fato da existência de reservatórios advindos da construção de UHE e de os processos erosivos terem sido deflagrados e/ou intensificados na faixa de sua influência, é importante analisar o histórico de oscilação diária e sazonal do nível d'água do manancial, modificando o nível d'água freático, principalmente nas suas bordas.

Especificamente, apesar da complexidade do processo erosivo de voçorocamento, apontou-se que existe uma estreita relação de sua evolução com a variação da profundidade do nível freático; com as características dos materiais ao longo do perfil de alteração; com a existência de descontinuidades em subsuperfície, como fraturas, falhas e outros lineamentos; com as características dos aquíferos; com o fluxo de água subsuperficial e, conseqüentemente, com a erosão interna ou ainda com as modificações impostas pela construção e operação de reservatórios.

Referências

ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; RODRIGUES, A. P.; CAMPOS, J.E. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração, 2006, 232 p.

CALDERANO FILHO, B.; ANDRADE, A. G.; POLIVANOV, H.; GUERRA, A. J. T.; RAMALHO FILHO, A. Diagnóstico geoambiental da área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica de tombos, para fins de recuperação de áreas degradadas. **Caminhos de Geografia**. v. 10, n. 30. 2009. p. 118-134.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GOUTTE, M.; GITIRANA Jr., G.; MASCARENHA, M. M. A.; GUIMARÃES, R. C.; LUZ, M. P. A sucção no contexto dos processos erosivos. **Anais do XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG**. ABMS. Goiânia-GO. 2014. p. 1-8.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., LELIS, A.C., SALES, M.M., MASCARENHA, M.M.D.A., ANGELIM, R.R. & PEREIRA, L.M. **Erosão de bordo de reservatório: cartilha do projeto de pesquisa "Monitoramento e estudo de técnicas alternativas na estabilização de processos erosivos em reservatórios de UHEs"**. GECOM/UFG, Goiânia-GO, vol. 1, 2015, 53p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 124 pp.

DIAS, R. D. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, , v. 16, n.1-2, 1995. pp. 51-55.

DRUMOND, F. N.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do alto rio das Velhas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2. 2006. pp. 87-96.

FRAZÃO, E. B., MIOTO, J. A., SANTOS, A. R. O fenômeno de desagregação superficial em rochas argilosas – sua implicação na estabilidade de taludes viários. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro, **Anais**, 1:211-228. 1976.

LUIZ, G. C.; MARTINS, L. F. R.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Variação espacial e temporal do processo de infiltração considerando aspectos geotécnicos e ambientais no município de Goiânia/GO. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Goiânia. **Anais** em mídia eletrônica. 2014.

MATAMOROS SEVILLA, T. M. **Estudo de processos erosivos: análise geotécnica de áreas degradadas no entorno do reservatório de Batalha GO/MG**. 2016. 134 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF. 2016.

MORTARI, D. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Distrito Federal**. 1994. 200 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília – Unb, Brasília-DF. 1994.

RAMIDAN, M. A. S.; CAMPOS, T. M. P.; ANTUNES, F. S. Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara – GO. In: XXVI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **Anais**. Goiânia. 2005. p. 1-15.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Solos em pedologia. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. (Editores). **Geologia de engenharia**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p.87 – 99.

SALOMÃO, F. X.; CANIL, K.; RODRIGUES, S. P. Exemplo de aplicação da geologia de engenharia no controle preventivo e corretivo dos processos erosivos. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**. v. 2, n. 2. 2012.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. Caracterização e classificação de maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A. M. do S.; BRITO, S. N. A. (Editores). **Geologia de engenharia**, 1998. p. 211-226.

SILVA, B. W.; PIETROBELLI, G.; TRATZ, E. B. Circulação e vazão de água em encosta com erosão em túneis na bacia do rio das pombas – Guarapuava – PR. **Terr@Plural**. v.7, n.2, 2013. p. 269-285.

SILVA, T. P.; SALGADO, C. M.; GONTIJO, A. H. F.; MOURA, J. R. S. A influência de aspectos geológicos na erosão linear – médio-baixo vale do Ribeirão do Secretário, Paty do Alferes (RJ). **Geosul**. v. 18. n. 36, 2003. pp. 131-150.

VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão, RS**. 2004. Dissertação de mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2004.

XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L.; SILVEIRA, A.; SALOMÃO, F. X. T. Análise da suscetibilidade à erosão laminar na bacia do rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2. 2010.

CAPÍTULO 8

A influência de aspectos geomorfológicos, de cobertura do solo e climáticos no surgimento e evolução de processos erosivos no entorno de reservatório

Andrelisa Santos de Jesus
Marluce Silva Sousa
Diego Tarley Ferreira Nascimento
Patrícia de Araújo Romão
José Camapum de Carvalho

Palavras-chave: Geomorfologia. Cobertura do solo. Clima. Erosão.

1 Introdução

O surgimento e a continuidade dos processos erosivos são multicausais e somente a análise integrada de todos os seus condicionantes permite a sua compreensão. Entretanto, a análise consiste em subdividir o processo em elementos causais, buscando o funcionamento de cada um deles para, ao final, integrá-los e sintetizar o processo.

Nesse sentido, constitui preocupação deste capítulo a relação entre erosão no entorno de reservatório e os aspectos geomorfológicos, os de cobertura do solo e os climáticos, embora outros, como a microfauna presente no interior do maciço e a morfologia de subsuperfície, em especial a do manto impermeável com suas falhas, fraturas, veios e trincamentos condicionantes da hidrogeologia sejam, geralmente, também relevantes dentro do processo de desencadeamento e evolução dos processos erosivos. Para tal, além das questões teóricas e metodológicas, serão considerados aspectos empíricos acerca de três reservatórios: Batalha, Furnas e Itumbiara, sinteticamente apresentados a seguir.

Segundo informações de Furnas (2016), a Usina Hidrelétrica Batalha, que foi inaugurada em 2014, está localizada no rio São Marcos, um dos principais afluentes da margem direita do rio Paranaíba, entre os municípios de Cristalina (GO) e Paracatu (MG), com um reservatório de 138 km². A Usina Hidrelétrica de Itumbiara, que está em funcionamento desde 1980, localiza-se no Rio Paranaíba, entre Itumbiara (GO) e Araporã (MG), e possui um reservatório de 778 km². Já a Usina Hidrelétrica de Furnas, posta em funcionamento em 1963, está localizada no rio Grande, com um reservatório de 1.440 km², entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória (MG).

2 Aspectos geomorfológicos

No que tange aos aspectos geomorfológicos, é necessário conhecer e considerar a morfometria, a morfologia e a morfodinâmica, tanto à escala da bacia hidrográfica quanto à escala

das margens do reservatório. A proporção da área do reservatório na bacia hidrográfica é importante, pois as características técnicas do reservatório e da barragem e as características geomorfológicas são diferentes. Portanto, devem ser considerados fatores como a idade, o volume, a área e as outras características do reservatório e da barragem, ao longo do perfil longitudinal do rio, tendo em vista os processos associados à dinâmica geológica externa, induzidos com a construção da barragem e do reservatório.

A área do reservatório define, em seu entorno, a morfologia do contato solo-água e, na zona imersa limítrofe a esse contato, como a mudança do meio, irá interferir na estabilidade do maciço. Existe aí a necessidade de se avaliar a interação do maciço com seu entorno antes e após o enchimento do reservatório. Como primeiro aspecto ambiental a ser avaliado, mas que não integra o escopo deste capítulo, tem-se que a microfauna aeróbica existente antes do enchimento do reservatório desaparecerá, abrindo espaço para a microfauna anaeróbica. Como segundo aspecto com relevância imediata para a engenharia, anote-se que as formas de relevo que antes interagem com a atmosfera passam a interagir com a água. Com isso, passa-se da atuação da sucção no solo para a atuação de pressões neutras positivas em função da presença da água no extrato de solo submerso, o que afeta diretamente as condições de estabilidade do maciço, dada a possibilidade de geração de rupturas de taludes que, embora imperceptíveis em superfície, interferem diretamente na estabilidade do maciço exposto e, portanto, no desencadeamento e evolução das erosões de margem de reservatório. Mas, apesar de sua relevância e sem menosprezar o destaque dado aqui a essa questão, essa também não integra o escopo deste capítulo.

2.1 Dinâmica da bacia hidrográfica

A compreensão dos processos erosivos em áreas de reservatório passa, necessariamente, pela análise da bacia hidrográfica, unidade que permite a investigação sistêmica e integrada dos componentes, processos e interações (BOTELHO e SILVA, 2004). A bacia hidrográfica é considerada um sistema aberto, cuja entrada de energia provém do clima e relevo locais, sendo que a saída energética ocorre por meio dos fluxos de água, sedimentos e solúveis (COELHO NETO, 1995). Observa-se, portanto, com base nessas definições, que o balanço entre as energias estabilizadoras e instabilizadoras é alterado na zona inundada pelo reservatório, intervindo diretamente na estabilidade dos maciços, não necessariamente provocando rupturas.

A dinâmica geomorfológica da bacia hidrográfica está relacionada aos processos de erosão, transporte e deposição oriundos das relações gerais entre aspectos geológicos, solos, formas de relevo, dinâmica climática, cobertura e usos da terra e, mais especificamente, ao escoamento dos canais fluviais. Esses aspectos devem ser considerados, tanto nas margens ou bordas do reservatório quanto na escala regional, já que a compreensão da dinâmica geomorfológica regional tem implicações importantes na geomorfologia fluvial. Cabe aqui reforçar a necessidade de mais estudos dos fenômenos de interação maciço/água nas áreas de entorno dos reservatórios, pois instabilizações do maciço em subsuperfície podem conduzir ao surgimento e à evolução das erosões de borda do reservatório.

No que se refere à dinâmica geomorfológica regional, a bacia hidrográfica do rio São Marcos, onde se localiza o reservatório de Batalha, é assimétrica, pois o vale está encaixado

entre a escarpa de falha que delimita, a leste, a Chapada dos Pilões, e a escarpa erosiva que delimita a Serra dos Cristais e o domo de Cristalina, a oeste (IBGE, 2006). Esse conjunto é parte do Planalto do Distrito Federal, modelado em rochas pré-cambrianas da Faixa Brasília da Província do Tocantins (PIRES, 2012).

Já o reservatório de Furnas e seu entorno situam-se numa área de alta complexidade geológica e geomorfológica, de limite entre escudo cristalino e bacia sedimentar, mais precisamente entre o cráton do São Francisco, a Província da Mantiqueira, a Província do Tocantins e a Bacia do Paraná (SOUZA e RODRIGUES, 2014). Em se tratando de unidades geomorfológicas, a maior parte do reservatório abrange a Serra da Canastra, enquanto a parte sul, o Planalto de Poços de Caldas, e a parte leste, o Planalto Centro-Sul Mineiro (IBGE, 2006).

O entorno do reservatório de Itumbiara, por sua vez, também se localiza na divisa entre a estrutura cristalina, o Planalto Central brasileiro, a bacia sedimentar e o Planalto do Rio Paraná (IBGE, 2006). A estrutura geológica, condicionada pelo sentido noroeste-sudeste, determina a existência de duas unidades topográficas com dinâmicas geomorfológicas distintas. Do extremo noroeste ao sul e sudeste, abrangendo o município goiano de Buriti Alegre e os municípios mineiros de Araguari, Uberlândia e Tupaciguara, encontram-se superfícies erosivas tabulares, assentadas em arenitos e basaltos mesozoicos com baixas declividades, limitadas por desníveis acentuados de altas declividades. Essa unidade compõe parte dos planaltos e chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná. Já ao nordeste, com maiores densidades de drenagens e declividades, estão partes do Planalto Central brasileiro e do Planalto de Uberlândia.

As influências da dinâmica da bacia hidrográfica nos processos que ocorrerão nas áreas do entorno do reservatório associam-se aos tipos de leito, de canal e, principalmente, de rede de drenagem, a qual, por sua vez, vincula-se à genética dos rios, à geometria dos canais e às formas de escoamento. Tais aspectos e respectivas tipologias são bem apresentados em Christofoletti (1980, 1981), Cunha (2001) e Novo (2008), entre outros.

Os canais de drenagem dos reservatórios de Batalha, Furnas e Itumbiara são sinuosos e apresentam meandros nos baixos cursos. Esse tipo de padrão associa-se aos processos de erosão fluvial, na medida em que há, naturalmente, escavação da margem côncava e deposição na margem convexa. Todavia, nas bordas dos reservatórios de Batalha e de Itumbiara, não são constatadas associações expressivas entre as bordas convexas e a ocorrência de erosão laminar e linear. Já nas bordas do reservatório de Furnas, observa-se alta correlação entre os movimentos de massa e as margens convexas, como se pode observar nas Figuras 1 e 2. Dessa breve observação geomorfológica, compreende-se que o condicionamento dos fluxos internos e das interações solo-atmosfera pela morfologia do terreno se constitui certamente na origem do predomínio dos processos erosivos e das rupturas de encosta nas margens expostas. Nas margens submersas, há que se considerar o impacto da perda de sucção no efeito de arco de tensões, pois a redução destas pode levar a rupturas de encostas na faixa presente sob a lâmina d'água do reservatório. Jesus (2013), ao estudar erosões existentes na cidade de Anápolis, Estado de Goiás, apresenta a influência da forma do relevo na evolução dos processos erosivos, realçando as questões relacionadas ao fluxo e às tensões.

Os leitos naturais dos rios são alterados quando a área é inundada para formar o reservatório, não havendo sentido em sua classificação em situações de regularidade, sobretudo

quando o nível de água é controlado. Já o padrão de drenagem predominante nas áreas é o dendrítico, exceto pela ocorrência de padrão radial centrífugo a oeste do rio São Marcos e do reservatório de Batalha, associada ao domo de Cristalina, que também resultam na assimetria da bacia hidrográfica.

Do mesmo modo que as especificidades de cada bacia hidrográfica, as particularidades de cada reservatório resultam em distintos processos. Por exemplo, o reservatório de Batalha possui 138 km², o que corresponde a 1,13% da área da bacia do rio São Marcos, que é de 12.140 km². A área do reservatório de Furnas é de 1.440 km², o que corresponde a 1% da área total da bacia do rio Grande, de 143.000 km². O rio Grande possui outras 12 barragens, quatro delas à montante de Furnas. E o reservatório de Itumbiara possui 778 km², o que corresponde a 0,35% da área total da bacia do rio Paranaíba, onde há, pelo menos, três outras grandes barragens, que compõem os reservatórios de Emborcação, à montante, e Cachoeira Dourada e São Simão, à jusante de Itumbiara.

Os maiores níveis de dissecação do relevo, decorrente da intensa morfodinâmica da área, e o maior número de barragens ao longo do rio são verificados no entorno do reservatório Furnas. Embora isso não seja o único fator relevante, condiz com uma maior expressividade de ocorrência de erosão laminar, linear e movimentos de massa entre os três reservatórios. Contudo, os locais de ocorrência desses processos não são, exatamente, as áreas de maior suscetibilidade, reforçando a necessidade de se compreender os demais fatores que implicam a erosão.

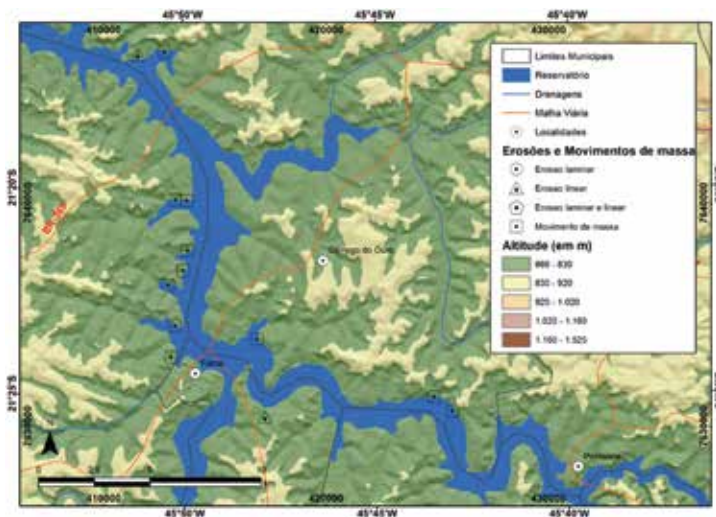


Figura 1. Ocorrência de movimentos de massa nas margens convexas nas bordas do reservatório de Furnas na porção sul. Fonte: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

A construção da barragem altera o equilíbrio dinâmico do fluxo de energia e dos processos naturais na bacia hidrográfica. Um desses processos refere-se à velocidade das águas, que depende de fatores como a declividade do perfil longitudinal, o volume, a forma da seção transversal, o coeficiente de rugosidade do leito e viscosidade da água (COELHO, 2008), sendo ainda relevante a morfologia do entorno no contato maciço/água que flui. A vazão, o

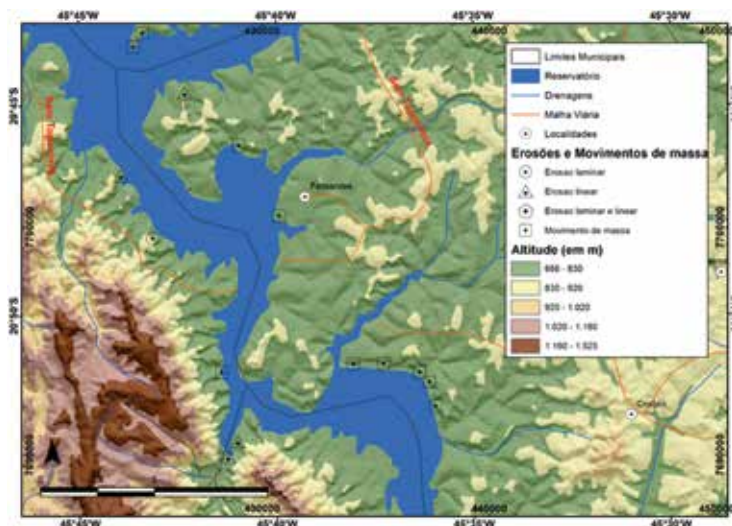


Figura 2. Ocorrência de movimentos de massa nas margens convexas nas bordas do reservatório de Furnas na porção norte. Fonte: *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

comportamento e a velocidade das águas e seu fluxo – turbulento ou laminar –, a potência, a capacidade e a competência do rio definem a erosão, o transporte e a deposição da carga sedimentar nas suas mais variadas formas, como suspensão, saltação e rolamento, de acordo com a granulação das partículas e das características da própria corrente, elaborando uma forma de relevo fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1980; NOVO, 2008). Portanto, uma mudança naqueles elementos promoverá consequências diversas.

Os impactos da construção de barragens na dinâmica da bacia hidrográfica é tema de investigação de diversos autores no Brasil, com destaque para Cunha (2001), para quem a construção da barragem tem efeitos diferentes em três áreas distintas.

À montante do reservatório, tende a ocorrer um aumento do nível de base e, tanto a forma do canal quanto a capacidade de transporte sólido são alteradas, ocorrendo assoreamento do canal principal e dos afluentes (CUNHA, 2001) e formação de novas áreas de inundação (COELHO, 2008).

No reservatório, a alteração da água corrente para água parada (lótica para lântica) origina margens de abrasão, recuo das margens, formação de praias (CUNHA, 2001), submersão de formas de relevo, formação de bancos arenosos emersos ou imersos, formação de lagoas fechadas, colmatação da desembocadura dos rios principais, formação de novas áreas de inundação (COELHO NETO, 2001) e, principalmente, o assoreamento do reservatório. Cabe acrescentar que também a qualidade da água represada, a qual passará por modificações ao longo da vida útil do reservatório, pode assumir papel de grande relevância no desencadeamento das erosões de borda de reservatório.

Em jusante do reservatório, a migração dos setores de erosão e sedimentação e modificações na dinâmica da foz provocam um reajustamento na morfologia do canal (COELHO NETO, 2001). O controle artificial da descarga líquida – a qual geralmente diminui em consequência da ampliação da área de evaporação – e de sedimentos promove rebaixamento do nível de base e o conseqüente entalhe do leito, aumentando os processos erosivos.

Brandt (2000) salienta que os grandes reservatórios têm capacidade de reter 99% dos sedimentos que recebem, enquanto os menores têm valores mais reduzidos. Cunha (2001) cita pesquisas realizadas entre 1973 e 1975, na Grã-Bretanha, mostrando que 90% dos sedimentos foram reduzidos à montante do reservatório. O prognóstico da eficiência na retenção de sedimentos e, portanto, do assoreamento e da descarga para jusante pode ser dado pelo método de Brune (BRANDT, 2000).

2.2 Influência de aspectos morfométricos e morfológicos

A influência do relevo no processo erosivo está associada principalmente à declividade, ao comprimento e à forma de vertente (JESUS, 2013).

De acordo com Moreira e Pires Neto (1998), a partir da análise de atributos das formas de relevo, que podem ser descritos por meio do gradiente (comumente descrito como declividade), comprimento de rampa, amplitude altimétrica e densidade de drenagem, relacionados ao grau de dissecação do relevo, é possível a avaliação do grau de energia erosiva e da suscetibilidade do terreno aos processos erosivos hídricos.

A amplitude altimétrica pode ser avaliada por meio do cálculo da distância vertical entre o topo ou crista de uma elevação até a drenagem mais próxima, o que pode ser mapeado por meio de uma função que determina o índice denominado HAND (*Height Above the Nearest Drainage*, ou seja, distância vertical acima da drenagem mais próxima). A associação dessa amplitude altimétrica com o comprimento de rampa é definidora da erosividade da água ao longo do seu trajeto superficial, embora outros fatores como cobertura vegetal, forma da área declivosa e temperatura da água e da superfície do terreno interfiram nessa erosividade. Abstraindo-se demais fatores, geralmente, quanto maior a relação entre a amplitude altimétrica e o comprimento de rampa, maior tende a ser a energia erosiva da água. Cabe aqui um destaque particular, geralmente pouco lembrado, que é a interferência da temperatura de superfície do terreno na erosividade da água, pois a diferença entre a temperatura da água e a dessa superfície provoca, durante o trajeto da água, alterações em sua viscosidade, intervindo diretamente em sua energia trativa sobre o solo.

Da análise integrada entre os atributos morfométricos, declividade, comprimento de rampa, amplitude altimétrica, densidade de drenagem e curvaturas ao longo do perfil (vertical), e ao longo da curva de nível (horizontal), são possíveis inferências quanto ao funcionamento hídrico das vertentes, cabendo observar que não se inseriu aqui a questão da temperatura de superfície, dada a sua dinâmica ao longo do tempo, o que dificultaria a análise proposta por este capítulo. Esse funcionamento pode ser observado quanto às condições de escoamento superficial, em relação às de infiltração e do fluxo subsuperficial, as quais, por sua vez, associam-se à velocidade e à aceleração do escoamento superficial e às condições de percolação das águas subterrâneas, principalmente das de subsuperfície, até a profundidade do nível freático. Mais uma vez, cabe aqui um destaque: no processo interativo entre a variação térmica ao longo do perfil e a variação imposta pela água que se infiltra, altera-se não só a viscosidade da água, como a pressão na fase ar eventualmente oclusa.

Ainda segundo Moreira e Pires Neto (1998), as formas de relevo podem também ser descritas por sua geometria, desde o topo da vertente até às curvaturas de seus perfis longi-

tudinais e transversais, definindo-se a menor unidade taxonômica, que, por sua vez, podem ser associadas à aceleração ou à desaceleração ou à convergência ou divergência do fluxo de água superficial.

No que tange à erosão laminar, as condições do fluxo superficial relacionam-se à divergência e à aceleração do fluxo de água superficial; as formas convergente-convexa e retilínea, divergente-convexa e retilínea e planar-convexa e retilínea apresentam maior suscetibilidade. Se observadas apenas as condições de superfície, as formas côncavas são menos suscetíveis, especialmente a convergente-côncava; no entanto, se o olhar voltar-se para o condicionamento da umidade do solo e do estado de tensão atuante no maciço por essa forma de superfície, conforme mostrou Jesus (2013), análises mais detalhadas merecem ser realizadas caso a caso para uma maior compreensão desse comportamento. Essa forma de relevo impõe ao maciço maior umidade e um nível freático, eventualmente presente no maciço, mais elevado, diminuindo a sucção/capilaridade atuante no solo não saturado. Essa diminuição minora a pressão na fase ar no processo de infiltração, reduzindo a instabilização estrutural do solo, que se dá por meio da infiltração, que gera pressão positiva na fase ar, enquanto o maior efeito de arco de tensões também contribui para a maior estabilidade do maciço. Silva et al. (2015) demonstraram, em estudos de solos de talude de voçoroca na cidade de Silvânia em Goiás, que a erodibilidade aumentou com o aumento da sucção no ensaio de *Inderbitzen*.

Quanto à erosão linear, associada principalmente à concentração de fluxo, além da sua aceleração, bem como às condições de fluxo subsuperficial, as formas convergente-convexa, convergente-retilínea, convergente-côncava são as mais suscetíveis, enquanto as formas planar-convexa, planar-retilínea, planar-côncava, convergente-côncava, convergente-retilínea, convergente-côncava são menos suscetíveis. Nesse caso, porém, o condicionamento do processo erosivo pela morfologia do terreno deve contemplar, além dos efeitos internos já discutidos quando da análise da erosão superficial, o impacto dessa forma como condicionante do fluxo no canal. Tal condicionamento interferirá diretamente no solapamento das bases dos taludes e, portanto, no avanço transversal do processo erosivo, podendo inclusive condicionar a formação da seção em U.

No entorno do reservatório de Batalha, a margem esquerda da bacia do rio São Marcos apresenta menor densidade de drenagem e possui formas tabulares delimitadas por escarpas nas quais a declividade se acentua. A margem direita apresenta desníveis que ultrapassam 500m, entre a Serra dos Cristais e a área do reservatório de Batalha, além de elevada densidade de drenagem e declividades acentuadas que chegam a 45%, o que favorece os processos erosivos. Tais processos, tanto laminares quanto lineares, aumentam à medida que o reservatório se alarga para jusante, onde se correlacionam com elevados comprimentos de rampa e declividades médias (entre 8 e 20%). A erosão laminar concentra-se em formas divergente-retilíneas, divergente-convexo e convergente-retilíneas, enquanto a erosão linear concentra-se em formas convergente-retilíneas, divergente-convexas e planar-côncavas.

Em Furnas, a complexidade geológica e morfogenética traduz-se em grandes desníveis topográficos, alta densidade de drenagem, elevadas declividades, forte dissecação do relevo e, portanto, morfodinâmica acelerada. Consequentemente, há grande ocorrência de erosão laminar, linear e movimentos de massa, com especial

destaque para os movimentos de massa nas bordas do reservatório, certamente, decorrentes de instabilizações do maciço na zona inundada, geradas por perda de sucção/capilaridade do solo e pela ascensão do nível freático.

As Figuras 3 e 4 apresentam a principal área de ocorrência de erosão laminar, linear e movimentos de massa no entorno de Furnas. Esses processos, predominantemente, correlacionam-se a comprimentos de rampa maiores que 100m, declividades acima de 20% e formas convergente-côncavas (para a erosão linear) e divergente-convexas (para erosão laminar).

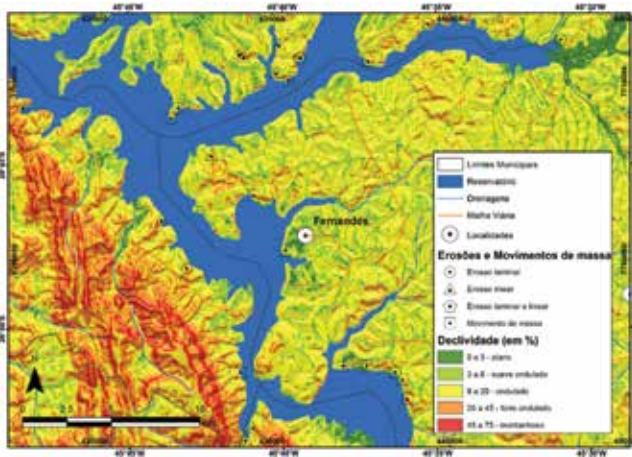


Figura 3. Declividade do relevo na porção norte do reservatório de Furnas. Fonte: *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

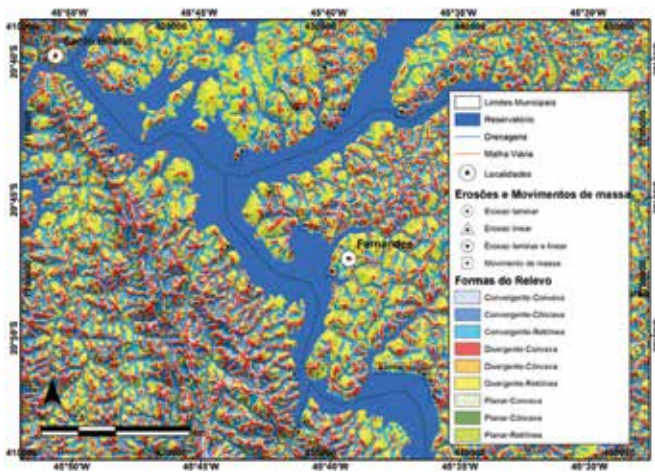


Figura 4. Formas do relevo na porção norte do reservatório de Furnas. Fonte: *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

Em Itumbiara, predominam processos erosivos dispersos ao longo do reservatório, exceto uma concentração de processos erosivos lineares ao sul de Corumbaíba

e a oeste da GO 139, em área de formas divergentes-retilíneas, declividades entre 3 e 8% e pequenos comprimentos de rampa. Tais características determinam baixa suscetibilidade à erosão linear, contradizendo a realidade local e pondo em evidência a necessidade da compreensão de outros fatores no desencadeamento dos processos erosivos. Entre os fatores importantes de serem analisados, destaca-se o tipo de solo e sua estabilidade estrutural frente à presença da água do reservatório para o maciço abaixo do nível de água do reservatório. Destaca-se também a modificação da temperatura e da umidade relativa do ar para a zona exposta à atmosfera, uma vez que esses elementos são condicionantes da interação solo-atmosfera e, portanto, da sucção atuante no solo. Geralmente, quanto maior a umidade relativa, menor a sucção no solo.

Os aspectos morfométricos e morfológicos são expressos em várias equações para o cálculo da erosão, como aquelas apresentadas por Carvalho (2008). A mais importante é a Equação Universal de Perdas de Solos, desenvolvida por Wischmeier e Smith, que exprime a ação dos principais fatores que influenciam a erosão pela chuva. Entre esses fatores, estão o L, comprimento do declive, e S, grau do declive, também chamado de fator topográfico (COUTINHO, 2014).

Acerca dessa temática, Bertoni e Lombardi Neto (1999) estabelecem que a velocidade da água varia com a raiz quadrada da distância vertical que ela percorre, e a sua energia cinética, de acordo com o quadrado da velocidade. Se o declive do terreno aumenta quatro vezes, a velocidade do escoamento da água aumenta duas vezes e a capacidade erosiva quadruplica. Bertoni e Lombardi Neto (1999) mencionam alguns princípios de hidráulica, segundo os quais a quantidade de material que pode ser arrastado varia com a quinta potência da velocidade de escoamento; quanto ao tamanho das partículas arrastadas, estes autores indicam que varia com a sexta potência da velocidade de escoamento. Desse modo, duplicando a velocidade de escoamento, a quantidade de material que pode ser transportado aumenta 32 vezes, e o tamanho das partículas que podem ser transportadas aumenta 64 vezes.

Machado et al. (2011) expõem e aplicam 56 variáveis morfométricas para o estudo de bacias hidrográficas, a maioria das quais podem ser obtidas por meio de geotecnologias. Vários autores apresentam investigações empíricas que comprovam o aumento proporcional das perdas de solo com o comprimento das vertentes (SILVA e MARIA, 2011) e com o aumento da declividade (INÁCIO et al., 2007). Contudo, somente a análise integrada de todos os condicionantes envolvidos permite explicar a maior ou menor ocorrência de processos erosivos em determinadas áreas do entorno dos reservatórios.

2.3 Condições geomorfológicas das margens

As condições geomorfológicas das margens constituem a primeira das condicionantes ambientais a serem monitoradas quanto à gênese e ao desenvolvimento dos processos erosivos em margens de reservatório, conforme Rubio (2014). Para o autor, a gênese está condicionada ao “tipo de relevo” e à declividade, enquanto o desenvolvimento está associado à declividade, à altura dos taludes e à extensão das praias.

Rubio (2014) estabeleceu os seguintes aspectos a serem monitorados relativamente às condições morfométricas das margens de reservatórios: forma da vertente, declividade, altura do talude, largura das praias e condições batimétricas. Destaca-se que, com relação à forma da vertente, as formas convexas, se observado apenas o condicionante estado de tensões atuantes no maciço, são mais suscetíveis aos escorregamentos, no entanto, se observados fatores como umidade do solo no maciço e nível freático, quando presente, tal entendimento pode se inverter. No que diz respeito à declividade, os processos erosivos se concentram em vertentes com declividades acima dos limiares de resistência para a condição de saturação, que são específicos para cada área. No que diz respeito à altura do talude, quanto maior, mais intensa a erosão, mas, nesse caso, igualmente se fazem necessárias análises complementares que compreendam a distribuição de umidade e sucção/capilaridade no maciço. No que tange à largura das praias: praias mais desenvolvidas diminuem a ação das ondas sobre as margens, reduzindo o solapamento dos pés de taludes e a erosão e contribuindo para a estabilização das margens.

No entorno do reservatório de Batalha, predominam margens retilíneas, com declividades entre 3 e 20% e comprimentos de rampa variados. Os processos erosivos ocorrem nas margens próximas à barragem, em áreas entre 8 e 20% de declividade – relevo ondulado –, com formas divergente-convexas e comprimentos de rampa variados.

No reservatório de Furnas, predominam margens divergentes retilíneas, com baixas declividades. Tal como apontado por Rubio (2014), predominam processos de erosão em margens convexas e à jusante de vertentes com altas declividades, ainda que o local de ocorrência apresente baixa declividade, inferindo-se que o processo tem origem nas rupturas de declive.

Em Itumbiara, as margens predominantes são retilíneas, divergentes ou convergentes, havendo a presença expressiva de margens com rampas longas, com mais de 500m, e baixas declividades. Os processos erosivos que ocorrem às margens associam-se, principalmente, às rampas convergente-retilíneas, de comprimento inferior a 100m e declividades de até 8%. Enquanto os focos de erosão linear ocorrem em áreas de maior suscetibilidade a esse tipo de erosão, a erosão laminar ocorre em áreas de menor suscetibilidade, impelindo a necessidade de avaliar outros fatores para além dos geomorfológicos, responsáveis pelo início e continuidade dos processos erosivos (SALOMÃO et al., 2012). Entre esses fatores, merecem atenção elementos relacionados à cobertura do solo.

3 Aspectos de cobertura do solo

A resolução CONAMA nº 302, de 20 de março de 2002, dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais. Segundo essa resolução, reservatório artificial refere-se à acumulação não natural de água destinada a quaisquer de seus múltiplos usos. Já área de preservação permanente diz respeito à área marginal ao redor do reservatório artificial e suas ilhas, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.

Em seu art. 3º, a Resolução CONAMA 302 aponta que constitui área de preservação permanente a área com largura mínima, em projeção horizontal, no entorno dos reservatórios artificiais, medida a partir do nível máximo normal de: 30m, para os reservatórios artificiais

situados em áreas urbanas consolidadas; 100m, para áreas rurais; 15m, no mínimo, para os reservatórios artificiais de geração de energia elétrica com até 10 hectares, sem prejuízo da compensação ambiental; 15m, no mínimo, para reservatórios artificiais não utilizados em abastecimento público ou em geração de energia elétrica, com até 20 hectares de superfície e localizados em área rural. Esses limites podem ser alterados com ampliação ou redução desde que seja observado o patamar mínimo de 30m, juntamente com as diretrizes do licenciamento ambiental e, se houver, do plano de recursos hídricos da bacia onde o reservatório se insere.

A Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; o capítulo II, art. 4º, inciso III aponta como áreas de preservação permanente as áreas no entorno dos reservatórios d'água artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d'água naturais, na faixa definida na licença ambiental do empreendimento. Cabe destaque, porém, que, em relação aos reservatórios, o inciso III do art. 4º do Novo Código Florestal, apesar de considerar Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, “as áreas no entorno dos reservatórios d'água artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d'água naturais, **na faixa definida na licença ambiental do empreendimento**”, ele remete para o licenciamento ambiental a definição de faixa de entorno do reservatório (grifou-se).

Os mapas de cobertura dos reservatórios de Furnas, Itumbiara e Batalha permitem verificar que, de um modo geral, o entorno desses reservatórios está com cobertura predominantemente antrópica, em detrimento da cobertura vegetal natural em toda a bacia hidrográfica dos reservatórios e também numa parte considerável das margens desses reservatórios, onde deveria prevalecer a vegetação natural, cumprindo a função de área de preservação permanente (Figuras 5, 6 e 7). Nos reservatórios de Itumbiara e Batalha, essa ausência de vegetação natural no entorno do reservatório é mais acentuada na porção montante do reservatório, enquanto que, no reservatório de Furnas, áreas de preservação permanente prevalecem na porção jusante.

Conforme prevê a Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012, no seu art. 5º, na implantação de reservatório d'água artificial destinado à geração de energia ou abastecimento público, é obrigatória a aquisição, desapropriação ou instituição de servidão administrativa pelo empreendedor das Áreas de Preservação Permanente criadas em seu entorno, conforme estabelecido no licenciamento ambiental, observando-se a faixa mínima e máxima em zona rural e urbana, conforme determina a resolução CONAMA 302.

No entorno dos reservatórios de Itumbiara, Batalha e Furnas, a cobertura antropizada dos solos se sobrepõe de forma acentuada às coberturas vegetais naturais. As margens desses reservatórios também não estão integralmente com as áreas de preservação permanente com cobertura vegetal natural, conforme prevê a legislação ambiental.

No reservatório de Itumbiara, muitos focos de erosão laminar e linear estão em toda a bacia do reservatório, mas, de acordo com as informações do mapa de cobertura do solo (Figuras 5, 6 e 7), com uma maior concentração de focos de erosão linear à jusante do reservatório. Por todo o entorno do reservatório de Batalha, existem processos erosivos mapeados, contudo maior concentração de focos erosivos ocorre na porção à montante próximo ao barramento. Com relação ao reservatório de Furnas, também existe uma grande quantidade de processos erosivos em seu entorno, merecendo destaque também a grande concentração de focos de movimentos de massa, cartografados nesse reservatório em maior quantidade que nos demais.

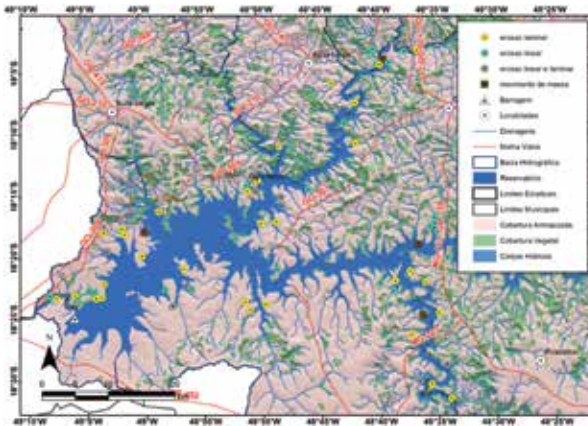


Figura 5. Mapa de cobertura do entorno do reservatório de Itumbiara. Fonte: Programa de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite (PMDBBS, 2012). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

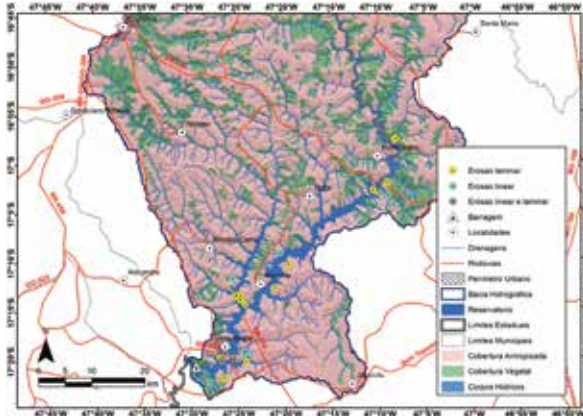


Figura 6. Mapa de cobertura do entorno do reservatório de Batalha. Fonte: Programa de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite (PMDBBS, 2012). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

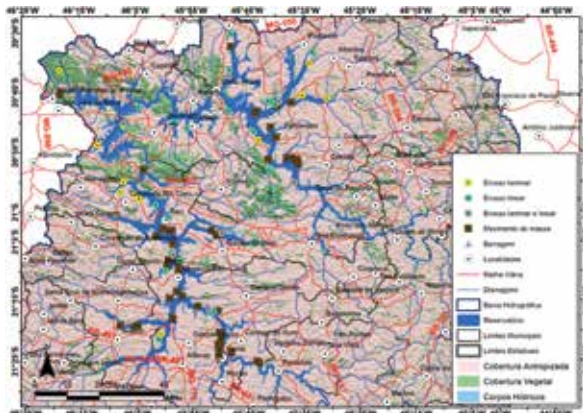


Figura 7. Mapa de cobertura do entorno do reservatório de Furnas. Fonte: Programa de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite (PMDBBS, 2012). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

3.1 A cobertura vegetal natural

Os três reservatórios analisados neste capítulo estão inseridos dentro do bioma Cerrado, que, segundo Ribeiro e Walter (1998), é um bioma que apresenta fisionomias que englobam formações florestais, savânicas e campestres. Ribeiro e Walter (1998) descrevem 11 tipos fitofisionômicos para o bioma Cerrado, relacionados na Tabela 1.

Tabela 1. Formações Fitofisionômicas (Ribeiro e Walter, 1998)

Formações Florestais	Mata ciliar Mata de galeria Mata seca Cerradão
Formações Savânicas	Cerrado sentido restrito Parque Cerrado Palmeiral Vereda
Formações Campestres	Campo sujo Campo rupestre Campo limpo

Em geral, em condições naturais preservadas, o entorno dos cursos d'água estão relacionados a formações florestais do tipo mata de galeria (Figura 8) e/ou mata ciliar ou formações savânicas do tipo veredas. Contudo, vale enfatizar que, em alguns pontos, as cotas de inundação podem ter inundado essas fitofisionomias, e o espelho d'água passou a ser circundado por outro tipo de formação fitofisionômica não típica em condições naturais, tais como mata seca, cerradão e formações savânicas (Figura 9) e campestres variadas.



Figura 8. Fitofisionomias dos reservatórios: (a) Em segundo plano espécies de formação florestal do tipo mata galeria na bacia do reservatório de Batalha (Fonte: Matamoros Sevilha, 2016); (b) Em primeiro plano espécies de formação savânica com espécie invasora do tipo *Brachiaria* na bacia do reservatório de Batalha (Fonte: Matamoros Sevilha, 2016).

Considerando a inserção dos reservatórios abordados no bioma Cerrado, merece destaque o fato de algumas espécies das fitofisionomias savânicas terem raízes muito profundas,

que, segundo Jesus et al. (2015), são importantes na descompactação do solo e na redução da velocidade do fluxo superficial, aumentando, assim, a capacidade de infiltração da água nos solos e, portanto, reduzindo a ocorrência dos processos erosivos e colaborando na alimentação do nível d'água dos reservatórios. Esses autores também reconhecem a importância das formações florestais, apontando que, nessas formações, a água da chuva alcança a superfície do solo com força e velocidade relativamente menores quando comparado com as formações savânicas, uma vez que, nas formações florestais, a área foliar é maior e amortece com maior eficácia as gotas de chuva. Destaca-se que, apesar de as raízes profundas apontarem para a busca por água, a cobertura do solo com folhas lhe garante maior umidade superficial e, por consequência, menor sucção, contribuindo para a menor erodibilidade, gerada pela eventual pressão positiva na fase ar, que surge quando da infiltração da água da chuva no solo.

3.2 A influência da cobertura antropizada

A concentração de atividades agrícolas próximas a áreas de reservatórios artificiais, aliada à ocorrência de intensas precipitações, pode causar problemas de perda de solo pelo escoamento superficial e lançar cargas de sedimentos nos corpos de água, resultando na intensificação de processos de assoreamentos em barragens. Esse processo diminui a vida útil dos reservatórios e pode afetar, também, a qualidade da água e impactar a disponibilidade hídrica (May et al., 2013). Para Santos e Martins (2016), a principal consequência que pode ser mensurada sobre os ecossistemas aquáticos é o assoreamento do reservatório, provocado pela erosão proveniente da falta de vegetação ripária ao longo dos cursos d'água. Além disso, esses autores destacam que a falta de cobertura vegetal facilita, ainda, o escoamento de compostos orgânicos para o ambiente aquático, provocando a eutrofização, afetando a qualidade da água e comprometendo a diversidade biológica. Destaca-se que a qualidade da água pode ainda impactar na estabilidade estrutural dos solos que compõem a base sob a lâmina d'água das encostas expostas.

A cobertura antropizada no entorno dos reservatórios de Batalha, Itumbiara e Furnas envolve atividades agrícolas, em que a supressão da vegetação natural dá lugar a cultivos diversos (soja, café, milho e outros) (Figura 9); à pecuária, que substitui a vegetação natural por pastagens (Figura 10); a obras lineares referentes a estradas e rodovias (Figura 11), ferrovias, linhas de transmissão, áreas urbanas e áreas de recreação relacionadas a casas de campo nas proximidades dos reservatórios.

A implementação de alguns desses tipos de uso do solo pode implicar o descobrimento do solo em escalas de tempo distintas. Nos cultivos agrícolas intermitentes, como de soja e milho, por exemplo, o solo fica descoberto no período pós-colheita e pré-plantio. Já em plantios perenes, como no caso do cafezal, ainda que sem a remoção sistemática da vegetação, o dossel desse plantio não é total, deixando permanentemente parte da superfície exposta. As próprias pastagens que, bem manejadas, podem oferecer uma boa cobertura para o solo em comparação com as intervenções agrícolas, quando degradadas, além da exposição do solo, ainda potencializam sua compactação. No caso da implementação de obras lineares, invariavelmente, elas implicam abertura de clareiras, para implementação da obra e sua respectiva faixa de domínio, bem como exposição do solo para exploração de jazidas

importantes destinadas ao abastecimento da obra, por exemplo, as cascalheiras, conhecidas na construção civil como “caixas de empréstimo”. Nas áreas urbanas, a implementação dos loteamentos e as variadas obras de construção inerentes à dinâmica urbana também resultam na exposição do solo, que é potencializada pela falta de planejamento acerca da ocupação e uso do solo.



Figura 9. Agricultura no entorno dos reservatórios: (a) Plantação de milho na bacia do reservatório de Furnas (Fonte: Diego T. F. Nascimento, 2014); (b) Plantação de café na bacia do reservatório de Itumbiara. (Fonte: Diego T. F. Nascimento, 2015).



Figura 10. Pastagem no entorno dos reservatórios (Fonte: Diego T. F. Nascimento, 2015): (a) Pastagem no entorno do reservatório de Furnas; (b) Pastagem e Eucalipto no entorno do reservatório de Furnas .



Figura 11. Processos erosivos no entorno dos reservatórios: (a) Lançamento de água captada em estrada marginal ao reservatório de Furnas sem dispositivos de dissipação de energia (Fonte: Diego T. F. Nascimento, 2015); (b) Incisão erosiva desenvolvida pelo lançamento de água captada em estrada marginal ao reservatório de Furnas (Fonte: Diego T. F. Nascimento, 2015).

Embora nos mapas apresentados neste texto não tenha sido cartografado o solo exposto, é certo que, no entorno dos reservatórios abordados, existe solo exposto associado à dinâmica de antropização da cobertura, relacionada aos diversos tipos de uso do solo explanados. Essa exposição do solo, independentemente do tipo de uso ao qual está relacionado, pode implicar perdas de solo por processo erosivo, uma vez que a erosão hídrica pluvial se inicia, segundo Lepsch, (2002), com o impacto direto das gotas de chuva sobre o solo desnudo.

Os solos descobertos também recebem uma incidência direta maior de raios solares, colaborando para elevação de sua temperatura. A temperatura também pode influenciar muito na erodibilidade dos solos, até porque a viscosidade da água intersticial e, por consequência, sua circulação são influenciadas pela temperatura. Além disso, o vento é um importante agente de transporte em processos erosivos em terras emersas; todavia, este tipo de erosão tem sido um pouco menos estudado, mas, dependendo do tipo de solo e de sua exposição, seus efeitos podem ser bem graves. Em solos preparados para o cultivo, revolvidos e expostos, a ação da erosão eólica é muito grande. O vento impacta ainda na interação solo-atmosfera, intervindo diretamente na sucção atuante no maciço e, portanto, na erodibilidade do solo.

Obviamente, outros fatores além da cobertura do solo, tais como os geomorfológicos abordados no item 2 deste capítulo, somar-se-ão a um conjunto de fatores que determinarão o quanto uma área é mais ou menos suscetível à ocorrência de processos erosivos. No caso do reservatório de Itumbiara, a cobertura do solo pode trazer respostas quanto aos variados processos erosivos lineares cartografados em áreas de baixa suscetibilidade natural, ao considerar os parâmetros do meio físico.

Além do tipo de cobertura, também são muito importantes as práticas conservacionistas adotadas no uso do solo, envolvendo aspectos edáficos, mecânicos e vegetativos (LEPSCH, 2002). Florêncio et al. (2009) apontam para o fato de a irrigação dos cultivos agrícolas na bacia do rio São Marcos desconsiderar as determinações da Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei Federal nº 9.433/97, quanto ao conhecimento detalhado do solo e das condições climáticas locais. Segundo Ayoade (1996), o crescimento das plantas é afetado tanto pela temperatura do ar como do solo. Dependendo do período climático, a umidade atmosférica interfere diretamente no gradiente de umidade do solo. A formação de lagos artificiais, tais como os reservatórios abordados neste capítulo, certamente contribui para a alteração da umidade atmosférica local, que, por sua vez, irá interagir com o solo local. Obviamente, também se deve levar em consideração a elevação do nível freático, mas aí influenciando a base do perfil de solo. No caso da umidade atmosférica, a influência no solo ocorre, em um primeiro momento, nas camadas mais superficiais nas quais ocorre o desenvolvimento vegetal, mas, com a necessidade de equilíbrio de energia ao longo do perfil, passa a ocorrer o fluxo de umidade.

Segundo Florêncio et al. (2009), a agricultura irrigada na bacia do rio São Marcos, onde está o reservatório de Batalha, apesar de representar apenas 0,87% da bacia, é realizada predominantemente no período seco, de forma intensiva e sem critérios, culminando com o déficit hídrico regional e com diminuição da vazão dos rios. De acordo com Guimarães et al. (2013), a área irrigada por pivôs centrais na bacia do Rio São Marcos, em março de 2013, foi de 87.670 hectares, superior aos 63.500 hectares determinados pelo marco regulatório da Agência Na-

cional de Águas. Práticas de irrigação sem estudos detalhados do solo podem resultar em impactos ao clima, aos recursos hídricos e ao solo. A compactação das camadas superficiais é um dos vários impactos ao solo, o que pode favorecer o desenvolvimento de processos erosivos ao ampliar o fluxo superficial.

Na bacia do rio Paranaíba, onde estão os reservatórios de Itumbiara, Rosa e Sano (2014), cartografaram e quantificaram os diferentes usos da bacia, constatando que a pastagem cultivada é o uso predominante, ocupando uma área de 41,1 % da bacia, seguida pela cobertura vegetal natural, com 29,4% da área e pela agricultura, com 27,2%. Em relação à agricultura, chamou a atenção dos autores a cultura da cana-de-açúcar, que em 2010 ocupava uma área de 3,4 % da bacia. Com percentuais menores, têm-se as áreas urbanas e os corpos d'água, que ocupam, respectivamente, 1,2 % e 1,1 % da área da bacia.

De acordo com IPT (2008), as classes de uso e ocupação do solo mais expressivas na bacia do rio Grande, onde está o reservatório de Furnas, são pastagem/campo antrópico, com 56,20% da área da bacia, e área agrícola, com 36,10%. A ANA (Agencia Nacional de Águas) (2015) afirma que, segundo dados da CONAB, o uso agrícola na bacia do rio Grande totalizou 4,8 milhões de hectares plantados em 2012. Cerca de 95% da área plantada era dedicada aos seguintes cultivos: feijão (2,4%), laranja (5,6%), soja (7,4%), café (12,9%), milho (13,1%) e cana-de-açúcar (53,7%).

A predominância de pastagens nas bacias do reservatório de Itumbiara e Furnas remetem a preocupações referentes ao manejo dessas pastagens. Em caso de superpastoreio, consequências como a compactação dos solos e degradação da pastagem são esperadas, resultando na exposição dos solos e conjugando com o aumento do fluxo superficial, ampliando a suscetibilidade à erosão. Esse aumento tende a ser tanto maior quanto maiores forem os condicionantes naturais à erosão, tais como os relacionados à morfologia e à declividade do terreno. A falta de equipamentos de dessedentação do rebanho em locais apropriados pode levar ao deslocamento do gado até a borda dos recursos hídricos, gerando trilhas provenientes do pisoteio animal que costumam condicionar a direção dos fluxos d'água, induzindo ao surgimento de processos erosivos lineares. Nas baixas vertentes próximas aos reservatórios, o nível d'água mais próximo à superfície do terreno colabora para, no caso do aprofundamento das incisões erosivas, deflagrar o surgimento de voçorocas.

4 Aspectos climáticos

A atmosfera compreende todos os elementos climáticos, como a temperatura, a precipitação, a umidade, a pressão, a radiação etc., além dos processos e dos mecanismos que nela operam. Esse conjunto de elementos pode ser sintetizado como aspectos climáticos, que influenciam as atividades humanas, o desenvolvimento da vegetação, a distribuição e ciclo da água, a formação dos solos e a evolução do relevo e, de forma paralela, são também influenciados por tais componentes. Em reservatórios de usinas hidrelétricas, maior atenção pode ser destinada ao que diz respeito à configuração do relevo e à influência da cobertura do solo, especialmente com relação à presença da massa de água do reservatório e da cobertura vegetal em seu entorno.

4.1 Interação entre os aspectos climáticos e a geomorfologia

A maior influência do clima na geomorfologia é referente à evolução das formas do relevo, isto é, à morfogênese. Enquanto uma série de agentes atua no interior da Terra, de modo a promover as estruturas do relevo, outros agentes externos “esculpem” a superfície terrestre e são responsáveis pela gênese e dinâmica das formas do relevo.

Os principais processos externos são o intemperismo e a erosão. O intemperismo, também denominado como meteorização, é decorrente das alterações químicas (decomposição) e físicas (desagregação) das rochas, sendo que a primeira ocorre principalmente em virtude das precipitações e qualidade da água precipitada e que se infiltra no maciço e da temperatura do ar, ao passo que a segunda sofre influência da temperatura, da umidade e dos ventos. Maior disponibilidade de água e maiores valores de temperatura refletem em maior atuação e velocidade das reações químicas, ao passo que maiores oscilações de temperatura e de umidade resultam numa mais intensa dilatação e contração das rochas. No que tange à temperatura do ar, faz-se necessária uma conjugação com a temperatura do maciço.

Por sua vez, a erosão representa o transporte das partículas de rocha que foram decompostas ou desagregadas pelo intemperismo. A precipitação e os ventos são os principais responsáveis pelos processos erosivos, podendo ser divididos em erosões de origem hídrica e eólica. A primeira se refere ao papel do impacto da água das chuvas e do consequente escoamento superficial perante o transporte das partículas de solo, podendo ocorrer de forma difusa (erosão laminar) ou concentrada (erosão linear), enquanto a segunda se traduz no impacto e na capacidade do vento em transportar as partículas de rocha, além de sua atuação direta no estado hídrico do maciço.

Em reservatórios de usinas hidrelétricas, além de promoverem a desagregação das rochas, os ventos também podem aumentar a ocorrência de ondas, contribuindo para erosões e movimentos de massas no talude das margens, que podem evoluir de forma recuante. No



Figura 12. Extensão de segmentos do reservatório de Furnas em que os ventos promovem ondas. Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

caso da usina de Furnas, a área do reservatório é de 1.440 km² e, em alguns trechos, chega a apresentar segmentos de cerca de 15 km para a geração de ondas, de acordo com a direção dos ventos.

No cenário inverso, a geomorfologia é capaz de influenciar os aspectos climáticos em vários segmentos. A mais conhecida influência é a da variação da altitude do relevo na temperatura do ar, em que esta será menor quanto maior a altitude e menor a pressão atmosférica. Isso ocorre porque a força da gravidade mantém a maior parte do ar próxima à superfície, sendo assim, quanto maior a altitude menor será a pressão atmosférica. Considerando que uma menor pressão reflete em partículas mais afastadas entre si, tenderá a perder mais facilmente o calor. Portanto, é possível afirmar que a pressão e a temperatura possuem relação diretamente proporcional, com variação média na ordem de 0,5°C a cada 100m de altitude.

A altitude também é capaz de influenciar a ocorrência de chuvas, essencialmente na ocasião de uma barreira topográfica forçar a ascensão do ar. O ar que se eleva na face barlavento da barreira topográfica sofre expansão adiabática e condensa; havendo disponibilidade de umidade, há então a formação de chuvas do tipo orográficas. Apesar de serem de longa duração e baixa intensidade, tais chuvas podem favorecer as erosões de origem hídrica, decorrentes do impacto das gotas da água ou pelo fluxo de escoamento superficial.

A orientação das vertentes também é capaz de influenciar as condições de insolação, que se refere ao número de horas de brilho solar que determinada localidade possui durante o dia e, conseqüentemente, de temperatura do ar. Isso ocorre em virtude da disposição das vertentes ao ângulo de incidência dos raios solares, em que as vertentes orientadas a leste (nascente) e a oeste (poente) repercutem maior tempo e maior ganho de radiação solar em comparação às vertentes dispostas a norte ou ao sul, sendo que a maior intensidade térmica se dá nas vertentes voltadas para os quadrantes oeste e norte. Além disso, quanto maior a latitude, mais esse efeito é pronunciado (LUIZ, 2012).

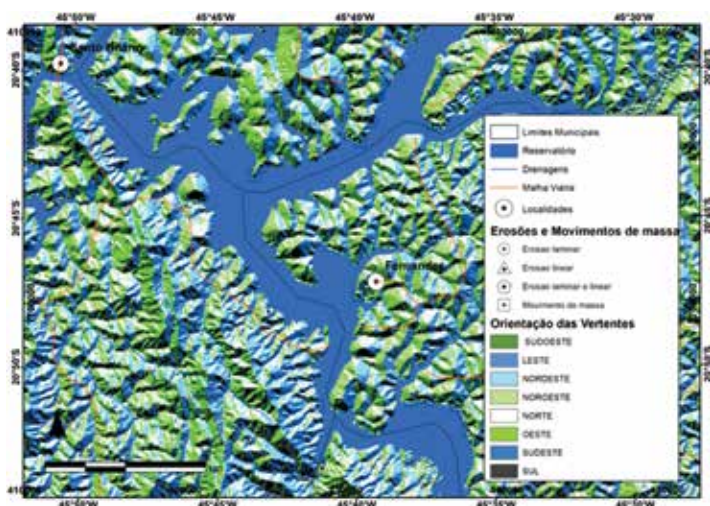


Figura 13. Orientação das vertentes e processos erosivos e movimentos de massa associados no reservatório de Furnas. Fonte: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Elaboração: Diego T. F. Nascimento.

4.2 Interação entre os aspectos climáticos e a cobertura do solo

Os aspectos climáticos têm influência direta (e tantas outras indiretas) na organização e na produção dos espaços e das atividades humanas, com repercussões diversas na agricultura, na pecuária, na indústria, no turismo etc. (AYOADE, 1996). Isso decorre da relação de dependência que tais atividades possuem com os aspectos climáticos, principalmente, referente à variabilidade espaço-temporal das condições térmicas e pluviométricas. A título de exemplo, o planejamento da produção agrícola precisa considerar o período de estiagem, da mesma forma que a definição do período de visitação de algumas localidades turísticas tende a priorizar o período do ano sem valores extremos de temperatura e/ou umidade ou ocorrência de eventos pluviométricos extremos.

De forma inversa, as atividades humanas são também capazes de influenciar os aspectos climáticos, mesmo em escala global. Contudo, no caso de reservatórios de usinas hidrelétricas, é na escala local a mais importante influência das atividades humanas nos aspectos climáticos, essencialmente no que tange às mudanças no uso e na cobertura da terra.

As coberturas antropizadas, tais como áreas urbanas, agricultura e pecuária favorecem uma maior absorção do fluxo de radiação solar em comparação a coberturas vegetais ou hídras. Luiz (2012), ao estudar os efeitos da urbanização no clima para a cidade de Goiânia, Estado de Goiás, verificou que o crescimento da temperatura e do nível de precipitação se encontrava associado ao crescimento da cidade.

Nas áreas urbanas, dependendo do tipo de cobertura e dos materiais que as compõem, como o asfalto, o concreto e a alvenaria, há maior absorção do fluxo de radiação solar em comparação com as zonas periféricas ou rurais, onde não ocorre uma ocupação tão intensa do solo.

Em áreas preparadas para o cultivo agrícola, os solos revolvidos ficam expostos à ação do vento (erosão eólica), bem como ao impacto da água das chuvas (erosão hídrica). O mesmo ocorre em áreas de pastagem, sobretudo em períodos de estiagem, que, associada à baixa umidade relativa do ar, ocorre baixo ou nenhum desenvolvimento de gramíneas, e os solos tendem a ficar mais suscetíveis à deflagração de processos erosivos.

Por sua vez, a presença de cobertura vegetal e de corpos hídricos apresenta grande influência nos aspectos climáticos. Isso porque a energia que provém da radiação solar é dividida entre calor latente e calor sensível, sendo o primeiro utilizado nas transformações físicas (principalmente na evapotranspiração) e o segundo empregado no aquecimento do ar. Quando há uma menor proporção da cobertura vegetal e de superfícies hídricas, uma menor quantidade de energia (calor latente) é gasta na evapotranspiração, resultando em uma maior quantidade de energia (calor sensível) para aquecer a temperatura do ar (VOOGT e OKE, 1997).

Uma maior temperatura do ar tende a elevar o gradiente de temperatura superficial terrestre, influenciando a viscosidade da água intersticial e a sucção/capilaridade atuante no solo e, por consequência, sua circulação nas camadas superficiais e subsuperficiais – repercutindo numa menor ou maior resistência do solo à desagregação. Contudo, vale destacar a necessidade de análises mais detalhadas desse processo, que depende, por exemplo, do grau de saturação do solo e da forma como ocorre o fluxo superficial e subsuperficial.

Além disso, os reservatórios de água das usinas hidrelétricas fornecem maior umidade para a atmosfera, o que decorre do processo de evaporação. A umidade atmosférica tende a elevar o gradiente de umidade do solo, fundamentalmente nas camadas mais superficiais. Nesse contexto, os ventos ainda tendem a promover o deslocamento da umidade para as localidades próximas aos reservatórios, atenuando a temperatura do ar.

Contudo, o aspecto climático que apresenta maior influência na cobertura e uso do solo é a precipitação, especificamente com relação a sua influência na variação do nível de água dos reservatórios de usinas hidrelétricas.

As chuvas apresentam grande variabilidade (temporal), havendo alternância de anos chuvosos e secos entre aqueles habituais. A menor ou maior quantidade de água precipitada tende a alterar o ciclo hidrológico local, ocasionando menor ou maior direcionamento da água para o reservatório, via escoamento ou infiltração.

A variação do nível do reservatório, verificada entre os anos de maior ou menor precipitação, ocasiona a instabilidade dos taludes, principalmente em virtude da oscilação da pressão hidráulica, repercutindo numa maior suscetibilidade à deflagração de processos erosivos e/ou movimentos de massa.

5 Considerações finais

A investigação sobre o surgimento e a continuidade dos processos erosivos requer uma visão multidisciplinar que considere a abordagem integrada dos condicionantes da erosão. Sob essa perspectiva, o capítulo considerou a influência dos elementos da geomorfologia, da cobertura do solo e climáticos, os quais, em conjunto com outros fatores, resultam na erosão no entorno de reservatórios. De modo particular, foram consideradas informações empíricas acerca dos reservatórios de Batalha, Furnas e Itumbiara.

Estudos mais aprofundados e específicos sobre a geomorfologia devem ser realizados, a fim de subsidiar a compreensão das transformações associadas à implementação de reservatórios e propor soluções que reduzam a alteração no equilíbrio do sistema natural, advinda dessa intervenção antrópica para os casos dos reservatórios de Batalha, Furnas e Itumbiara, assim como tantos outros pelo Brasil.

O entorno dos reservatórios em questão possui um baixo grau de preservação da vegetação natural. A esse respeito, destaca-se a necessidade de que sejam adotadas políticas públicas voltadas à conservação dos remanescentes de vegetação e à implementação efetiva das áreas de preservação permanente previstas em lei, além de garantir a conservação das áreas de vegetação natural sem impacto antrópico. Nesse processo, é fundamental a conscientização da sociedade acerca da importância da preservação ambiental para a melhoria da qualidade de vida.

Referências

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Bacia hidrográfica do Rio Grande, diagnóstico preliminar - qualidade de água**. Brasília: ANA, 2015, 53p.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1996, 332 p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1999.
- BOTELHO, R. G. M.; DA SILVA, A. S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.
- BRANDT, S. A. Classification of Geomorphological effects downstream of dams. **Catena**, v. 40, Issue 4, 2000, p. 375-401.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008, 602 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgar Blucher, 1980, 200 p.
- _____. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgar Blucher, 1981.
- COELHO NETO, A. L.. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia-MG v. 9, n. 26, p. 16 – 32, jun. 2008.
- COELHO NETO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Orgs.) **Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p. 93-148.
- COUTINHO, L. M.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; XAVIER, A. C.; ZANETTI, S. S. & MOREIRA, M. C. (2014). Cálculo do fator LS da equação universal de perdas de solos (EUPS) para a bacia do Rio da Prata, Castelo (ES). **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 8, n. 1, p. 01-09, janeiro-abril, 2014 - Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Roraima, Boa Vista - RR.
- CUNHA, S. B. da Geomorfologia fluvial. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B.da (Orgs.) **Geomorfologia, uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p. 211-252.
- FLORÊNCIO, B. A. B.; MALVINO, E. S.; PIMENTEL, M. R. S.; SOUSA, P. C. & ASSUNCAO, W. L. (2009). Uso da água na bacia hidrográfica do Rio São Marcos - Goiás/Brasil. In: **12º ENCUENTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA**, Montevideo, Uruguai.
- GUIMARAES, D. P.; LANDAU, E. C.; REIS, R. J. Caracterização da bacia hidrográfica do Rio São Marcos. In: **XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Bento Gonçalves/RS, 2013.
- INÁCIO, E. S. B.; CANTALICE, J. R. B.; NACIF, P. G. S.; ARAUJO, Q. R. & BARRETO, A. C. (2007). Quantificação da erosão em pastagem com diferentes declives na microbacia do Ri-

beirão Salomea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v. 11, n. 4, 2007, p. 355-360.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de unidades de relevo do Brasil**. Brasília, 2006. Disponível em <mapas.ibge.gov.br/>. Acesso em 20 jul. 2016.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Diagnóstico da situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) – SP/MG (Relatório Síntese – R3). **Relatório Técnico Nº 96.581-205**. São Paulo, 2008.

JESUS, A. S. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares**: estudo de caso da cidade de Anápolis (GO). 2013. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

JESUS, A. S.; OLIVEIRA, M. C.; LIMA, C. V.; CARVAJAL, H. E. M.; MOSALVE, G.; LONDOÑO, R. D. & CARVALHO J. C. (2015). Influência de aspectos geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos e da cobertura vegetal no estado de saturação do solo. In: CARVALHO J. C. et al. (Orgs.) **Solos não saturados no contexto geotécnico**. ABMS, São Paulo, 2015, 759p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2002, 178p.

LUIZ, G. C. **Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados**: estudo de caso Município de Goiânia. 2012. 246 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MACHADO, R. A. S.; LOBÃO, J. S. B.; VALE, R. M. C. & SOUZA, A. P. M. J. (2011). Análise morfométrica de bacias hidrográficas como suporte a definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental a partir do uso de geotecnologias. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. **Anais...** SBSR, Curitiba, 2011.

MAY, G. C.; ROSA, K. K. & SANCHES, F. O. **Análise meteorológica e relação com o padrão sedimentar e mudanças no uso e cobertura do solo no entorno do reservatório da usina hidrelétrica do Rio Passo Fundo, RS**. Seminário de Ensino, Pesquisa e Extensão, 3 – UFFS, Chapecó, 2013.

MATAMOROS SEVILHA, T. M. **Estudo de processos erosivos**: análise geotécnica de áreas degradadas no entorno do reservatório de Batalha, GO/MG. 2016. 151 p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MOREIRA, C. V. R.; PIRES NETO, A. G. Clima e relevo. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998, 589 p.

NOVO, E. M. L. M. Ambientes fluviais. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de textos, 2008, p. 219-246.

PIRES, F. R. M. Arcabouço geológico. In: CUNHA, S. B. & GUERRA, A. J. T. (Orgs.) **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012, p. 17-69.

RIBEIRO, J. F. & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M. & ALMEIDA, S. P. (Org.). **Cerrado: ambiente, fauna e flora**. Planaltina: EMBRAPA, 1998.

ROSA, R. & SANO, E. E. Uso da terra e cobertura vegetal na bacia do Rio Paranaíba. Campo-Território: **Revista de geografia agrária**, v. 9, n. 19, 2014, p. 32-56.

RUBIO, M. F. **Gênese e dinâmica de erosões em margens de reservatórios, pesquisa e desenvolvimento no estudo de caso nas UHEs Chavantes e Rosana (Rio Paranapanema, SP/PR)**. 2014. Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SALOMÃO, F. X.; CANIL, K.; RODRIGUES, S. P. Exemplo de aplicação da geologia de engenharia no controle preventivo e corretivo dos processos erosivos. **Revista brasileira de geologia de engenharia e ambiental**. v. 2, n. 2, 2012.

SANTOS, L.P.; MARTINS, P. T. A. Mudanças temporais no uso e cobertura do solo na bacia do reservatório de Peixe Angical, Tocantins. **Ciência e Natura**, Santa Maria v.38 n.1, Jan.-Abr.2016, p. 137 – 145.

SILVA, M. R.; MASCARENHA, M. M. A.; JESUS, A. S. Erodibilidade de solos tropicais não saturados em Silvânia-GO. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, **ABMS**. Brasília-DF, 2015.

SILVA, R. L.; MARIA, I. D. Erosão em sistema de plantio direto: influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. Campina Grande v. 15, n. 6, 2011, p.554-561.

SOUZA, D. A.; RODRIGUES, S. C. Aspectos morfoestruturais e morfoesculturais da Serra da Canastra e entorno (MG). **Revista do departamento de geografia – USP**, São Paulo, v. 27, 2014, p. 47-66.

VOOGT, J. A. & OKE, T. R. Complete urban surface temperatures. **Journal of applied meteorology**. v. 36, 1997, p. 1117-1132.

CAPÍTULO 9

Impactos na vegetação em área de implantação de reservatório no bioma cerrado

Maria Cristina de Oliveira
José Felipe Ribeiro

Palavras-chave: Reservatório. Dinâmica da vegetação. Impacto na flora. Restauração da vegetação.

1 Introdução

Estudo recente revelou que já foram alterados pelo menos 46% dos quase 2 milhões de quilômetros quadrados de áreas naturais do bioma Cerrado, com a maior responsabilidade do uso antrópico por pastagem plantada (29,5%), seguida pela agricultura anual (8,5%) e perene (3,1%) (BRASIL, 2015). Outras classes de uso antrópico, como aquelas relacionadas à urbanização, industrialização e construção de grandes reservatórios artificiais para a geração hidrelétrica, além de outras, também têm impactado os ecossistemas naturais desse bioma, levando a aumento crescente de áreas degradadas.

Reservatórios artificiais são considerados acumulações não naturais de água, dedicadas a qualquer de seus múltiplos usos (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002), obtidas por meio de construções de barragens em rios, que permitem a acumulação dos volumes de águas afluentes e a elevação dos níveis de água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2007). A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (FERNANDES *et al.*, 2016) mostra que o bioma Cerrado apresentava, até o ano de 2015, 174 grandes usinas hidrelétricas (UHEs) e 836 centrais de pequeno porte (PCHs). Desse total, 49 UHEs e 130 PCHs já se encontravam em operação. Esses autores destacam ainda que 12 mil megawatts ainda podem ser gerados no bioma, que inclusive podem afetar ainda mais as Unidades de Conservação já estabelecidas.

Diante desses fatos, independentemente da finalidade da barragem, é importante ressaltar que muito pouco é conhecido sobre os efeitos, ao longo do tempo, do alagamento de reservatórios nos ecossistemas submersos e também nos vizinhos. Sabe-se que as ações realizadas pelas construtoras de grandes barragens se limitam essencialmente à realização do relatório de impacto ambiental, em que são feitos levantamentos sobre a flora e animais, sítios arqueológicos, solos e geologia presentes na área a ser inundada.

Os estudos científicos do impacto ambiental provocado pela construção de barragens são mais abundantes em regiões temperadas, as quais possuem menor diversidade biológica que a região dos trópicos (BRANQUINHO; BRITO, 2016). Isto é um contrassenso, já que

espécies em regiões tropicais são possivelmente mais vulneráveis a grandes construções de reservatórios que espécies do clima temperado (FEARNSIDE, 2001), principalmente se consideramos sua maior biodiversidade e o grande número de espécies ainda não descritas, todas associadas à presença de padrões ecológicos expressivamente complexos (PELICICE *et al.*, 2014).

Reservatórios alteram significativamente os ambientes físicos, químicos e biológicos da região envolvida (GROVE; HARBOR; ENGEL, 1998). De maneira geral, Fearnside (2001) aponta dois problemas graves para os ecossistemas decorrentes da implantação desses reservatórios: mudança de espécies devido à redução na vazão de água a jusante devido à retenção das águas do rio, e alagamento, a montante, submergindo diversos elementos da paisagem anterior. Sendo assim, a construção de reservatórios determina um dos mais dramáticos impactos antropogênicos sobre a flora e fauna terrestres e aquáticas locais, os recursos hídricos e edáficos, além de possíveis danos praticamente irreparáveis ao meio social outrora ali estabelecido.

Dessa maneira, a implantação de reservatórios isola áreas antes conectadas pela continuidade terrestre, transformando o ambiente em um mosaico de *habitats* fragmentados (LOPES *et al.*, 2014). Esses autores postulam que essa descontinuidade pode modificar a biodiversidade local e afetar os processos de manutenção de fauna e flora determinados por mudanças na dispersão e capacidade de migração das espécies. Para a flora que se estabelece nas margens da nova condição imposta pela barragem, são esperadas modificações, principalmente devido à completa mudança na disponibilidade hídrica do solo (VALE *et al.*, 2013), pois sabe-se que mesmo pequenas mudanças na disponibilidade de água afetam localmente o estabelecimento e a sobrevivência de espécies vegetais (NILSSON, 1996; STROMBERG, 2001) e têm efeitos observados por toda a comunidade (LOREAU *et al.*, 2001).

Adicionalmente, o impacto negativo sobre a fauna adaptada a determinadas flutuações do nível e da correnteza já foi registrado. O rio de águas rápidas transforma-se em um sistema de águas mais lentas ou mesmo paradas, causando expressivas alterações na fauna aquática, como substituição e extinção de espécies. Junk e Mello (1990) citam que mudanças hidrológicas e florísticas dentro das áreas alagáveis têm impactos grandiosos para as redes alimentícias, tanto no rio quanto nas áreas de terra adjacentes, e podem resultar em modificações grandes na biocenose. Fernandes *et al.* (2016) destacam não serem conhecidos os efeitos, em longo prazo, da transferência de animais para ilhas de vegetação criadas com o enchimento de reservatórios, e menos ainda sobre o impacto causado nas espécies e nos *habitats* presentes onde esses animais são reintroduzidos. Entretanto, esses autores reforçam que essa abordagem é geralmente realizada apenas para organismos de grande porte, não havendo preocupação com o funcionamento do ecossistema como um todo.

Outra consequência da construção desses reservatórios acontece no aspecto dos impactos abióticos. Para Camapum de Carvalho *et al.* (2016), erosões na borda dos reservatórios podem estar associadas ao uso do solo, ao impacto das ondas naturais, ao movimento de embarcações ou mesmo à perda de resistência do solo ao entrar em contato com a água do reservatório. Todos esses fatores podem atuar em conjunto ou de modo isolado. No entanto, esses autores alertam que, com estudos e planejamento apropriados, essas erosões podem ser evitadas ou mitigadas. No entanto, se acontecerem, essas áreas devem ser imediatamente restauradas para evitar a elevação do custo ambiental e econômico.

Por fim, estudos dedicados a caracterizar as perdas sofridas pela população atingida pelas barragens também são muito poucos. Sabe-se que os impactos não se limitam à área onde o projeto se desenvolve. Eles podem se desdobrar por centenas de quilômetros para além do confinamento dos canais dos rios, e consequentemente, em adição à população diretamente atingida, também são afetadas aquelas que vivem a montante e a jusante da barragem, além daquelas que, de alguma maneira, utilizam os recursos outrora presentes, tais como rios, florestas, pastos e estradas, arrasados pelo projeto de implantação (VIANA, 2003).

A preocupação ambiental com o impacto presente e futuro da implantação de reservatórios artificiais sobre os ambientes e a biodiversidade é bastante recente. Dessa maneira, se por um lado reservatórios artificiais são importantes como fontes de energia hidrelétrica ou mesmo lazer, por outro, a maioria deles está sendo estabelecido sem um conhecimento claro dos impactos ambientais decorrentes da sua implantação.

2 As fisionomias do bioma cerrado e seus condicionantes naturais

Localizado no Planalto Central do Brasil, o bioma Cerrado, segundo maior bioma do país em área, comporta onze tipos fisionômicos de vegetação que se distribuem em: formações florestais – Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão; formações savânicas – Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda; e formações campestres – Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008). As formações florestais representam locais com predominância de espécies arbóreas, com formação de dossel contínuo ou descontínuo; as formações savânicas referem-se a locais com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato gramíneo, sem a formação de dossel contínuo. Já as formações campestres designam locais com predomínio de espécies herbáceas e algumas arbustivas, faltando árvores na paisagem.

Essa diversidade de paisagens determina a grande riqueza florística desse bioma, o que faz que a sua flora seja a mais rica entre as savanas do mundo. Dados apontam para a ocorrência de quase 12 mil espécies vegetais (MENDONÇA *et al.*, 2008), diversas endêmicas do Cerrado e centenas com utilidade real e potencial para diversos fins.

No que diz respeito à diversidade fisionômica do bioma Cerrado, esta está intimamente ligada à variação do solo e suas características (natureza do material de origem, profundidade, composição química e tipo de drenagem), além de outros fatores, como o relevo e microclima (RIBEIRO; WALTER, 2008). Esses autores indicam a importância da maior nutrição do solo (solos eutróficos) e da proximidade da linha de drenagem na origem das formações florestais úmidas das Matas de Galeria e Ciliar e dos solos mesotróficos e interflúvios na formação florestal do Cerradão e dos solos com afloramentos calcários nas Matas Secas. Para as formações savânicas, Ribeiro e Walter (2008) adicionam que os solos profundos, distróficos e bem drenados possibilitam o Cerrado Denso, o Típico ou mesmo o Ralo, os solos relativamente profundos, mesotróficos e mal drenados dos Palmeirais e das Veredas ou dos Parques de Cerrado e dos solos rasos e distróficos dos Cerrados Rupestres. Nas formações campestres, esses autores destacam o papel dos solos rasos ou profundos, distróficos e bem drenados dos Campos Sujos, Limpos ou Rupestres ou mesmo dos solos rasos ou profundos, distróficos e mal drenados nos Campos Limpos úmidos ou mesmo com murundus. Esses aspectos revelam a

grande sensibilidade das comunidades vegetais ou das espécies às condições ambientais naturais, especialmente o *status* de nutrientes minerais do solo, bem como seu regime de umidade.

De fato, a construção de reservatórios pode romper ou alterar os fatores abióticos e bióticos locais que permitem uma fisionomia permanecer em equilíbrio. Assim, várias consequências poderão ser observadas ao longo do tempo e que certamente irão impactar a vegetação nativa previamente estabelecida e a recém-formada.

3 Impactos na vegetação nativa advindos da implantação de reservatórios

No bioma Cerrado, as áreas destinadas à implementação de reservatórios são, em grande parte, áreas de grande produção de biomassa e de alta biodiversidade. As áreas ripárias, conhecidas pelos vários serviços ecossistêmicos que prestam, são as fisionomias mais sujeitas à supressão e demais perturbações decorrentes dessa ação em função da sua posição topográfica e sua associação com linhas de drenagem. Assim, a implementação de reservatórios transforma fisionomias vegetais que não eram ripárias, outrora em posições mais altas na topografia, em fisionomias artificialmente ripárias, com condições de umidade do solo bruscamente alteradas (Figura 1). Nilsson (1996) pontua que mesmo pequenas alterações no nível do regime de água levam a mudanças na estrutura da vegetação.



Figura 1. Reservatório Serra da Mesa no município de Uruaçu, Goiás, destacando a eliminação da vegetação ripária original que foi inundada e as áreas de campo originalmente secas remanescentes, agora sob a influência da água.

Foto: José Camapum de Carvalho.

Apesar desse conhecimento, ainda são muito poucos os estudos realizados na região tropical, em especial no Brasil, sobre os impactos ambientais da construção de reservatórios. A grande maioria desses estudos se concentra em caracterizações pontuais das comunidades vegetais afetadas, e poucos na avaliação temporal das comunidades envolvidas. No entanto,

segundo Branquinho e Brito (2016) e Lopes *et al.* (2014), os esforços para compreender os impactos negativos de represas sobre a flora e inclusive a fauna têm-se intensificado nos últimos anos.

No bioma Cerrado chamam a atenção os estudos de Gusson *et al.* (2011), Gusson *et al.* (2012), Lopes *et al.* (2014), Lopes *et al.* (2015), Vale *et al.* (2013), Vale *et al.* (2014), Vale *et al.* (2015a) e Vale *et al.* (2015b), realizados na bacia do Rio Araguari em Minas Gerais, sobre o impacto de reservatórios artificiais na flora e nas fisionomias, e alguns deles apresentaram a avaliação temporal desses impactos. Destacam-se aqui os impactos em três fitofisionomias bastante importantes na região do bioma Cerrado: as Matas Secas, também chamadas de Florestas Estacionais; as Matas de Galeria e Ciliares; e, ainda, as Veredas, as quais serão analisadas na sequência.

Sobre as Matas Secas, Gusson *et al.* (2012) observaram os efeitos da inundação de reservatório nas principais populações regenerativas de plantas em Florestas Estacionais Deciduais localizadas às margens dos reservatórios da UHE Amador Aguiar I, em Minas Gerais. Para isso, esses autores realizaram amostragens das populações vegetais antes e após o momento da inundação. Resultados desse trabalho apontam que, após a inundação do reservatório, o aumento do teor de umidade apresentou consequências negativas para a estrutura populacional de algumas espécies lenhosas da comunidade dos regenerantes. Por exemplo, Gusson *et al.* (2011) estudaram em particular a regeneração de duas espécies, a saber: *Myracrodruon urundeuva* e *Anandenanthera colubrina*, e concluíram que a *M. urundeuva* (frequente em Matas Secas) foi a espécie mais afetada, com a morte de muitas plântulas, mudas e árvores jovens após a inundação do reservatório. Por outro lado, novos indivíduos de *A. colubrina* estabeleceram-se nessa área. Ferreira e Ribeiro (2001) demonstraram por meio de simulação de enxarcamento que, após vinte dias, espécies como *Copaifera langsdorffii* e *Piptadenia gonacantha* foram capazes de desenvolver lenticelas hipertrofiadas no caule da muda. Estas são estruturas que facilitam a entrada de oxigênio na planta e assim permitem que o indivíduo conviva com inundações. Assim sendo, as novas condições impostas pelo represamento podem promover o aumento ou declínio populacional de espécies nativas em particular, podendo assim alterar a composição florística e estrutura das futuras comunidades florestais.

Nesse contexto das Matas Secas, Lopes *et al.* (2015) analisaram os impactos da barragem localizada na cidade de Indianópolis, Minas Gerais, passados quinze anos de sua instalação, e verificaram várias mudanças na comunidade arbórea de uma Floresta Estacional Decidual que ficou às margens da represa, a saber: maiores valores de área basal e densidade no setor mais próximo à barragem, e menor valor no índice de diversidade de Shanonn. Para os autores, a maior área basal no setor mais próximo à barragem sugere que o déficit hídrico durante a estação seca diminuiu, permitindo assim o crescimento em área basal das espécies. Além disso, os resultados florísticos e estruturais mostraram que o setor perto da barragem é menos similar a outras florestas estacionais deciduais dentro de uma mesma região geográfica que o setor distante da água.

Outro estudo com consequências de implantação da barragem em três Florestas Secas (uma Floresta Seca Semidecídua e duas Florestas Secas Deciduais) foi realizado na margem da barragem Amador Aguiar I e II, em Minas Gerais. Vale *et al.* (2015b) realizaram três inventários florísticos nas referidas fisionomias: o primeiro executado no T0 período, antes do represamento; o segundo executado dois anos (T2) depois do represamento, e o tercei-

ro, quatro anos (T4) após. As florestas sofreram alterações como aumento na umidade do solo, principalmente nas regiões mais próximas da margem dos reservatórios. Muitas árvores especialistas de Florestas Secas morreram com o aumento da umidade do solo; por outro lado, outras apresentaram altas taxas de crescimento. Segundo os autores, a mortalidade de espécies consideradas especialistas de Florestas Secas ilustra o quão fortes são os efeitos desse tipo de perturbação para os ambientes, mesmo em um curto intervalo de tempo. Adicionalmente, algumas espécies típicas de Florestas Ripárias foram encontradas após represamento, aumentando assim a riqueza da Floresta Decidual. Para os autores, o represamento cria uma alteração permanente da paisagem, com mudanças que ocorrerão por vários anos e que são mais notáveis nos primeiros dois anos após o represamento, sendo que as variações na Floresta Estacional Decidual são mais notáveis que nas Florestas Estacionais.

No que diz respeito às Matas Ciliares, Vale *et al.* (2015a), em estudo na UHE Amador Aguiar, em Minas Gerais, observaram impactos em uma área de Floresta Ciliar às margens do rio Araguari, localizada a jusante da barragem. Após três anos da construção da barragem, os autores observaram notória redução na umidade do solo na Floresta Ciliar, especialmente na estação seca. Após quatro anos, altas taxas de mortalidade de indivíduos (perda da proteção do solo) e perda de área basal (redução no estoque de carbono) também foram constatadas, confirmando que a redução do fluxo de água tem forte impacto na comunidade arbórea vegetal. Sendo assim, segundo os autores, a Floresta Ciliar, anteriormente com muitas espécies dependentes da umidade, poderá mudar no futuro para uma fisionomia com mais espécies generalistas, provavelmente uma Floresta Estacional Semidecidual, que é fortemente influenciada por mudanças climáticas sazonais.

Finalmente, com relação às Veredas, Costa e Olszewski (2008) relatam impactos quando estas foram submetidas a condições distintas daquelas que naturalmente as mantêm. Sabe-se que as Veredas localizam-se preferencialmente nas bordas das chapadas ou no fundo dos vales e que, por ser um área mais baixa, essa fisionomia tem papel de receptora de água, de materiais orgânicos e inorgânicos dos pontos com cotas ligeiramente mais altas. Com o uso intensivo dos solos de Cerrado, a água passa a ter alta demanda na irrigação, no consumo humano, na pecuária, na criação de peixes, nos usos industriais e outros. Sendo assim, o barramento das águas e a formação de lagos artificiais ocorrem com muita frequência nessa fisionomia, que, segundo a legislação de Proteção da Vegetação Nativa (novo Código Florestal), deveria ser uma Área de Preservação Permanente (APP) e assim intocada. Como consequência, esses autores destacam o aumento dos sedimentos depositados nas represas, mudança considerável na vegetação original (eliminação), que passa a conviver com uma lâmina de água que varia de um a vários metros de profundidade. Muitos microrganismos, animais e plantas não suportam as novas condições impostas, e, assim, a biodiversidade começa a ser modificada em razão dessa nova realidade antrópica, rompendo o equilíbrio natural. Adicionalmente, o acréscimo contínuo de sedimentos provenientes da erosão hídrica vai causar mudanças no fundo da represa. A biomassa submersa morre e começa a decompor-se em condições anaeróbicas, onde do carbono orgânico origina-se o metano ou gás dos pântanos. Esse gás tem efeito estufa bem maior que o do gás carbônico.

É notório que os benefícios da geração de energia através da construção de usinas hidrelétricas no país são claros e relevantes em face da demanda crescente em todos os setores da economia no Brasil (LOPES *et al.*, 2014). No entanto, atualmente, sabemos que a realidade

é muito complexa e que reservatórios podem, e de fato levam, a perdas de ambientes e da biodiversidade, como relatam os trabalhos científicos citados anteriormente. Adicionalmente, como já referido, a falta de estudos a respeito da dinâmica dos ambientes que margeiam os reservatórios e aqueles a jusante colabora ainda mais por mascarar a intensidade dos impactos gerados por barragens.

4 Recuperação vegetal pós-inundação de reservatórios

A formação dos reservatórios artificiais gera áreas que antes não eram consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP), e que agora passam a ser. Desse ponto surge a grande dificuldade de “recuperar” esses ambientes, já que o ambiente recém-estabelecido pela elevação do lençol freático e pelas oscilações do nível da água, conforme mencionado antes, difere dos ambientes ripários naturais no que diz respeito à origem do solo e às características edáficas, microclimáticas e biológicas.

Adicionalmente, essa formação gera ainda áreas de depleção, que são as faixas marginais que ficam inundadas durante uma parte do ano, e outra seca, em função do nível do reservatório que sofre variações ao longo do ano (DAVIDE *et al.*, 1996). Geralmente esses locais estão desprovidos de vegetação em função dessa grande variação do nível da água (Figura 2). Assim sendo, esse é um dos principais desafios dessas áreas, espécies adaptadas a um período de inundação seguido por um seco. Nesse sentido, a “restauração” de novos ecossistemas que apresentam condições estressantes para as plantas deve ser fundamentada na adaptabilidade de algumas espécies às novas condições (HOBBS *et al.*, 2006) e não apenas pautada na biodiversidade.



Figura 2. Áreas de depleção a jusante do reservatório de Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu, Paraná.

Foto: Maria Cristina de Oliveira.

A ausência de vegetação nesses locais é preocupante, já que, segundo Carone *et al.* (2006), acentuam-se os processos erosivos na área do reservatório, o que, conseqüentemente, acarreta problemas como assoreamento, o qual, por sua vez, diminui a capacidade de armazenamento de água do reservatório. Sabe-se que a água da chuva, que antes era retida pela parte aérea e absorvida pelas raízes das árvores para abastecimento dos lençóis d'água, escoava superficialmente, causando erosão. Assim, proteger as margens dos reservatórios é de suma importância, já que, além de conter a erosão do solo, protege o reservatório da contaminação da água pelas atividades antrópicas, como a pecuária e agricultura, contribui com a conectividade da paisagem regional e, ainda, para a manutenção da biodiversidade aquática e terrestre da região.

No entanto, em muitos casos, não somente a área de depleção precisa ser revegetada, mas também toda a área que recentemente se tornou ripária. É importante salientar que, para isso, deve-se adotar medidas de recuperação que permitam a constituição física e biológica desses ambientes, a fim de receber espécies com características diferentes daquelas que anteriormente ocupavam esse *habitat*.

A partir da segunda metade do século XX, projetos de restauração ao redor de reservatórios se destacaram. No princípio da década de 1980, as Centrais Elétricas de São Paulo (Cesp) já implantavam florestas no entorno de reservatórios (KAGEYAMA; GANDARA, 2005). Além disso, plantios na Usina Ester em Cosmópolis, SP (NOGUEIRA, 1977), e ao redor do reservatório da Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu, PR, também eram destaques. Desde 1979 já foram plantados 44 milhões de mudas, principalmente de *Leucena sp.*, ao redor do lado brasileiro do reservatório de Itaipu, sendo reportado como o maior programa mundial de recuperação com fins de proteção. Atualmente, uma faixa inferior a 2% da faixa de proteção do reservatório falta ser recuperada (ITAIPU BINACIONAL, 2016).

Apesar da importância, são poucos os estudos de restauração publicados nesses ambientes (CHIAMOLERA; ANGELO, 2007; DAVIDE *et al.*, 1996; FERREIRA *et al.*, 2007; FERREIRA *et al.*, 2009; KAGEYAMA, 1992; OLIVEIRA, 2012; SALVADOR, 1986), e esse assunto está longe de ser esgotado, haja vista os diversos desafios impostos pelo ambiente recém-formado. Os poucos resultados de pesquisas disponíveis apontam que, após a inundação do reservatório, o aumento do teor da umidade apresenta consequência negativa ou positiva, dependendo da espécie, para a estrutura populacional de várias espécies lenhosas. Sendo assim, as novas condições ambientais impostas pelos reservatórios artificiais precisam ser levadas em consideração na reconstrução das áreas impactadas, uma vez que se associam ao sucesso das espécies indicadas.

Salvador (1986) realizou um trabalho de recuperação de área de depleção do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Paraibuna em São Paulo, utilizando as seguintes espécies arbóreas: *Citharexylon myriaantum*, *Croton floribundus*, *Ficus sp.*, *Genipa americana*, *Inga marginata*, *Luehea divaricata*, *Psidium cattleyanum* e *Vitex montevidensis*. Como resultado, o autor observou que, após um ciclo de inundação, de 34 a 174 dias inundadas, apenas *I. marginata* e *G. americana* obtiveram sobrevivência na área superior a 50%.

Em projeto de restauração de trechos recém-ciliares das margens do Reservatório de Iraí em Pinhais no Paraná, Chiamolera e Angelo (2007) analisaram o efeito do plantio de mudas em área de estepe (campos entremeados com capões arbóreos) de diferentes graus de sucessão, a saber: a) área onde a regeneração espontânea apresentava-se constituída por gramíneas; e b) área de capoeira. As espécies selecionadas para o plantio foram aquelas nativas da região

e aptas às condições do solo do local do plantio: *Mimosa scabrella*, *Schinus terebinthifolius*, *Podocarpus lambertii*, *Luehea divaricata* e *Escallonia montevidensis*. A taxa de sobrevivência para todas as espécies apresentou-se maior quando as mudas foram plantadas entremeadas na capoeira (adensamento/enriquecimento). Nessas áreas, as maiores taxas de sobrevivência (>89%) foram apontadas para *S. terebinthifolius*, *P. lambertii* e *L. divaricata*.

Oliveira (2012), em trabalho de recuperação realizado ao longo de dezenove anos na área de depleção no Reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos em Minas Gerais, plantou as espécies arbóreas *Campsiandra laurifolia*, *Croton urucurana*, *Inga cylindria*, *Inga vera*, *Leptolobium nitens*, *Magnolia ovata*, *Salix humboldtiana*, *Sebastiania schottiana* e *Sesbania sesban*. Após dezenove anos do plantio, apenas as espécies *C. laurifolia*, *L. nitens*, *I. vera* e *S. schottiana* sobreviveram. Com destaque para as duas últimas espécies, que apresentaram as maiores taxas de sobrevivência e foram capazes de se reproduzirem. Para o autor, as espécies *S. humboldtiana*, *S. sesban*, *M. ovata* e *C. urucurana*, apesar de serem adaptadas a ambientes encharcados, não são indicadas para recompor locais sujeitos à inundação e déficit hídrico por um longo período de tempo.

A degradação ou a invasão de ecossistemas nativos ou “selvagens” como estes criados após o estabelecimento de reservatórios pode resultar na formação de novos ecossistemas. Quanto mais os seres humanos impactam criando esses novos ecossistemas, mais eles aumentam em importância e em tamanho, mas ainda são relativamente pouco estudados. É muito difícil ou de custo financeiro muito alto retornar ou manter os ecossistemas originais ao redor dos reservatórios; assim, muitos estudos e iniciativas precisam ser levados em conta para desenvolver o manejo adequado para o sucesso da manutenção dessas áreas.

4.1 Métodos de restauração

Na década de 1980, a Cesp implantava florestas no entorno de reservatórios sem a utilização de um modelo de restauração definido, sem empregar espécies pioneiras ou considerar grupos sucessionais e ainda sem o uso exclusivo de espécies pioneiras (KAGEYAMA; GANDARA, 2005). Atualmente sabe-se que, para a restauração de qualquer ambiente, as técnicas de restauração precisam embasar-se dos conhecimentos sobre a diversidade de espécies nativas, sua reprodução, a sucessão ecológica natural, além de outros, para que modelos sustentáveis ao longo do tempo sejam utilizados.

Somando-se à escassez de experiências sobre erros e acertos de restauração nas recém-criadas áreas “ripárias”, as estratégias de restauração devem ser selecionadas levando-se em conta a reconstituição das características físicas e biológicas frequentemente encontradas em áreas ripárias.

De maneira geral, as estratégias de restauração de uma determinada área podem ser agrupadas como de: a) baixa intervenção, quando o potencial de regeneração natural da área é alto, ou de b) alta intervenção, quando esse potencial é baixo e a área precisa ser trabalhada integralmente (SAMPAIO *et al.*, 2015). Assim, dentro de cada tipo de intervenção, há opções de estratégias de restauração que poderão ser utilizadas. Segundo esses autores, dentre os métodos de baixa intervenção, há a Regeneração natural sem manejo, a Regeneração natural com manejo (com Controle de exóticas, Adensamento e Enriquecimento) e a Nucleação. Já

os métodos de alta intervenção são compostos pelo Plantio de mudas e Semeadura direta em área total. Veja a seguir informações gerais sobre cada uma dessas estratégias.

Estratégias de baixa intervenção:

- 1) Regeneração natural sem manejo – consiste em deixar a natureza seguir seu curso, ou seja, deixar os processos naturais agirem livremente. Para isso, é necessário que exista a presença de regenerantes na área, banco de sementes do solo, fontes de sementes próximas, capacidade de rebrota e baixa presença de espécies invasoras na área. Sendo assim, para uma área com alto potencial de regeneração natural, o simples isolamento dos fatores de degradação permitirá o retorno da vegetação. Essa é uma técnica de custo mais baixo, haja vista a reduzida necessidade de intervenção. O maior gasto acontece com a necessidade de cercar, se o fator de degradação for a presença de criação de animais nas proximidades.
- 2) Regeneração natural com manejo (Controle de espécies exóticas, Adensamento e Enriquecimento) – Essas estratégias são adotadas quando ações de controle de invasoras, descompactação do solo, e aumento em diversidade de espécies deverão ser realizados.
 - 2.1. Controle de espécies exóticas – Nesse caso, as espécies nativas presentes não conseguem aumentar a taxa de cobertura do solo ao longo do tempo e começam a perder espaço para as espécies invasoras. Desse modo, estratégias de manejo, como a eliminação das invasoras, adubação dos regenerantes e descompactação do solo, são necessárias, buscando aumentar a densidade da regeneração natural, ou mesmo seu crescimento.
 - 2.2. Adensamento – Consiste na introdução de novos indivíduos das espécies de início de sucessão (pioneiras de recobrimento com crescimento rápido) já existentes no local através do plantio de mudas ou sementes, visando recobrir o solo nos espaços com falhas, aumentando as chances de a regeneração natural eliminar as espécies invasoras. Além disso, essa atividade se faz necessária, já que melhora as condições do solo, além de aumentar a diversidade em fragmentos de áreas distantes de outros remanescentes de vegetação nativa. Espécies de potencial econômico podem ser utilizadas nesse caso.
 - 2.3. Enriquecimento – Representa a introdução de mudas ou semente de espécies de estádios finais de sucessão em área com melhores condições do solo e que já possua presença de vegetação nativa, todavia com baixa diversidade de espécies que possam preencher os espaços com falhas da regeneração natural. Tem como objetivo aumentar a biodiversidade na área, além de extinguir as espécies invasoras que estiverem se estabelecendo nas falhas da regeneração. Várias espécies de potencial econômico podem ser utilizadas neste caso.
- 3) Nucleação – conforme definida por Reis *et al.* (2014) é a capacidade que algumas espécies possuem de melhorar significativamente o ambiente degradado, facilitando assim a ocupação desse por outras espécies. Ressalta-se também que, além dessas espécies facilitadoras, outros artifícios também podem funcionar como núcleos na área degradada. Assim, a partir de ilhas de vegetação ou núcleos, a vegetação secundária se expande ao longo do tempo, desencadeando o processo de sucessão natural na área. Pakkad *et al.* (2003) citam que os atributos desejáveis das espécies para compor

esses núcleos seriam: acelerado crescimento, altas taxas de sobrevivência, copas largas e serem atrativas à fauna. Os núcleos ou ilhas podem ser formados por transposição de solo; transposição de galharias; poleiros naturais e artificiais; transposição de chuva de sementes; e plantio de mudas ou sementes.

Estratégias de alta intervenção:

- 1) Plantio de mudas – Consiste em plantar mudas em área total de forma sistemática (em linhas) ou aleatória, em espaçamentos que podem variar em função da fisionomia e da velocidade com que se deseja recobrir o solo. Para isso, os espaçamentos mais utilizados são de 2 m × 2 m (2.500 indivíduos/ha) e 3 m × 2 m (1.667 indivíduos/ha). Diferentes modelos podem ser adotados para plantio em área total. Lembrando que, independente do modelo escolhido, este deve apresentar grande quantidade de espécies de modo a possibilitar a substituição natural ao longo do tempo. Nesse tipo de plantio, o controle de espécies invasoras deverá ser realizado por no mínimo dois anos, ou até que as gramíneas invasoras sejam sombreadas.
- 2) Semeadura direta – Nesse método uma grande quantidade de sementes de várias espécies é semeada diretamente no solo. Quanto mais sementes, melhor, já que nem todas irão germinar, isso sem contar a mortalidade natural que ocorre no estágio inicial de desenvolvimento, principalmente no período de estiagem. Além disso, para áreas distantes de fonte de semente natural, uma maior diversidade de espécies deve ser selecionada. A semeadura direta na área total pode ser manual (a lanço ou não) ou mecanizada. As sementes também podem ser plantadas em linhas, e, nesse caso, o espaçamento entre elas pode variar de 50 centímetros a alguns metros.

Finalmente, independente da estratégia de restauração escolhida, é importante destacar que as espécies a serem utilizadas devem ter características biológicas que permitam o seu desenvolvimento na área a ser restaurada. Além disso, as espécies devem apresentar potencialidades de interações. Antes da aplicação de qualquer uma dessas estratégias, a área deve passar por análise rigorosa e, a partir daí, algumas atividades preliminares de boas práticas agrícolas, como o cercamento, o aceiro, a capina e outros, deverão ser realizadas.

Mais detalhes dessas estratégias e de boas práticas agrícolas, além de outras informações, podem ser acessados no site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) sobre o “novo” Código Florestal (<https://www.embrapa.br/codigo-florestal/estrategias-e-tecnicas-de-recuperacao>).

5 Considerações finais

Independentemente dos detalhes dos resultados apresentados, é evidente que nossa espécie está determinando o desenvolvimento de novos ambientes e de novos ecossistemas nas margens dos reservatórios. Muitos desses ecossistemas, entretanto, não estão começando do zero, mas sim a partir de ecossistemas prévios. Sendo assim, como proposto por Hobbs *et al.* (2006), precisamos entendê-los cada vez melhor para sermos capazes de utilizá-los para o benefício da sociedade – tanto como ecossistemas individuais quanto como em seu mais amplo contexto da paisagem.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil. *Caderno de Recursos Hídricos*, Brasília, DF, 2007.
- BRANQUINHO, A. A.; BRITO, D. Impact of dams on global biodiversity: A scientometric analysis. *Neotropical Biology and Conservation*, 11, 2, p. 101-109, 2016.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Mapeamento e uso e cobertura do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2015.
- CARONE, M. T.; GRECO, M.; MOLINO, B. A. Sediment-filter ecosystem for reservoir rehabilitation. *Ecological Engineering*, 26, p. 182-189, 2006.
- CAMAPUM, J.C.; LELIS, A.C.; SALES, M.M.; MASCARENHAS, M.M.A.; ANGELIM, R.R.; LUZ, M.P. (2016). *Erosão de bordo de reservatórios*. Cartilha. Goiânia. (Série GECOM UFG-Volume I) , 55p.,2016.
- CHIAMOLERA, L. D. B.; ANGELO, A. C. Resposta de espécies nativas em áreas com diferentes graus de sucessão, Reservatório Irai, PR. Nota Científica. *Revista Brasileira de Biociências*, 5, 1, p. 132-134, 2007.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente. Brasília, DF: Conama, 2002.
- COSTA, L.; OLSZEWSKI, N. Caracterização da paisagem do Cerrado. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. (eds.). *Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. p. 363-378.
- DAVIDE, A.C.; BOTELHO, S.A.; FARIA, J.M.R.; PRADO, N.J.S. (1996). Comportamento de espécies florestais de mata ciliar em área de depleção do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos – Itutinga, MG. *Cerne*, 2, 1, p. 20-40, 1996.
- FEARNSIDE, P. M. Environmental impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Management*, 27, p. 377-396, 2001.
- FERNANDES, G. W.; PEDRONI, F.; SANCHEZ, M.; SCARIOT, A.; AGUIAR, L.M.S.; FERREIRA, G.; MACHADO, R.; FERREIRA, M.E.; DINIZ, S.; PINHEIRO, R.; COSTA, J.A.S.; DIRZO, R.; MUNIZ, F. (2016). *Cerrado: em busca de soluções sustentáveis*. Rio de Janeiro: Vertentes Produções Artísticas, 2016. 211 p.
- FERREIRA, J. N.; RIBEIRO, J. F. Ecologia da inundação em Matas de Galeria. In: RIBEIRO, J. F.; FONSECA, C. L.; SOUSA-SILVA, J. C. (eds). *Cerrado: caracterização e recuperação de Matas de Galeria*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 424-451.
- FERREIRA, W.C.; BOTELHO, S.A.; DAVIDE, A.C.; FARIA, J.M.R. (2007). Avaliação do crescimento do estrato arbóreo de área degradada revegetada à margem do Rio Grande, na Usina Hidrelétrica de Camargos, MG. *Revista Árvore*, 31, 1, p. 177-185, 2007.
- _____. Estabelecimento de Mata Ciliar às margens do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos, MG. *Ciência Florestal*, 19, 1, p. 69-81, 2009.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite vs. Distributed Curve Numbers: Effects on estimates of storm runoff depth. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 5, p. 1.015-1.023, 1998.

GUSSON, A.E.; VALE, V.S.; OLIVEIRA, A.P.; LOPES, S.F.; DIAS NETO, O.C.; ARAÚJO G.M.; SCHIAVINI, I. Interferência do aumento de umidade do solo nas populações de *Myracrodruon urundeuva* Allemão e *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan em reservatórios artificiais de Usinas Hidrelétricas. *Scientia Florestalis*, 39, 89, p. 35-41, 2011.

_____. Variações temporais na densidade de espécies lenhosas regenerativas em áreas impactadas por Usina Hidrelétricas. *Revista de Biologia e Ciência da Terra*, 12, 1, p. 83-88, 2012.

HOBBS, R.J.; ARICO, S.; ARONSON, J.; BARON, J.S.; BRIDGEWATER, P.; CRAMER, V.A.; EPSTEIN, P.R.; EWEL, J.J.; KLINK, C.A.; LUGO, A.E.; NORTON, D.; OJIMA, D.; RICHARDSON, D.M.; SANDERSON, E.W.; VALLADARES, F.; VILÀ, M.; ZAMORA, R.; ZOBEL, M. (2006). Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography*, 15, p. 1-7, 2006.

ITAIPU BINACIONAL. *Reposição florestal*. 2016. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/meioambiente/reposicao-florestal>>. Acesso em: 19 out. 2016.

JUNK, W. J.; MELLO, J. A. S. N. Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. *Estudos Avançados*, 4, 8, p. 126-143, 1990.

KAGEYAMA, P. Y. Recomposição da vegetação com espécies arbóreas nativas em reservatórios de usinas hidrelétricas da Cesp. *Série técnica Ipef*, 8, 25, p. 1-5, 1992.

_____; GANDARA, F. B. Resultados do programa de restauração com espécies arbóreas nativas do convênio Esalq/USP e Cesp. In: GALVÃO, A. P. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. (eds). *Restauração florestal: fundamentos e estudo de caso*. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. p. 47-58.

LOPES, S.F.; VALE, V.S.; PRADO-JÚNIOR, J.A.; SCHIAVINI, I. Impacts of artificial reservoirs on floristic diversity and plant functional traits in dry forests after 15 years. *Brazilian Journal of Biology*, 75, 3, p. 548-557, 2015.

_____. Landscape changes and habitat fragmentation associated with hydroelectric plants reservoirs: insights and perspectives from a Central Brazilian case history. *Bioscience Journal*, 30, 4, p. 1.205-1.212, 2014.

LOREAU, M.; NAEEM, S.; INCHAUSTI, P.; BENGTTSSON, J.; GRIME, J.P.; HECTO, A.; HOOPER, D.U.; HUSTON, M.A.; RAFFAELI D.; SCHMID, B.; TILMAN, D.; WARDLE, D.A. (2001). Ecology – Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science*, 294, p. 804-808, 2001.

MENDONÇA, R.C.; FELFILL, J.M.; WALTER, B.M.T.; SILVA JÚNIOR, M.C.; REZENDE, A.V.; FILGUEIRA, J.S.; NOGUEIRA, P.E. Flora vascular do cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.). *Cerrado: ambiente e flora*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 1-1.279.

NILSSON, C. Remediating river margin vegetation along fragmented and regulated rivers in the North: What is possible?. *Regulated Rivers-Research & Management*, 12, p. 415-431, 1996.

NOGUEIRA, J. C. B. Reflorestamento heterogêneo com essências indígenas. *Boletim Técnico Instituto Florestal*, p. 1-74, 1977.

OLIVEIRA, G. N. *Duas áreas em processo de restauração ecológica no entorno de uma hidrelétrica: o que mudou em vinte anos?*. 2012. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

PAKKAD, G.; TORRE, F.; ELLIOTT, S.; BLAKESLEY, D. Selecting seed trees for a forest restoration program: A case study using *Spondias axillaries* Roxb. (Anacardiaceae). *Forest Ecology and Management*, 99, 3, p. 363-70, 2003.

PELICICE, F.M.; VITULE, J.R.S.; LIMA JUNIOR, D.P.; ORSI, M.L.; AGOSTINHO, A.A. A Serious New Threat to Brazilian Freshwater Ecosystems: The Naturalization of Nonnative Fish by Decree. *Conservation Letters*, 7, 1, p. 55-60, 2014.

REIS, O.; BECHARA, F.C.; TRES, D.R.; TRENTIN, B.E. Nucleação: concepção biocêntrica para a restauração ecológica. *Ciência Florestal*, 24, 2, p. 509-519, 2014.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.). *Cerrado: ecologia e flora*. Brasília: Embrapa Informação e Tecnologia, 2008. p. 151-212.

SALVADOR, J. L. G. Comportamento de espécies florestais nativas em áreas de depleção de reservatórios. *Ipef*, 33, p. 73-78, 1986.

SAMPAIO, A.B.; VIEIRA, D.L.M.; CORDEIRO, A.O.O.; AQUINO, F.G.; SOUSA, A.P.; ALBUQUERQUE, L.B.; SCHMIDT, I.B.; RIBEIRO, J.F.; PELLIZZARO, K.F.; SOUSA, F.S.; MOREIRA, A.G.; SANTOS, A.B.P.; REZENDE, G.M.R.; SILVA, R.R.P.; ALVES, M.; MOTTA, C.P.; OLIVEIRA, M.C.; CORTES, C.A.; OGATA, R. *Guia de restauração do Cerrado: volume 1: semeadura direta*. Brasília: Universidade de Brasília, Rede de Sementes do Cerrado, 2015. 40 p.

STROMBERG, J. C. Restoration of riparian vegetation in the South-western United States: importance of flow regimes and fluvial dynamism. *Journal of Arid Environments*, 49, p. 17-34, 2001.

VALE, V.S.; SCHIAVINI, I.; ARAÚJO, G.M.; GUSSON, A.E.; LOPES, S.F.; OLIVEIRA, A.P.; PRADO-JÚNIOR, J.A.; ARANTES, C.S.; DIAS NETO, O.C. Dams consequences to the woody regeneration layer of dry forests. *Natureza*, 12, 1, p. 19-27, 2014.

_____. Effects of reduced water flow in a riparian forest community: a conservation approach. *Journal of Tropical Forest Science*, 27, 1, p. 13-24, 2015.

_____. Fast changes in seasonal forest communities due to soil moisture increase after damming. *Revista Biologia Tropical*, 61, 4, p. 1901-1917, 2013.

_____. Rapid changes in tree composition and biodiversity: consequences of dams on dry seasonal forest. *Revista Chilena de História Natural*, 88, 13, p. 2-11, 2015.

VIANA, R. M. *Grandes barragens, impactos e reparações: um estudo de caso sobre a barragem de Ita*. 2003. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano e Regional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CAPÍTULO 10

A micromorfologia no contexto das erosões de borda de reservatórios

Renato Cabral Guimarães
Heloisa Helena A. B. da Silva
Renato Batista de Oliveira
Yamile Valencia Gonzáles
Wisley Moreira Farias
José Camapum de Carvalho

Palavras-chave: Composição química. Composição mineralógica. Microfauna.

1 Introdução

Os processos erosivos de borda de reservatório estão ligados a fatores extrínsecos e intrínsecos. Entre os fatores extrínsecos, estão o clima, as ondas geradas na lâmina d'água dos reservatórios por efeito de ventos e movimentos de embarcações, as características hidrológicas da superfície contributiva e a ocupação e o uso do solo de suas margens. O impacto de todos esses fatores está ligado às suas condições de atuação, como, por exemplo, à forma e orientação do maciço em relação à atuação da insolação, dos ventos e das ondas. Entre os fatores intrínsecos, estão as características geológicas – como rocha de origem e sua estrutura –, hidrogeológicas, geomorfológicas, o solo formado, sua composição químico-mineralógica e sua micromorfologia e a atividade biológica. A atuação, tanto dos fatores internos como externos, está diretamente vinculada ao tempo, no decorrer do qual a ação será resultante da conjunção desses fatores, que atuarão em maior ou menor grau. As análises apresentadas neste capítulo estão voltadas para os fatores intrínsecos, relativos às características estruturais e à composição químico-mineralógica do solo formado que se encontra em estado natural, ou seja, não se dará ênfase aos solos compactados.

O capítulo se volta em especial para os solos tropicais, compreendendo desde solos pouco intemperizados, passando pelos solos de transição, até atingir os solos profundamente intemperizados. No que se refere aos solos pouco intemperizados e de transição, as análises se voltarão para os solos residuais tropicais; no entanto, no que tange aos solos profundamente intemperizados, já não se faz necessário distinguir a origem do solo, se residual ou transportado, pois, como mostrou Cardoso (1995) ao estudar solos colapsíveis do Distrito Federal, o seu comportamento está, sobretudo, ligado às suas propriedades físico-químicas, mineralógicas e, em especial, estruturais. Contudo, podem existir diferenciações na matriz de solos transportados em relação ao solo residual, em função de sua granulometria e composição mineralógica, influenciando em seu comportamento físico diferenciado. Como exemplo, um solo residual arenoso, rico em quartzo e profundamente intemperizado poderá apresentar comportamento distinto de outro solo profundamente intemperizado, rico em silte e agregados de argila, seja esse solo de origem residual ou transportada.

Considera-se aqui o solo intemperizado após ter sido transportado, pois o transporte do solo após intemperizado geralmente inverte o perfil químico-mineralógico e intervém em sua estrutura.

Do ponto de vista da engenharia, pode ser entendido que os solos residuais tropicais pouco intemperizados constituem os solos saprolíticos, e os solos tropicais profundamente intemperizados, independentemente de sua origem residual ou transportada, compreendem os solos lateríticos. Entretanto, alguns solos são pouco intemperizados e não podem ser considerados como solos saprolíticos, a exemplo dos solos pedologicamente designados como Cambissolos, que, em geral, possuem o horizonte B incipiente e apresentam, em sua composição, oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Outro exemplo são os solos hidromórficos, que são pouco intemperizados em relação aos lateríticos. Entre os solos lateríticos, que são profundamente intemperizados, o grau de intemperização e de laterização geralmente varia ao longo do perfil de intemperismo, influenciando suas propriedades físico-químicas, mineralógicas e estruturais e, por consequência, o seu comportamento hidromecânico.

Cabe aqui salientar que – como os solos tropicais residuais são o produto final da intemperização da rocha por meio da atuação do meio, por exemplo, do clima, e de processos físicos conjugados ou seguidos dos processos químico e/ou químico-biológico, permanecendo “*in situ*” –, eles possuem, portanto, grande dependência da rocha de origem. Podem derivar de diferentes tipos de rocha, seja ela ígnea, metamórfica ou sedimentar.

Destaca-se que, entre os aspectos geológicos mais relevantes para as erosões de borda de reservatório, estão a geologia estrutural, a hidrogeologia, a geomorfologia de superfície e sub-superfície e os minerais primários que deram origem às composições químico-mineralógicas dos solos formados. Tais aspectos já se constituem, no entanto, em objeto de outros capítulos do livro e não serão aqui tratados, exceto de forma introdutória, sem grandes aprofundamentos.

Em síntese, o capítulo compreenderá inicialmente uma análise geral da micromorfologia dos perfis de solos tropicais, buscando fazer um elo com as erosões de borda de reservatório. Em seguida, será abordada a composição química e mineralógica dos perfis de intemperismo, buscando uma interrelação com os processos erosivos para, a seguir, discutir aspectos ligados à microfauna presente nos solos tropicais e sua relevância como alternativa de estabilização do solo como forma de controle de erosões. Finalmente, o capítulo apresentará as considerações finais.

2 Micromorfologia dos perfis de solos tropicais e os processos erosivos de bordas de reservatórios

Este capítulo será iniciado com a abordagem do tema da interrelação entre a micromorfologia presente nos perfis de alteração tropical dos solos e rochas e as erosões de borda de reservatório.

O grau de intemperismo e a profundidade com os quais a estrutura original do maciço rochoso é decomposta variam ao longo do perfil de solo, e este, ao longo da vertente, o que dá origem a perfis de alteração que vão desde faixas e níveis de rocha sã até o material totalmente alterado – o solo (Figura 1).

Para a finalidade da Engenharia, o perfil de alteração é tratado como entidade única, desde o solo evoluído até o material inconsolidado residual de alteração da rocha. No perfil de alteração, podem-se incluir, dependendo no nível de intemperização atingido (Figura 1): o solo superficial orgânico; os solos profundamente intemperizados, geralmente constituindo os solos lateríticos que contêm argilominerais 1:1 do grupo da caulinita (camadas formadas por uma folha tetraédrica unida a uma folha octaédrica), oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, como a hematita, goethita e gibbsita e minerais primários resistentes ao intemperismo, como é o caso do quartzo; o solo de transição composto geralmente por minerais que integram os solos lateríticos e saprolíticos; e o solo pouco intemperizado, solo saprolítico, composto geralmente por argilominerais do tipo 2:1 (camadas formadas por uma folha octaédrica entre duas tetraédricas), podendo se fazer presentes minerais primários e em menor escala os argilominerais 1:1 e os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio; sob o solo saprolítico, encontra-se o saprólito, no qual predominam os minerais primários; abaixo dele, a rocha alterada e finalmente a rocha sã.

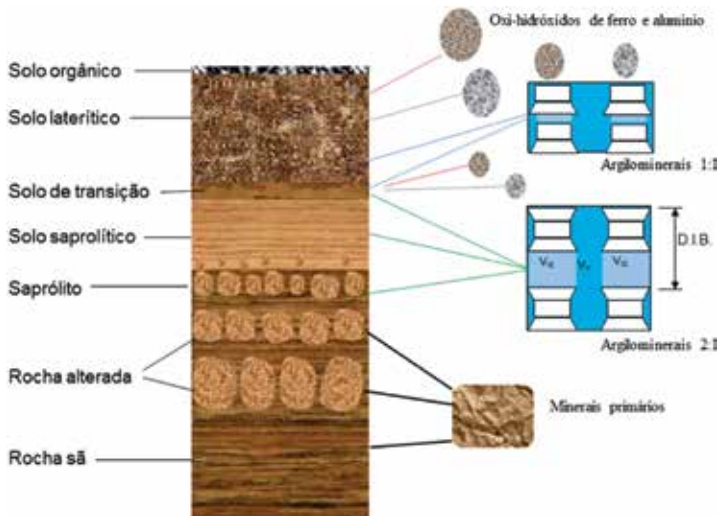


Figura 1. Perfil de alteração exemplificativo.

Estruturalmente, em termos de micromorfologia, acima da rocha sã, encontra-se o saprólito, que guarda fragmentos da rocha de origem. Na parte mais alterada, subsistem apenas as características estruturais dessa rocha.

Seguindo a cadeia evolutiva, tem-se o solo saprolítico, geralmente um solo fino que guarda as características estruturais da rocha mãe, mas não a sua coesão. Sobre o solo saprolítico, faz-se presente a camada de transição para o solo profundamente intemperizado, também conhecida como zona mosqueada ou variegada, devido às variações de cor. A estrutura dessa camada é, devido à sua natureza mista, composta de porções de solo pouco intemperizado, solo saprolítico, e porções de solo profundamente intemperizado, solo laterítico. Essa característica estrutural heterogênea reflete em termos de heterogeneidade nas propriedades e comportamento do solo, o que requer cuidados especiais, tanto dos estudos de campo, como de laboratório.

Sobre a camada de transição, está o solo profundamente intemperizado, solo laterítico, marcado pela presença de agregações em quantidade significativa. Essas agregações são formadas por uma mistura de argilominerais, geralmente do tipo 1:1, oxi-hidróxidos de ferro e alumínio e mesmo fragmentos de quartzo, o que faz com que apresentem uma porosidade interna geralmente constituída por microporos. Comumente, essas agregações encontram-se ligadas em determinados pontos por oxi-hidróxidos de ferro e/ou alumínio e/ou por pontes de argila, estabelecendo entre elas a presença de macro e mesoporos e eventualmente até mesmo microporos. Essa distribuição de poros confere a esses solos elevada porosidade e distribuição de poros bimodal, o que impacta no comportamento hidromecânico e na curva de retenção de água. A camada mais superficial desse solo geralmente se encontra impregnada por matéria orgânica.

O processo de alteração que aí se instala é denominado laterização, predominante em larga escala no Centro Oeste e em outras regiões do Brasil, inclusive em regiões de clima subtropical. Este processo envolve intensa lixiviação e ocorre onde a precipitação é maior do que a evapotranspiração, em regiões ligeiramente aplainadas e bem drenadas, cabendo destacar que, geralmente, nas bordas dessas áreas aplainadas e/ou próximo a elas, é comum a formação de cascalhos lateríticos e carapaças lateríticas devido à maior concentração do ferro que se precipita. Nessa zona de laterização, ocorre rápida decomposição dos feldspatos e minerais ferromagnesianos, a remoção da sílica e das bases, além da concentração de alumínio e ferro. Portanto, dão origem a solos lateríticos que se formam com concentração de ferro e alumínio no horizonte B; sendo a sílica lixiviada, para o caso da argila ser instável, concentrando-se a alumina para se formar, na região Centro-Oeste, geralmente, a gibbsita, um hidróxido de alumínio que ocorre na fração argila.

Em relação às rochas de origem, as características principais que mais influenciam na gênese do solo são a composição químico-mineralógica, a resistência mecânica e a textura. A susceptibilidade das rochas à alteração meteórica ou intempérica depende: das condições ambientais; das características dos maciços rochosos (estruturas externas como fraturas, falhas e contatos) e das propriedades intrínsecas das rochas (composição mineralógica, textura – tamanho dos grãos, estruturas internas – estratificação e xistosidade, porosidade, expansividade e arranjo estrutural que compõe os minerais).

A influência da composição e da textura da rocha mãe na formação dos solos é muito complexa, pois uma mesma rocha, quando submetida a diferentes condições de clima, topografia, morfologia de superfície e subsuperfície e tempo, pode dar origem tanto a solos ricos em argilominerais do grupo 1:1 ou mesmo aos oxi-hidróxidos de alumínio como a solos ricos em argilominerais do tipo 2:1. Por outro lado, rochas com composições e textura muito diferentes também podem dar origem ao mesmo tipo de solo com composição químico-mineralógica e textura semelhantes.

Outra característica importante é que o posicionamento das camadas de uma rocha estratificada no ambiente pode fornecer solos diferentes, em função do modo de percolação e das características da água que se infiltra através de suas camadas. Pode-se citar um estudo de caso, na borda do reservatório de Itutinga/Camargos, Minas Gerais, onde as rochas de origem foram filito e micaxisto, permitindo-se constatar a formação de solos diferentes em função da posição das camadas no perfil:

(1) A orientação horizontalizada das camadas que condicionou a gênese de Latossolo Variação Una, de cores amareladas, menor grau de intemperismo-lixiviação, evidenciado pelos maiores valores dos índices Ki (relação molecular sílica/alumina) e Kr (relação molecular sílica/alumina + óxidos de Fe) e pela relação gibbsita/caulinita mais baixa, menor espessura do solum apresentando maior proporção goethita/hematita;

(2) A orientação inclinada das camadas proporcionou, em condições equiparáveis, a formação de Latossolo Vermelho-Escuro, de melhor drenagem, mais intemperizado (maior relação gibbsita/caulinita e menores índices Kie Kr), com solum mais espesso, apresentando menor relação Fe_o/Fe_d (Fe_o = ferro extraído por oxalato de amônio; Fe_d = ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio - DCB); maior proporção hematita/goethita e, conseqüentemente, cores mais avermelhadas. (CHAGAS et al, 1997, p.)

Em solos residuais jovens, solos saprolíticos propriamente ditos, como é muito grande a influência da rocha mãe, sua microestrutura vai influenciar diretamente na textura e estrutura do solo, onde rochas frescas que apresentam orientação de suas partículas minerais em camadas bem definidas tendem a passar essas características ao solo, conforme esquema apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Influência da composição e estrutura das rochas na formação dos solos.

ROCHA				SOLO		
Grupo	Tipo	Composição Mineral Principal	Estrutura / Textura	Tipo	Composição	Estrutura
Ígneas	Basalto	Plagioclásio, piroxênios	Maciça / fina isotrópica	Argiloso (pouca areia)	Argila	Homogênea
	Granito	Feldspato, quartzo e micas	Maciça / isotrópica	Areno-Argiloso (micáceo)	Quartzo e argilas	Homogênea
Sedimentares	Calcário	Calcita, dolomita	Maciça / isotrópica	Argiloso	Argila	Homogênea
	Folhelho	Argilas, clorita, carbonatos	Foliada / fina anisotrópica	Argiloso	Argila	Homogênea / Heterogênea
Metamórficas	Quartzito	Quartzo e às vezes, micas	Maciça e foliada / isotrópica e anisotrópica	Arenoso	Quartzo	Homogênea / Heterogênea
	Filito	Quartzo, caulinita, sericita	Foliada / fina anisotrópica	Argiloso (pouca areia)	Argila	Homogênea / Heterogênea
	Xisto	Quartzo, micas, feldspatos	Xistosa / anisotrópica	Areno argiloso	Quartzo e argilas	Heterogênea

Essa característica de orientação das partículas dos argilominerais derivados da rocha mãe pelo processo de intemperismo tende a desaparecer no perfil de solo residual, à medida que se amplia a intemperização ao longo do tempo, promovendo a alteração dos minerais e a transformação estrutural do solo. Este comportamento é exemplificado nas imagens macro e microscópicas expostas de forma resumida na Figura 2 e detalhadas nas Figuras 3 a 5, para as quais se buscará estabelecer um elo entre a microestrutura e os processos erosivos de borda de reservatório.

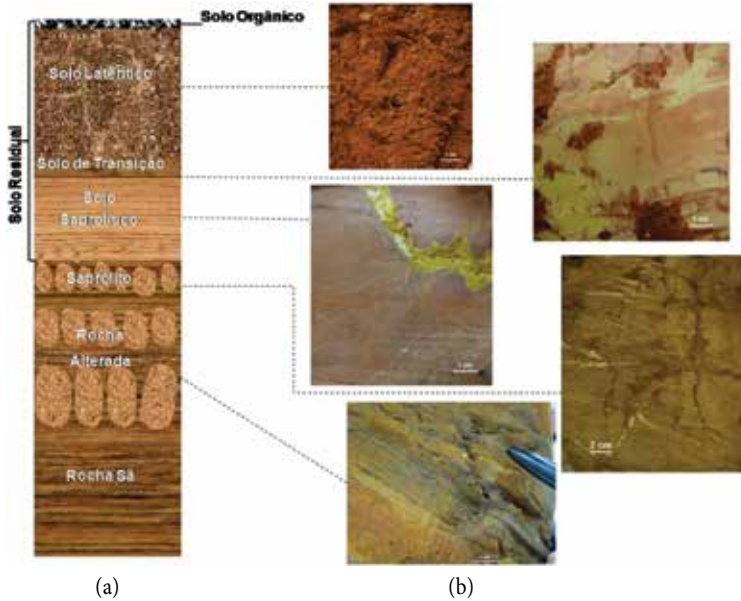


Figura 2. Perfil esquemático resumido de solo (a) com fotos macro (b).

A Figura 3 apresenta um saprólito formado a partir de uma rocha sem orientação preferencial dos minerais. Esse tipo de rocha, ao se alterar, formando o saprólito e o solo saprolítico, perde a coesão, preservando, no entanto, de forma reliquiar, a característica estrutural da rocha mãe.

Esses maciços intemperizados (saprólito e solo saprolítico) ou não (rocha sã ou alterada), tendem a apresentar comportamento isotrópico sem a presença de plano preferencial de ruptura, exceto quando da presença de falhas e trincas, inclusive as de origem tectônica. Nesses

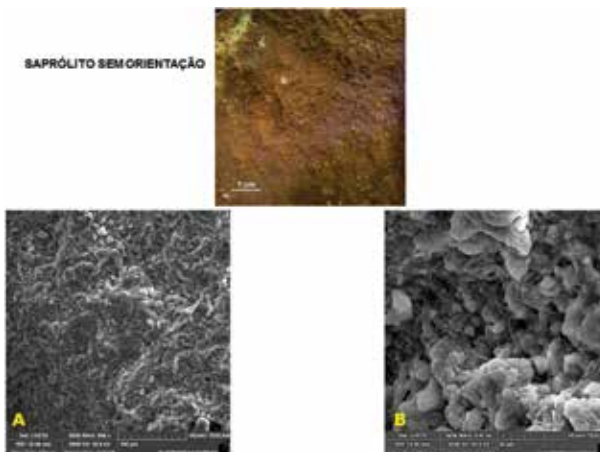


Figura 3. Saprólito sem orientação. **A** – manteve estrutura original da rocha, sem uma orientação preferencial das partículas (ampliação de 988x); **B** Detalhe de outra porção do saprólito, com presença de minerais primários e início de formação de argilominerais e microporos (ampliação de 5000x).

casos, estruturalmente, a erosão de borda dos reservatórios não é favorecida pela microestrutura presente no maciço, embora possa ocorrer devido à sua variação de comportamento com a presença da água por ação química e/ou mecânica. Cabe destacar que a presença de falhas e trincas favorece o tombamento de blocos, em consequência do solapamento da base dos taludes, como mostrou Lima (1999) ao estudar erosões de Manaus, Estado do Amazonas.

A Figura 4 mostra um saprólito a partir de uma rocha, na qual se faz presente a orientação preferencial dos minerais. Esse tipo de rocha, ao se alterar formando o saprólito e solo saprolítico, perde a coesão, preservando, no entanto, de forma reliquiária, a característica estrutural da rocha mãe, ou seja, os minerais neoformados e os alterados continuam apresentando a orientação preferencial das partículas. Nesse caso, o maciço apresenta anisotropia no comportamento hidromecânico, ou seja, o fluxo e a resistência dependerão da direção de sollicitação. No caso das erosões de borda de reservatório, é evidente que, se os planos de fluxo e de acamamento das partículas se dão inclinados em direção ao reservatório, geralmente fica favorecida a ruptura do talude, quando da atuação de agentes químicos e mecânicos oriundos do reservatório, em especial, quando estes geram o solapamento da base dos taludes ou encostas.

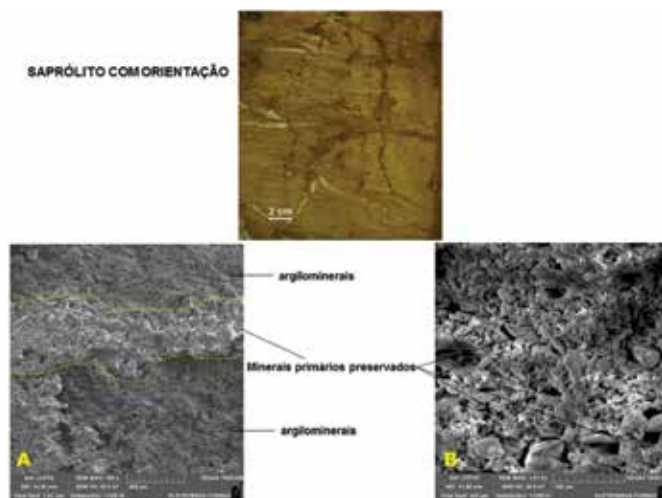


Figura 4. Saprólito com orientação. A – manteve estrutura original da rocha, marcada por alternância de níveis granulares mais preservados intercalados com níveis mais pelíticos (ricos em argilominerais) mais desgastados, ampliação de 160x; B – Detalhe de outra porção do solo com destaque pra os grãos de minerais primários preservados (ampliação de 1000x).

A Figura 5 mostra solo saprolítico com imagens de dois locais diferentes. A Figura 5-A, tirada em local da rocha original com mais estrutura orientada, mostra uma orientação incipiente dos minerais. Já a Figura 5-B, tirada em uma porção mais homogênea da rocha mãe, mostra que os pacotes de caulinita presentes na imagem colocam em evidência a orientação das partículas oriundas do seu próprio processo de formação, e não propriamente de eventual orientação estrutural da rocha, uma vez que os demais minerais que compõem essa imagem não apontam para tal orientação. Esse tipo de estrutura e orientação é, portanto, fruto da alteração mineralógica do solo.

Nesse caso específico mostrado na Figura 5, a estrutura presente no solo geralmente não é indutora de anisotropia hidromecânica, ou seja, ela não estabelece um plano preferencial de fluxo e/ou de ruptura. Portanto, no que tange às erosões de borda de reservatório, elas ocorrerão, nesse caso, devido à atuação de fluxos de superfície naturais ou oriundos do uso e ocupação dos solos das margens, inclusive envolvendo, em muitos casos, a presença de agentes químicos instabilizadores ou degradadores do solo. Elas podem ainda ocorrer devido à ação química (qualidade da água) e/ou mecânica (ação das ondas) ou pelo simples aumento da umidade na base do maciço, aí se incluindo a ascensão capilar, reduzindo as sucções e/ou capilaridades atuantes e gerando, por consequência, a perda de resistência e estabilidade do maciço.

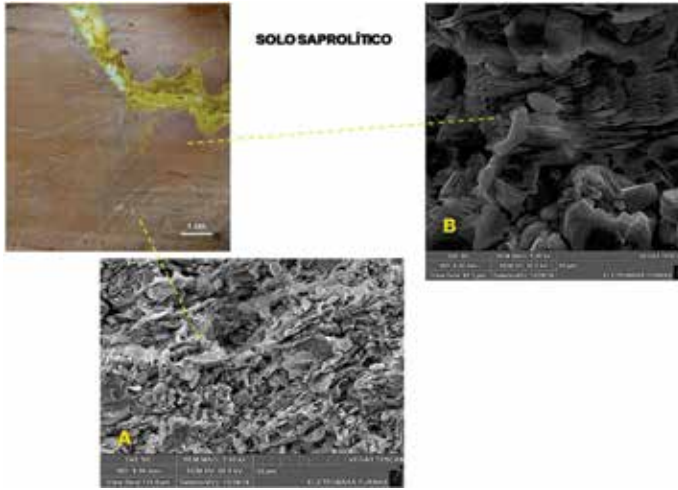


Figura 5. Solo saprolítico. A – distribuição uniforme de poros (ampliação de 3000x); B – detalhe da imagem anterior, mostrando orientação de placas de caulinita em substituição a um provável feldspato original (ampliação de 5000x).

A Figura 6 (GUIMARÃES, 2002) apresenta uma curva característica típica desses solos, obtida para uma amostra coletada a 10m de profundidade, na qual sobressai uma pressão de entrada de ar relativamente elevada, aproximadamente 50 kPa. Nesse caso, o avanço de frentes

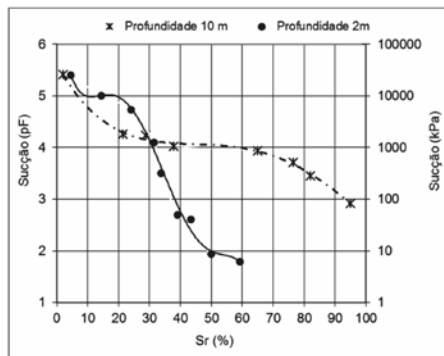


Figura 6. Curvas características de retenção de água, obtidas para as profundidades de 10m (solo saprolítico) e 2m (solo laterítico) (modificado: Guimarães, 2002).

de umidade no solo quando a fase ar ainda se encontra contínua, independentemente da origem, ao aprisionar o ar, coloca-o sob pressão; e quando a mesma ultrapassa a coesão do solo, a sua estrutura é rompida. Esse é um processo que geralmente ocorre a partir da superfície de infiltração, favorecendo, portanto, a erosão superficial, mas pode também atuar em mecanismos de erosão interna do tipo *piping* com fluxo intermitente.

A Figura 7 corresponde ao solo de transição ou zona mosqueada ou variegada, onde se fazem presentes porções mais e outras menos intemperizadas. Na Figura 7-A, apresenta-se imagem de MEV (microscópio eletrônico de varredura), tirada na porção rosada do solo, em que se observam partículas mais individualizadas e pacotes de argila refletindo a menor intemperização do solo. Já na Figura 7-B, com base na imagem do MEV tirada na porção mais avermelhada do solo, nota-se o início da formação de agregados, sendo pouco observáveis as partículas individualizadas, o que indica maior intemperização nessa parte da amostra. Portanto, nessa camada de transição, vão ocorrer dois tipos de estrutura, uma vinculada à rocha de origem e outra resultante das agregações formadas durante o processo de intemperização. Essa característica químico-mineralógica e estrutural heterogênea da camada de solo o conduz à heterogeneidade de propriedades físicas e de comportamento, mas não necessariamente a uma anisotropia de comportamento em escala macro.

No caso desses solos, as erosões de borda de reservatório, devidas aos fluxos de superfície e à ação química e mecânica da água do reservatório, ocorrerão não só e pelos mesmos motivos apresentados em relação aos solos saprolíticos, mas também devido às suas características químico-mineralógicas e microestruturais. Nesse caso, o maciço possui partes mais e menos alteradas e, portanto, mais e menos resistentes aos agentes erosivos e mais e menos erodíveis, seja por ação de fatores externos, seja por fatores internos. Por ação externa, vão ocorrer erosões localizadas, susceptíveis, em uma fase seguinte, de gerarem erosões generalizadas. Internamente, podem ocorrer processos de erosão ou de eluviação, também conhecida por esqueletização, em que o maciço perde sua resistência inicial, podendo dar origem a subsidências e rupturas de taludes/encostas.

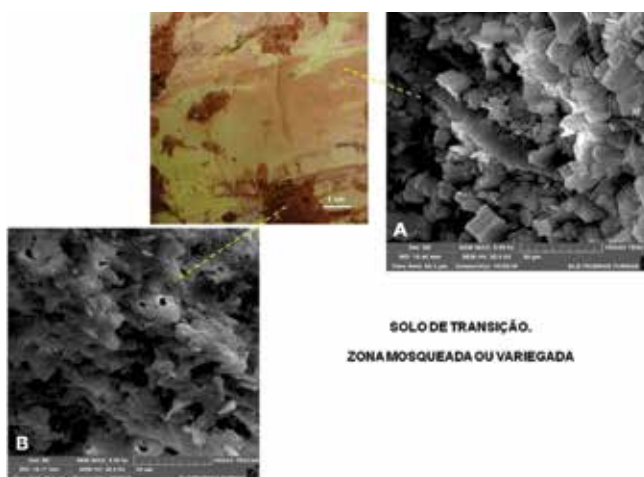


Figura 7. Solo de transição ou zona mosqueada. Imagem A: Certa organização apenas dos argilominerais na porção mais rosada do solo – Ampliação de 5000x; imagem B: formação de agregados na área vermelha da amostra (porção mais rica em ferro e mais intemperizada) – Ampliação de 5000x.

Na Figura 8, correspondente ao solo laterítico, mais superficial e profundamente intemperizado, observa-se, na imagem A, a presença de agregados e macroporos entre eles, e na imagem B, sobressaem os maiores poros no domínio dos microporos presentes no interior dos agregados. Esse tipo de estrutura geralmente enquadra o solo em uma distribuição de poros bimodal, levando-o a apresentar comportamentos hidromecânicos que são função, quase que tão somente, dos macroporos. A estabilidade dos agregados geralmente varia com a química do solo e com o grau de intemperização sofrido, sendo comum a atuação dos oxi-hidróxidos fazendo a junção entre partículas e dando maior resistência aos agregados.

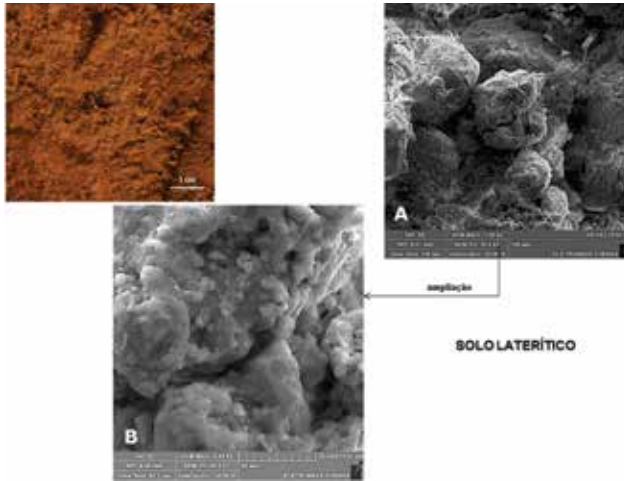


Figura 8. Solo laterítico, profundamente intemperizado, mais raso. Imagem A: Nível mais rico em ferro com completa desorganização dos componentes do solo formando agregados etambém presença de micro e macroporos – Ampliação de 1000x; imagem B: detalhe da imagem anterior – Ampliação de 5000x.

A Figura 9 mostra esses oxi-hidróxidos possuidores de carga positiva de superfície interagindo com partículas de argila que, por sua vez, possuem carga negativa de superfície e nas faces.

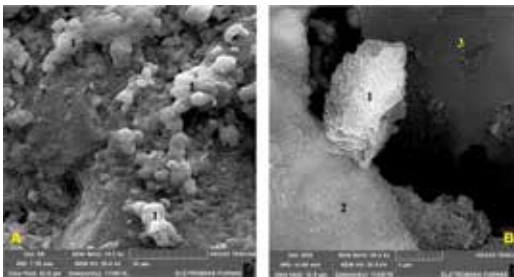


Figura 9. Imagem A: Interação entre oxi-hidróxidos de ferro e alumínio (1) e argilominerais – ampliação 10.000x. Imagem B: Presença de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio impregnando argilominerais (2) e interligando este a grão de quartzo (3) – ampliação 30.000x.

Esses solos profundamente intemperizados, quando presentes nas bordas dos reservatórios, podem apresentar maior ou menor erodibilidade, a depender das suas características

físicas, químico-mineralógicas e estruturais. Por exemplo, solos arenosos pouco cimentados ou com cimentação predominante em pontes de argila são mais susceptíveis à erosão de margem. Já os solos mais argilosos, como é o caso de grande parte dos solos que circundam o reservatório do Paranoá em Brasília, são menos erodíveis.

O grau de saturação inicial desses solos e a sucção em que se encontram apresentam um elo importante com o fenômeno erosivo. Esses solos apresentam curva característica bimodal (Figura 6, GUIMARÃES 2002), com sucções geralmente pequenas na zona dos macroporos (aproximadamente 6 kPa) e grandes na zona de microporos (aproximadamente 10.000 kPa). A inclinação da curva entre os dois trechos dependerá principalmente da graduação dos poros entre as duas zonas, podendo ser entendida como bem graduada no presente caso de um solo laterítico coletado a 2m de profundidade.

A erosão de margem de reservatório nesses solos pode se dar de modo superficial ou a partir de rupturas de taludes, oriundas do solapamento de suas bases ou da perda de resistência do solo com o aumento da umidade. Por sua vez, a erosão de superfície pode se dar pelo simples arrancamento das partículas, devido à energia atrativa da água com as partículas, ou, como no caso dos solos saprolíticos, quando da infiltração da água com a fase ar encontrando-se contínua, a partícula se submeter a um aumento de pressão positiva que ultrapasse a coesão do solo, sendo, portanto, relevantes o nível e o tipo de cimentação que o solo apresenta.

Os tipos de estrutura e a interrelação entre partículas que marcam o solo ao longo do perfil de intemperismo são de grande relevância para o fluxo, para a resistência e módulo e para os mecanismos de contração e expansão do solo. No caso dos solos profundamente intemperizados, encontrando-se a maioria das partículas prisioneiras nos agregados, elas, de modo individual, não interferem – ou interferem pouco por meio das partículas que recobrem a superfície dos agregados – no comportamento hidromecânico e nos mecanismos de expansão e contração do solo.

Dada a importância dos mecanismos de expansão e contração para o processo de evolução do comportamento hidromecânico do solo, recorre-se aqui, para maior clareza, ao fenômeno avaliado para os solos sedimentares compactados que guardam relação estrutural com os solos residuais jovens, solos saprolíticos, devido à inexistência de agregados. O que diferencia, do ponto de vista estrutural, essas categorias de solo é o fato de, nos solos residuais jovens, pacotes de argila se fazerem presentes com frequência, o que não afetará as análises a seguir.

Lambe (1958) apresenta que, ao estudar solos sedimentares – solos que guardam certa relação estrutural com os solos residuais jovens –, a compactação no ramo seco tende a conduzir o solo a uma estrutura floclada, enquanto a compactação no ramo úmido o conduz a uma estrutura dispersa. O autor aponta ainda que a orientação das partículas é ampliada com a energia de compactação, o que não permite fazer um paralelo direto com a estrutura dos solos residuais jovens, pois esta depende em larga escala da microestrutura da rocha de origem, a qual pode, no entanto, ser alterada por processos de molhagem e secagem dos solos expostos.

Altschaeffel e Lowell (1969) e Seed et al. (1960), citados por Rico e Del Castillo (1976) mostram que um solo compactado no ramo seco, portanto, com estrutura mais floclada, segundo a teoria de Lambe (1958), apresenta maior expansão e menor contração que os solos com maior orientação de partícula e compactados no ramo úmido. Portanto, apesar de os mecanismos de expansão e contração estarem também ligados às variações da energia proveniente da sucção e/ou capilaridade, é possível entender que os solos saprolíticos, quando

dotados de estrutura orientada das partículas, mostram-se mais propensos à contração que à expansão, a depender, como mostra Le Roux (1973), citado por Camapum de Carvalho et al. (1987), da distância entre partículas. Salienta-se que a energia de contração atuante por redução da umidade do solo pode atingir valores semelhantes ao da energia Proctor intermediário, como mostra Camapum de Carvalho (1985).

Essa análise da influência da estrutura predominante nos solos saprolíticos, fazendo-se um paralelo com os solos compactados nos mecanismos de expansão e contração, é relevante, pois ela pode, entre outros desdobramentos: conduzir a processos de fissuramento do solo em taludes, facilitando a infiltração da água e sua ruptura; reduzir a resistência do solo com a expansão, facilitando processos de ruptura nos taludes de borda de reservatório; contribuir para uma menor infiltração da água da chuva e maior escoamento superficial quando da contração, potencializando a erosividade da água da chuva.

Qualquer que seja o nível de intemperização do maciço, fatores como a topografia, geomorfologia e clima serão sempre relevantes para o surgimento e evolução dos processos erosivos, intervindo nos mecanismos de fluxo em meio saturado e não saturado e nos fenômenos de contração e expansão.

3 Aspectos químico-mineralógicos e as erosões de borda de reservatório

Nos cenários em análise, as bordas de reservatórios, as particularidades dos solos saprolíticos e mesmo das rochas alteradas são relevantes, pois, com a construção do reservatório, o material de margem geralmente passa a interagir com fluidos de natureza distinta da original, seja devido à qualidade da água do reservatório, seja devido à ocupação do solo para uso agrícola e urbano próximo às margens. Com isso, as alterações de umidade e química do meio podem potencializar os riscos de erosão de margem dos reservatórios.

Essa alteração química do meio pode ainda afetar a estabilidade dos solos profundamente intemperizados, fragilizando as agregações e as junções entre elas e, portanto, potencializando os riscos de erosão laminar e a formação de sulcos ravinas e voçorocas.

A Tabela 2 apresenta a composição mineralógica de um perfil de solo típico do Distrito Federal (CARVALHO, 1995).

Tabela 2. Propriedades químico-mineralógicas de um perfil de intemperismo.

Parâmetro	Profundidade (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH em água	5,7	5,7	5,7	5,7	5,6	5,4	5,5	5,5	5,5	4,8
pH em KCl	5,1	6,1	6,4	6,3	5,8	4,8	4,1	3,9	3,8	3,5
PCZ	4,5	6,5	7,1	6,9	6	4,2	2,7	2,3	2,1	2,2
% de gibbsita	39,2	41,7	38,7	43,3	36,6	27,1	9,1	3,7	0	0
% de hematita	6,8	6,9	6,7	10,1	10,8	14,1	14,4	13,7	11,9	14,1
% de goethita	3,5	3,4	4,7	4,4	0	0	0	0	0	0
% de caulinita	8,3	6,9	5,4	8,7	11,7	17,5	27,1	41,1	30,9	37,1
% de ilita	0	0	0	0	0	6,9	5,7	7,9	7,1	11,2

Nessa tabela, são apresentados também os valores de pH obtidos por Delgado (2002), destacando-se que a redução do pH em KCl na primeira camada se deve provavelmente à maior presença de matéria orgânica conforme determinado. Utilizando-se os dados obtidos por Delgado (2002) para o pH em água e em KCl, foram determinados os pontos de carga zero (PCZ) para o perfil de solo, fazendo-se uso da equação 1 (KENG e UEHARA, 1974) (Tabela 2).

$$PCZ = 2 \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

Considerando-se os resultados apresentados na Tabela 2, a Figura 10-a apresenta os valores de PCZ em função dos respectivos teores de gibbsita, hematita + goethita e gibbsita + hematita + goethita, enquanto a Figura 10-b mostra os resultados de PCZ em função dos teores de caulinita e caulinita + ilita.

A Figura 10-a mostra que o PCZ não é diretamente afetado pela soma do teor de hematita mais goethita, mas depende diretamente do teor de gibbsita, e como a soma do teor de hematita e goethita é quase constante ao longo do perfil, sua incorporação apenas desloca a tendência verificada para a variação do PCZ em função do teor de gibbsita.

A Figura 10-b mostra que o PCZ diminui com o aumento do teor de caulinita e com o aumento do teor de caulinita mais ilita. Com isso, como o pH do solo em água (Tabela 2) é praticamente constante na zona de solo profundamente intemperizado, varia entre 5,4 e 5,7, exceto para o primeiro metro, devido à presença de maior percentual de matéria orgânica, e para o décimo metro, em que é igual a 4,8, e, inferior ao PCZ, é possível estimar que aumentos no pH do meio, seja a partir da água do reservatório, seja a partir da água proveniente de áreas agrícolas e de ocupação urbana, facilitará a ocorrência de processos erosivos ao fazer com que o solo passe por valores de pH semelhantes ao PCZ.

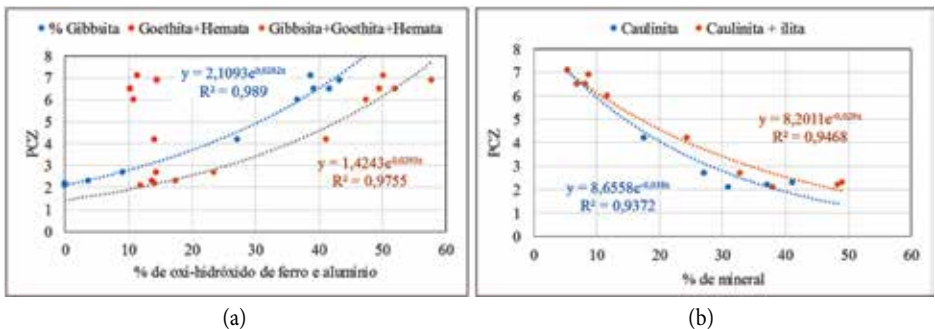


Figura 10. a) PCZ em função dos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio; b) PCZ em função do teor de argilomineral presente no solo.

Cabe destacar que Cardoso (1995), ao estudar a colapsividade de solos do Distrito Federal, concluiu que os solos profundamente intemperizados têm seu comportamento pouco ligado à sua origem residual ou transportada, dada a grande transformação químico-mineralógica e estrutural pela qual passou. É evidente que a mineralogia gerada, em especial a dos solos mais quartzosos em relação à dos solos mais argilosos, impacta sobre as propriedades e comportamento do solo e, portanto, sobre sua erodibilidade.

Embora os oxi-hidróxidos de ferro não tenham impactado nas análises de PCZ realizadas na Figura 10, cabe destacar que Cardoso (2002) mostrou que os oxi-hidróxidos de ferro são muito relevantes para a estabilidade estrutural dos solos tropicais e sua remoção afeta propriedades físicas como a textura e a plasticidade. Portanto, há que se prever que a presença desses óxidos e hidróxidos, assim como a sua remoção, afeta diretamente o potencial erodível dos solos profundamente intemperizados.

Essa breve análise aponta para a necessidade de se considerar as propriedades químico-mineralógicas dos solos que compõem o perfil de intemperismo tropical, assim como as suas especificidades estruturais, conforme se mostrou no item anterior, nas avaliações das erosões de margem dos reservatórios.

4 Aspectos biológicos e a erosão de borda de reservatório

Geralmente se busca estabelecer, e não sem razão, uma relação direta ou quase que direta entre a cobertura vegetal do solo e as erosões de borda de reservatório. No entanto, pouco se discute sobre a microfauna e sua relação com os processos erosivos.

Ao longo do processo de intemperização, as transformações químico-mineralógicas se fazem acompanhar de alterações estruturais nas quais assume relevante papel a ação biológica e microbiológica.

Para ilustrar a discussão, são apresentados a seguir alguns dos resultados obtidos por Valencia (2011), ao estudar o solo do primeiro metro do perfil discutido no item 3. O estudo foi conduzido buscando a melhoria do solo por meio de ação cimentante gerada por bactérias nativas alimentadas. No caso das erosões de borda de reservatório, o estudo assume relevância por alguns motivos, cabendo destaque: a) a saturação e o aumento da umidade do solo de borda do reservatório impactam diretamente nas bactérias nativas, pois, muitas delas, sendo aeróbicas, não suportarão a condição anaeróbica imposta; b) o uso dos solos de borda, sejam eles rurais ou urbanos, pode, ao intervir no meio, afetar a microfauna e contribuir para uma piora na estabilidade estrutural do solo; c) os resultados que serão apresentados apontam para a possibilidade de combate aos processos erosivos, por meio da alimentação das bactérias nativas, técnica que merece, no entanto, mais estudos, em especial no que tange aos eventuais riscos ambientais.

A Figura 11 (VALENCIA, 2011) mostra, ao se comparar o solo natural com o solo tratado com o nutriente B4 (15g de acetato de cálcio, 4 g de extrato de levedura, 5 g de glicose e 12 g de ágar, para 1 litro de água destilada, pH 8,0), que as bactérias nativas, ao serem alimentadas, propiciaram a cimentação do solo com certo fechamento dos poros.



(a)



(b)

Figura 11. a) Estrutura do solo natural sem tratamento, b) Estrutura do solo com tratamento. 50 vezes de aumento (Valencia 2011).

Os ensaios de colapso duplo oedométricos realizados mostraram (Figura 12, VALENCIA, 2011) que a estrutura do solo se tornou mais estável, o que aponta para o fato de que, nos solos naturais, a maior ou menor ação bacteriana contribuiu para a maior ou menor estabilidade estrutural do solo.

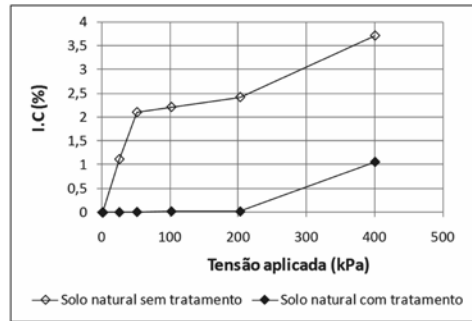


Figura 12. Índice de colapso por inundação no solo natural (Valencia 2011).

De modo semelhante, os cimentos gerados contribuíram para o aumento da resistência do solo, como mostra a Figura 13 (VALENCIA, 2011).

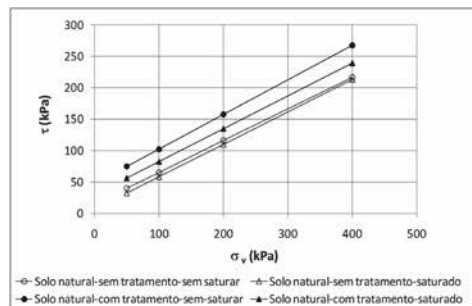


Figura 13. Resultados resistência ao cisalhamento direto do solo natural (Valencia 2011).

Essa melhoria do comportamento mecânico do solo se reflete diretamente na melhoria do comportamento do solo frente à erosão, como mostra a comparação das Figuras 14 e 15, obtidas para amostra não tratadas e tratadas respetivamente, quando da avaliação da desagregabilidade do solo por efeito da inundação.

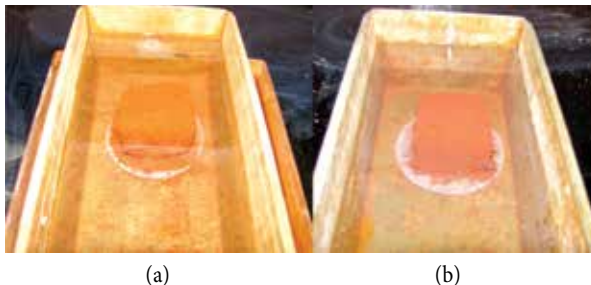


Figura 14. Ensaio de desagregação no solo natural, a) Imersão total, b) Imersão parcial (VALENCIA, 2011).

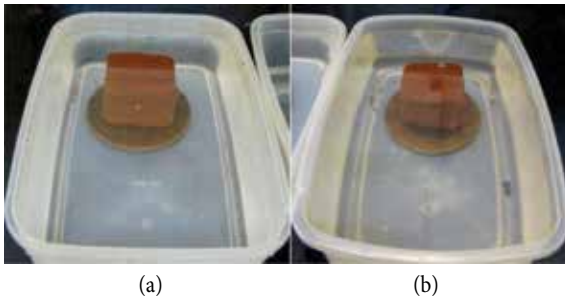


Figura 15. Ensaio de desagregação no solo natural com tratamento, a) Imersão total, b) Imersão parcial (VALENCIA, 2011).

Outro aspecto relevante que se relaciona à melhoria do comportamento do solo diz respeito às análises de contração realizadas sobre o solo natural e tratado. A Figura 16 relaciona o índice de vazios (e) do solo, calculado a partir do método da balança hidrostática e a umidade (w) respectiva dos corpos-de-prova, onde se observa que, quando o solo é secado, o índice de vazios do material sem tratamento é menor que no material com tratamento, confirmando a maior contração do solo não tratado ao secar. Além disso, os resultados do ensaio de porosidade apontaram para um menor volume dos vazios no solo sem tratamento, quando secado o material (Tabela 3). Tal aspecto pode, do ponto de vista geotécnico, ser considerado positivo, pois, além de minimizar o risco de trincas de retração, contribui para a estabilidade do maciço.

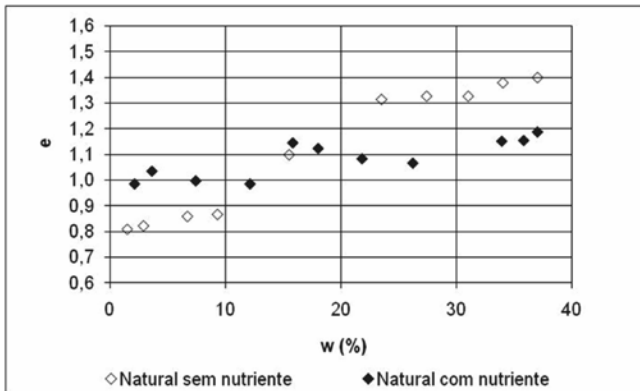


Figura 16. Relação índice de vazios (e) e umidade para o solo natural (VALENCIA, 2011).

Tabela 3. Resultados ensaio porosímetro de nitrogênio para o solo natural.

	Sem nutriente	Com nutriente	Sem nutriente	Com nutriente
w (%)	0	0	18	18
Volume intragregados (cm ³)	0,0125	0,0258	0,0150	0,0124
Volume intergregados (cm ³)	0,7979	0,9242	0,6847	0,6104

Os resultados do ensaio de *pinhole test* são de grande relevância, pois, no rebaixamento do nível d'água do reservatório, sempre pode ocorrer esse tipo de processo. Este ensaio mostrou que o tratamento atuou de maneira eficiente no solo, diminuindo as vazões, assim como fez com que se tivesse uma menor diferença entre a carga e a descarga (Figura 17), apontando para o fechamento dos poros gerado pelo melhoramento, o que proporciona maior estabilidade estrutural, eliminando o risco de eluviação ou esqueletização do maciço.

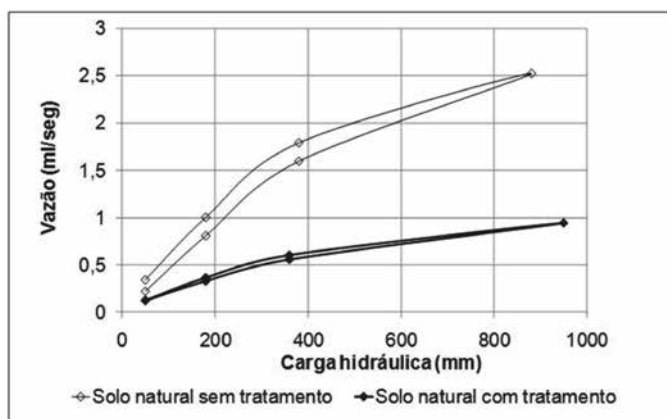


Figura 17. Resultados do ensaio de *pinhole test* no solo natural (VALENCIA, 2011).

Essas análises de melhoria do comportamento dos solos, recorrendo-se ao emprego das próprias bactérias nativas, mostram, por um lado, a importância de manter a microfauna presente no solo e, por outro, a possibilidade de mitigar ou evitar processos erosivos de margem de reservatório por meio da técnica de biomineralização, o que, por sua vez, merece estudos mais aprofundados em relação a eventuais impactos ambientais, pois os estudos até aqui conduzidos têm foco predominante nas questões técnicas. O olhar ambiental tem se voltado apenas para a não introdução de micro-organismos estranhos ao meio.

5 Considerações finais

As análises apresentadas neste capítulo mostram a importância de se considerar as características estruturais e as propriedades químico-mineralógicas quando se avalia as erosões de borda de reservatório.

Nos solos saprolíticos, as orientações de partículas podem, dependendo da orientação, potencializar os riscos de rupturas de taludes, assim como a erodibilidade do solo frente às condições ambientais. A mineralogia desses solos, com argilominerais mais ou menos expansivos, também implica sua maior ou menor erodibilidade e maior ou menor risco de ruptura de taludes.

Nos solos profundamente intemperizados, solos lateríticos, as análises realizadas mostraram que as avaliações microestrutural e da composição químico-mineralógica dos solos são relevantes na avaliação de sua erodibilidade e riscos de erosão.

As análises apresentadas sobre a biomineralização dos solos a partir das bactérias nativas neles presentes não só se revestem de importância nos estudos de erodibilidade dos solos como apontam para uma técnica inovadora de combate aos processos erosivos de margens de reservatórios.

Referências

ALTSCHAEFEL, A.G.; LOWELL, Jr. C.W.. **Compaction variables and compaction specification**. Purdue University Engineering Reprints, 1969.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.. **Etude du comportement mécanique d'une marne compactée**. 1985, 200 fl. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, INSA-Toulouse.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CRISPEL, J.J.; MIEUSSENS, C.; NARDONE, A.. Reconstituição de corpos de prova em laboratório. **Relatório de pesquisa LPC N°145**. INSA-UPS Toulouse, France. 90p., 1987.

CARDOSO, F. B. F.. Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. **Publicação G.DM-026A/95** – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1995, 140 fl.

_____. Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central brasileiro. Tese Doutorado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. **Publicação G.TD-009A/02** – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002, 357 fl.

CARVALHO, M.N.. **Seminário da disciplina Geotecnia dos Solos Tropicais**. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1995, 6p.

CHAGAS, C.S.; CURB, C.; DUARTE, M.N.; MOTTA, P.E.F.; LIMAS, J.M. (1997). Orientação das camadas de rochas metapelíticas pobres na gênese de latossolos sob cerrado. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, DF, 32(5): 539-548.

DELGADO, A.K.C.. **Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária**. Tese de Doutorado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Publicação G.TD-044A/07-- Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002, 392 fl.

GUIMARÃES, R. C.. Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. **Publicação G.DM-090A/02**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2002, 183 fl.

LAMBE, W.. The structure of compacted clay. **J. Soil Mechanics and Foundation**, ASCE, vol. 84, N° SM2, 1958, pp. 1654/1 – 1654/34.

LIMA, M.C.. Contribuição ao estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, **Publicação G.DM. 057A/99** – Universidade de Brasília, Brasília, 1999, 150 fl.

KENG, J.C.W.; UEHARA, G.. Chemistry, mineralogy and taxonomy of Oxisols and Ultisols. **Proceedings Soil and Crop Science Society of Florida**, 1974, 33: 119-126.

RICO, A.; DEL CASTILLO, H.. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres – Carretera, Ferrocarriles y Aeropistas**, Mexico: Editorial LIMUSA. Vol. 1, capítulo 4, 1976, pp. 153-234.

SEED, H.B.; MITCHEL, J.K.; CHAN, C.K.. **The strength of compacted cohesive soils. In: Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. ASCE**. Universidad de Colorado, 1960.

TSUTSUMI, M.. Formação dos solos e formas das partículas e estruturas dos solos. **Apostila mecânica dos solos I**. Juiz de Fora: UFJF – Faculdade de Tecnologia de Juiz de Fora, 2014.

VALENCIA, Y. G.. **Estudo da melhoria de um solo tropical a partir de técnicas biotecnológicas utilizadas em campo. Relatório de Pós-Doutorado**. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF e Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 42p., 2011.

CAPÍTULO 11

Ensaio aplicado ao estudo de erosões nas bordas e áreas do entorno de reservatórios

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Joel Roberto Guimarães Vasco
Tania Mariela Matamoros Sevilla
Carlos Alberto Lauro Vargas
Marlon Silva Schlieve
Alex Vaz de Menezes
Janaina Tatto

Palavras-chaves: Ondas. Canal hidráulico. Inderbitzen. Pinhole. Desagregação.

1 Introdução

A operação do reservatório de uma barragem pode provocar, em suas bordas, desestruturação e perda de massa do solo devido aos ciclos de umedecimento e secagem ocasionados por mudanças do nível de água, bem como ao impacto das ondas provocadas pelo vento. Além disso, nas áreas em seu entorno, processos erosivos ocorrem devido ao escoamento superficial e ao fluxo interno de água, intensificados por meio do uso indevido das margens pela população ribeirinha e pela exploração inadequada de áreas de empréstimo durante a construção do reservatório.

A desestruturação e a consequente perda de massa do solo ocasionam assoreamento dos reservatórios, reduzindo sua capacidade produtiva e, por consequência, sua vida útil. Além disso, podem resultar em movimentos de massa e instabilidade das estruturas construídas no entorno dos reservatórios.

Diante desse cenário, é importante compreender o comportamento dos solos situados no entorno dos reservatórios quando submetidos às ações da água, conforme mencionado anteriormente. Para isso, é necessária a execução de diversos ensaios que permitem quantificar ou qualificar a resposta do solo aos processos erosivos.

Dessa forma, neste capítulo, serão abordados os diversos ensaios executados para avaliar a erodibilidade dos solos situados no entorno de reservatórios. Os ensaios serão divididos em duas categorias: os que são executados para estudar a erosão na borda do reservatório e os que são executados para estudar a erosão no seu entorno.

2 Erosões em bordas de reservatório

Para auxiliar o estudo de erosão na borda do reservatório, neste item, apresenta-se a metodologia do ensaio de desagregação, a fim de verificar a estabilidade estrutural do solo frente à ação do ciclo de enchimento e esvaziamento do reservatório. Apresenta-se também

o ensaio de *Inderbitzen*, utilizado em grande escala no estudo de erosão devido à ação das ondas geradas pelo vento nas margens dos reservatórios.

2.1 Erosões devido ao impacto das ondas nas bordas dos reservatórios

O impacto de ondas em taludes situados nas bordas dos reservatórios causa instabilidade e geralmente ocorre devido a alguns fatores, tais quais: a ação dos ventos, a variação brusca de vazão e movimentações de embarcações. Reservatórios com extensa área superficial sofrem ação de ventos, devido à formação de uma pista no sentido da onda, chamada de *fetch*, que propicia a geração de ondas.

De acordo com Fernandez e Fulfaro (2000), a onda atinge diretamente a margem do reservatório, havendo um corte na parte inferior e formação de ressalto na parte superior. O deslizamento do beiral ocorre quando há um corte extremo no pé da margem. Os blocos fahlhados permanecem no pé da encosta até se desintegrarem e os sedimentos serem removidos pelas ondas.

Segundo Volker e Henry (1988), os processos de erosão marginal e de transformação de encostas são dinâmicos e mudam com o tempo. A importância de cada item no processo de erosão varia para cada reservatório. São eles: morfologia e geologia da encosta, topografia e profundidade do reservatório, condições meteorológicas, regime de ondas procedimentos operacionais, mobilidade dos sedimentos, atividades antropogênicas e erosão do leito de fundo.

Fernandez e Fulfaro (2000) analisaram erosões em bordas do reservatório de Itaipu entre julho de 1993 e março de 1995 e observaram que a precipitação e a variação do nível do reservatório são dois fatores que influenciam na ocorrência dessas erosões. Nesse caminho, Volker e Henry (1988) citam que a amplitude e a velocidade da flutuação do nível de água do reservatório influenciam diretamente no volume de sedimentos ocasionados pela abrasão das ondas. Uma mudança brusca do nível dos reservatórios causa um estresse hidrodinâmico do fluxo e poropressão na encosta. Os reservatórios que apresentam ciclos de cheias mais frequentes são os maiores afetados pela abrasão por ondas, e os que possuem ciclos maiores levam maior tempo, até décadas, para apresentar modificações nas encostas.

A seguir, será apresentada uma revisão da literatura acerca dos mecanismos de formação e transformação da onda, quando da propagação por fundos inclinados, e serão descritos os ensaios utilizados para estudos de erosões em bordas de reservatório, resultantes do efeito das ondas de ventos e da flutuação do nível do reservatório.

2.1.1 Processo de formação das ondas

Ondas mecânicas são geradas a partir de uma perturbação em um meio, propagando-se com certa velocidade. As ondas em meios líquidos, observadas em uma praia ou formadas em um lago natural ou artificial, são principalmente geradas pela ação contínua do vento sobre a superfície/espelho d'água. Nesse cenário, o vento é o mecanismo perturbador, transferindo quantidade de movimento à coluna líquida devido à presença da camada limite na interface ar-água. Embora descrito de maneira simplificada, o mecanismo de transferência de quantidade de movimento do vento para o meio líquido ainda não é totalmente compreendido.

Em um primeiro momento, as ondas assim formadas são denominadas de ondas capilares, possuindo baixas amplitudes, frequências na ordem de 10^0 a 10^1 Hz (U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1984) e ação restauradora em razão da tensão superficial do fluido. Quanto mais a coluna líquida é sensibilizada pela ação do vento, o volume de água deslocado vai se tornando maior, até que o peso relativo dessa massa líquida em trânsito vence a força capilar da água, tornando, então, a onda em gravitacional. À medida que essa massa de água chega à crista da onda, o seu próprio peso a impulsiona para o vale da onda, repetindo essa dinâmica até a condição de equilíbrio ser restabelecida.

A modelagem das ondas gravitacionais esbarrou, por várias vezes, em dificuldades intrínsecas ao fenômeno. Entre as dificuldades, destacam-se o acoplamento entre onda e corrente, o efeito da camada limite e a imposição das condições de contorno na superfície livre, que é uma das variáveis do problema. Uma das primeiras investigações teóricas deve-se a Barré de Saint-Venant apud U.S. Army coastal engineering research center (1984), no começo do século XIX.

Em meados do século XIX, Airy publicou a conhecida teoria linear, teoria de ondas de pequena amplitude ou teoria de Airy. Essa teoria baseava-se na solução da equação de Laplace para o potencial de velocidades, assumindo, portanto, a irrotacionalidade e a incompressibilidade do meio fluido. Além disso, a teoria de Airy também adota outras hipóteses de simplificação, como considerar que as ondas são pequenas perturbações na superfície livre de um fluido em repouso. A onda resultante da teoria de Airy é regular, periódica, com altura e período constantes. Em termos de nomenclatura, alguns dos termos citados (e outros) podem ser vistos na Figura 1.

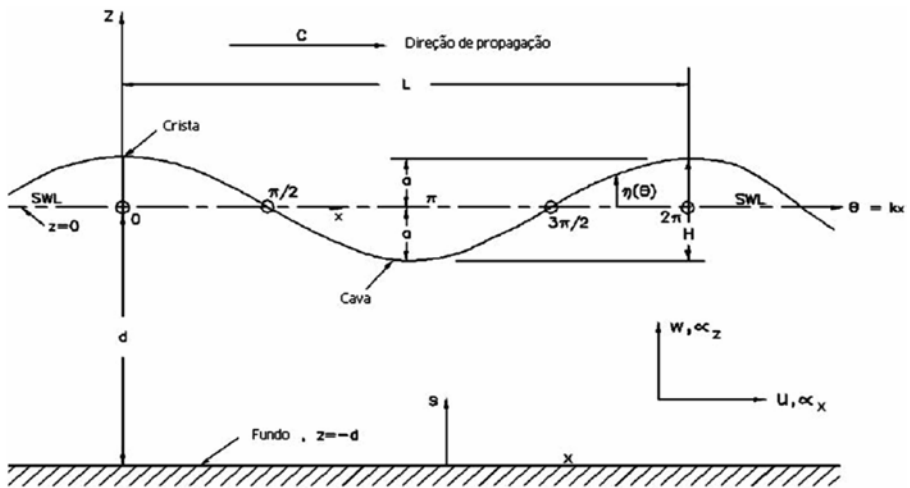


Figura 1. Onda resultante da teoria de Airy e suas principais características. (Fonte: Adaptado de U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984).

Sendo que crista é a ordenada de maior valor; cava é a ordenada de menor valor; a é a amplitude da onda ($H/2$); L é o comprimento de onda (distância entre duas cavas ou cristas sucessivas); T é o período (tempo de passagem entre duas cristas ou cavas sucessivas, em um determinado ponto); c é a celeridade da onda (L/T); k é o número de onda ($2\pi/L$); w é a fre-

quência angular ($2\pi/T$); θ é o ângulo de fase ($kx - wt$) e d é a profundidade (distância entre o fundo e o nível médio).

No entanto, à medida que a profundidade relativa diminui (d/L), aspectos não lineares alteram a forma da onda, tornando-a irregular. As primeiras abordagens sobre ondas irregulares são devidas a Stokes apud Dean; Dalrymple, (1991), que quantificou em seu trabalho termos desprezados por Airy, formulando a teoria de onda de amplitude finita. Posteriormente, Boussinesq apud Dean; Dalrymple (1991) melhorou a aproximação de Barré de Saint-Venant e propôs uma aproximação de ondas longas que levava em consideração a curvatura das linhas de corrente. Enquanto Saint-Venant baseava sua teoria na hipótese de escoamento por camadas com distribuição hidrostática de pressões, Boussinesq supunha uma curvatura (pequena, mas não nula) dos filetes fluidos, considerando, portanto, a aceleração convectiva do escoamento. Surge assim a teoria da onda solitária, fenômeno identificado em ensaios experimentais por Scott Russell apud U.S. Army coastal engineering research center (1984).

Korteweg e De Vries apud U.S. Army coastal engineering research center (1984) modificaram a formulação de Boussinesq e apresentaram uma segunda teoria de ondas longas com curvatura das linhas de corrente. Esses autores, integrando suas equações com a hipótese de periodicidade, obtiveram uma solução cnoidal. Essa solução contemplava também a onda solitária de Boussinesq, no limite em que o comprimento de onda tende para infinito. Estava consolidada a chamada teoria da onda cnoidal. A Figura 2 ilustra a região de aplicação de cada teoria de onda.

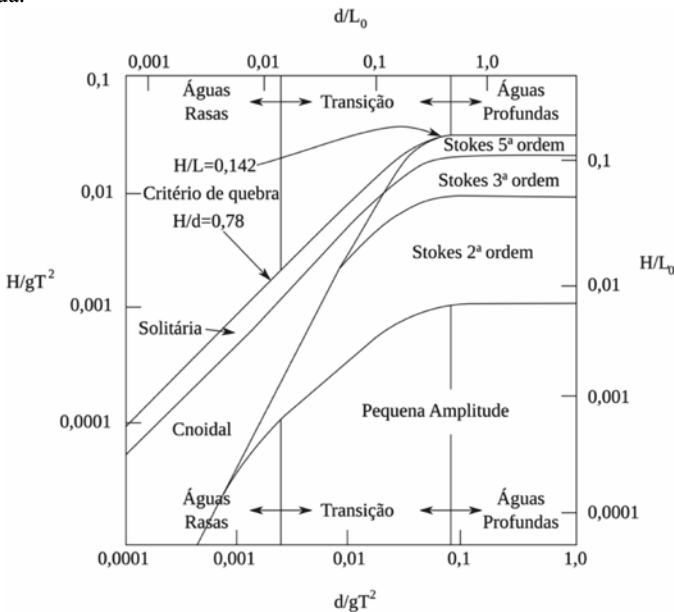


Figura 2. Regiões de aplicabilidade das teorias de onda. (Fonte: Adaptado de Kamphuis, 2010).

Independente da teoria de onda, percebe-se que, assim que a profundidade relativa diminui, a onda passa por alterações em sua forma até redundar em sua quebra. A quebra da onda se dá em praias ou na margem desprotegida de um lago de um reservatório de barragens. Dessa forma, a ação contínua da onda altera a conformação desses contornos, fenôme-

nos estes de difícil análise e quantificação. Serão apresentadas, nas seções seguintes, abordagens científicas para quantificar e prevenir os problemas relacionados à incidência de ondas em margens de reservatório.

2.1.2 Canal hidráulico para estudo das ondas

O efeito de ondas em margens desprotegidas de reservatórios pode ser investigado, experimentalmente, em um canal de ondas, desde que os aspectos hidrodinâmicos sejam fidedignos ante a observação em campo. Dificuldades aparecem nessa representação, uma vez que as ondas, no referido cenário, adquirem uma componente aparentemente aleatória, com alturas e períodos que são variáveis no tempo e no espaço. A Figura 3 ilustra um típico registro de elevação da superfície livre ao longo do tempo.

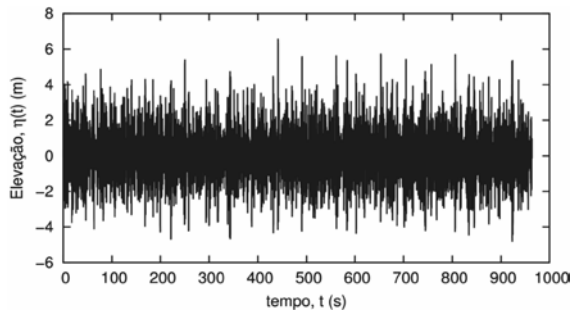


Figura 3. Registro típico de uma boia (ou sonda) ilustrando a variação da posição da superfície livre no tempo.

Além da variabilidade espaço-temporal das ondas, há limitações geométricas do canal para o tipo de onda gerada. Por exemplo, como reproduzir uma onda observada em campo de 1,0m em um canal de 0,6m de altura? Ou como reproduzir a propagação de ondas em uma profundidade de 30m no mesmo canal de 0,6m de altura? Surge, dessa forma, a necessidade de realização de ensaios em um modelo, em uma escala que contemple aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos do protótipo a ser ensaiado.

Abordam-se, na sequência, as ondas irregulares e as leis de semelhança para relacionar modelo e protótipo.

2.1.2.1 Ondas irregulares

O estado do mar, embora pareça caótico, pode ser visto como uma superposição de ondas lineares com direção, altura e períodos constantes, mas diferentes entre si. Tal superposição é possível diante da linearidade da equação motriz do fenômeno, que desconsidera a viscosidade do meio líquido. Definir os parâmetros de uma onda irregular, como a ilustrada na Figura 3, passa por uma análise estocástica, assumindo que o sinal registrado (amostra) é representativo do período observado (população). Ainda, de acordo com o Teorema Central do Limite, a distribuição das médias de uma amostra segue a distribuição normal. Isso signi-

fica que as alturas médias também seguem a distribuição normal. Já a altura máxima segue a distribuição de Rayleigh. A Figura 4 mostra a distribuição das alturas médias e máximas, para o registro hipotético da Figura 3.

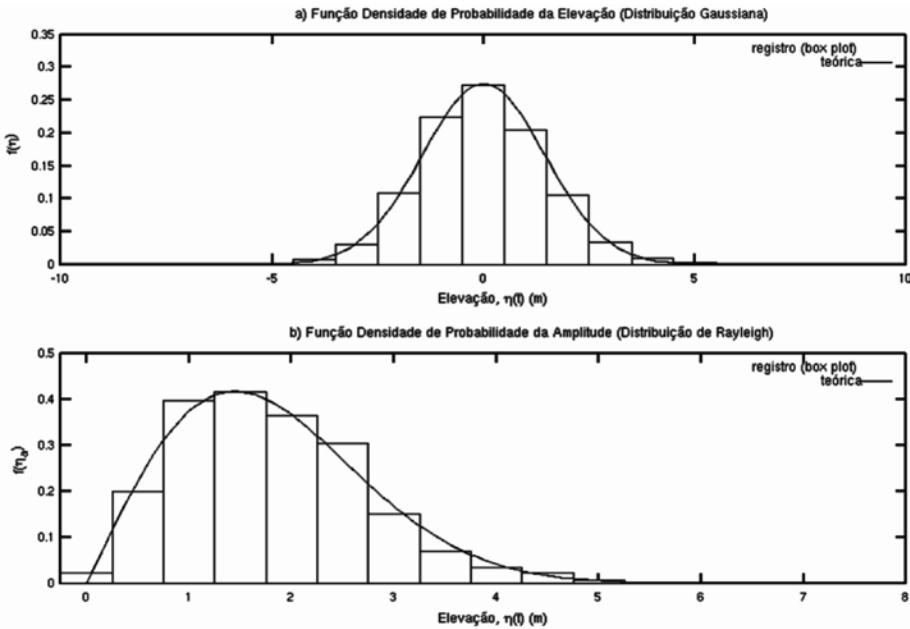


Figura 4. Distribuições normal e Rayleigh para a elevação e a amplitude máxima, respectivamente.

Diante da variabilidade das ondas irregulares, valores definidos de altura e período são escolhidos como representativos de um registro. O parâmetro de altura de onda convencionalmente característico é a altura significativa (H_s), que corresponde à média do terço superior em um trem de ondas. Em relação ao período, o período de pico (T_p) é responsável pela maior concentração energética em um trem de ondas (KAMPUIS, 2010; DEAN; DARYMPLE, 1991).

Sendo assim, de maneira simplificada, reproduzir um estado de agitação em laboratório passa pela geração de ondas com alturas significativas e períodos de pico iguais.

2.1.2.2 Leis de semelhança

De modo a garantir, em um modelo, aspectos representativos de um protótipo, primeiramente, elencam-se todas as variáveis intervenientes no fenômeno. Posteriormente, a partir da aplicação do Teorema de Buckingham (STREETER, 1982), obtêm-se grupos adimensionais que relacionam as variáveis e o sistema pró-base escolhido. Garante-se tanto a semelhança geométrica quanto a cinemática e a dinâmica entre modelo e protótipo quando todos os grupos adimensionais gerados são iguais. Tal tarefa, no entanto, mostra-se impossível para a maioria dos casos, resultando em modelos com semelhança incompleta. Nesse caso, apenas os efeitos principais do fenômeno são semelhantes entre modelo e protótipo.

Em se tratando de ondas gravitacionais, o grupo dimensional característico é o número de Froude (Fr). Igualando o número de Froude entre modelo e protótipo, grandezas relacionadas às dimensões lineares (altura da onda, profundidade) guardam a proporção da escala (n). Já as grandezas relacionadas ao tempo (período) e velocidade guardam a proporção da escala elevada a meio ($n^{1/2}$). Dessa forma, sabendo-se das limitações do gerador de onda e da precisão das sondas capacitivas, definem-se as escalas máximas e mínimas permitidas no canal experimental.

Exemplificando o parágrafo anterior: para uma potência e período de onda conhecidos, a altura máxima de uma onda gerada no canal é de 0,10m. Nessas condições, qual a escala adequada para o canal experimental? Se a sensibilidade hipotética das sondas capacitivas for de 0,01m, a altura mínima da onda a ser gerada no canal é de 0,02m. Sendo assim, para uma onda de altura significativa de 1,5m, a faixa possível para a escala a ser escolhida é de 15 a 75. Analisando-se o período de pico, caso o gerador seja limitado a ondas de 2,0 a 0,7s, uma onda de 5s resultaria em uma escala entre 6,25 e 51,02. Entre as opções, a escolha de uma escala de 1:6 atenderia às limitações experimentais apresentadas.

2.1.3 Ensaio de erosão por impactos de ondas

Com o intuito de verificar o efeito das ondas provocadas pelo vento nos solos situados na borda de reservatório, fez-se necessária a criação de um equipamento que permitisse a simulação da onda (canal hidráulico) e a perda de massa do solo sujeito aos efeitos da onda.

Nesse caminho, Tatto (2014) propôs a criação de um equipamento para realização de ensaios de erosão por impactos de ondas, composto de um canal hidráulico, um sistema de geração de ondas e uma rampa ao final do canal, em que é colocada a amostra a ser ensaiada, além de um sistema de abastecimento e esgotamento de água. O equipamento é apresentado na Figura 5.

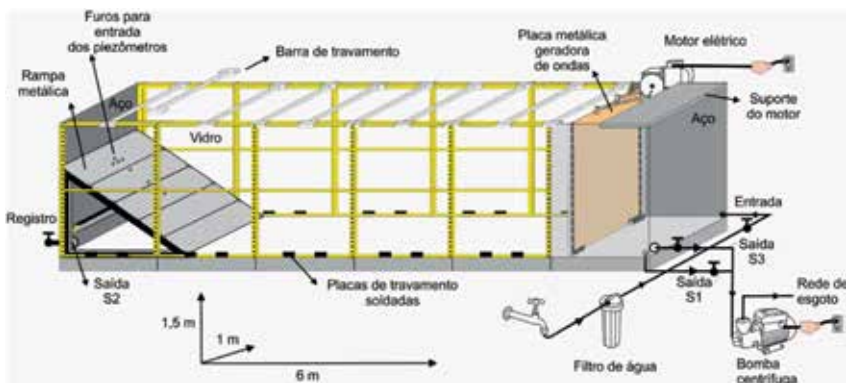


Figura 5. Equipamento para ensaios de erosão por impactos de ondas (Tatto, 2014).

O equipamento é formado por chapas de aço nas extremidades e painéis de vidro temperado nas laterais, sendo que a espessura do vidro foi obtida com base na NBR 7199 (ABNT, 1989) e em FNZAS (2011). A altura do canal (1,5m) foi estabelecida em função do somatório

da altura da lâmina de água, da altura da onda formada e de uma sobre altura de segurança. A largura foi estabelecida para que uma pessoa pudesse ter o mínimo de mobilidade dentro do canal (1m). A extensão (6m) foi a máxima obtida em função do espaço disponível.

O sistema de abastecimento e de esgotamento de água é formado por uma entrada e três saídas de água da rede pública na parte inferior do canal. Para eliminar algum material oxidado proveniente da tubulação de água do prédio, foi utilizado um filtro de água na parte externa do canal. Uma bomba centrífuga foi instalada em uma das saídas para a retirada de 85% da água do interior do canal durante seu esvaziamento. O restante da água (15%) era retirado com a ajuda de um aspirador industrial, sendo também possível a coleta do material erodido depositado no fundo do canal.

O sistema gerador de ondas é composto por uma placa móvel metálica do tipo *flap*, conectada numa calha fixada na base do canal (Figura 6a). A placa tipo *flap* é ligada a um motor elétrico por duas hastes conectadas a discos localizados na saída do redutor (Figura 6b), o qual, devido a sua rotação, é o responsável pela geração das ondas.

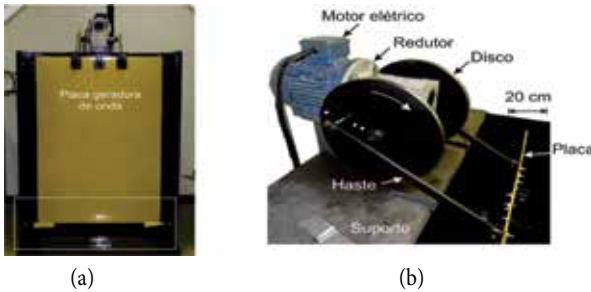


Figura 6. Sistema gerador de ondas: a) placa geradora de onda tipo *flap*; b) motor elétrico (Tatto, 2014).

Tatto (2014) simulou o efeito da onda em bordas de reservatórios constituídos de vários materiais (solo, filtro, geotêxteis e RCD-R). A seguir, será descrita, sucintamente, a metodologia para a execução do ensaio com a borda constituída de solo e RCD-R para a camada de *rip rap*. Nesse caso, para a construção do talude, o solo era colocado sobre a rampa por meio de uma pá metálica, com uma altura mínima de queda do solo para se obter um maciço fofo (Figura 7a), enquanto o RCD-R era colocado manualmente sobre o solo (Figura 7b).

Antes do enchimento, o fundo e as laterais do canal eram limpos para retirar o solo fino proveniente da construção do talude. Após o enchimento, deixava-se a água em repouso por 24h para a saturação do talude. Após esse tempo, ligava-se o sistema gerador de ondas.



Figura 7. Montagem do talude: a) colocação do solo; b) colocação do RCD-R.

Na Figura 8, é apresentado o equipamento com o ensaio em execução. O motor elétrico era desligado e o ensaio finalizado quando o processo erosivo se encontrava muito avançado. Nesse caso, o impacto da onda não ocorria mais no talude, mas sim, na rampa metálica. Esvaziava-se o canal por meio de uma bomba centrífuga, e os últimos 100 mm de lâmina de água eram retirados com o aspirador industrial. O material retirado era colocado em baldes e esperava-se a sua deposição. Depois de 24h, o solo depositado (erodido) era levado para a estufa e obtida a sua massa. A remoção do RCD-R era manual e o solo aderido nele era coletado e levado para a estufa para posterior obtenção de sua massa. Vale ressaltar que o processo erosivo é iniciado na região de impacto das ondas, como apresentado na Figura 9a. Na ausência de filtros (geossintéticos ou naturais), 80% do solo foi erodido (Figura 9b).



Figura 8. Ensaio em execução (Tatto, 2014).



Figura 9. Imagens do talude ao término do ensaio: a) Processo erosivo iniciado na região do impacto das ondas; b) Talude ao término do ensaio.

O equipamento desenvolvido por Tatto (2014) não permite a execução de ensaios em amostras indeformadas de solo e a alteração da inclinação da rampa, que é fixa. Dessa forma, Menezes (2015) propôs um projeto de equipamento baseado no modelo de Tatto (2014), mas executando as adaptações necessárias para suprir essas limitações.

O modelo proposto por Menezes (2017) é composto dos seguintes elementos: canal hidráulico, gerador de ondas tipo *flap*, e rampa com variações de inclinações para porta-amostras. O equipamento possui 10m de extensão, devido ao limitado espaço físico do laboratório. A altura do canal (1,20m) foi estabelecida para possibilitar o acesso de forma segura e uma altura de lâmina d'água que garantisse a formação de ondas controladas necessárias para ensaios em amostras de solos, indeformadas ou deformadas, dentro do canal hidráulico.

A largura do canal é de 0,47m, o que permite mobilidade de uma pessoa para acomodação das amostras e retirada do material ensaiado. O modelo do equipamento é apresentado na Figura 10.

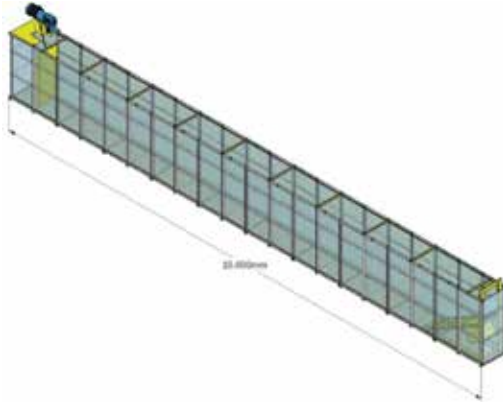


Figura 10. Canal hidráulico para ensaios de erosão por impactos de ondas (Menezes, 2017).

A rampa metálica é montada na extremidade do canal, sobre marcos de movimentação vertical e horizontal, de modo que a inclinação ($i, \%$) possa variar em quatro valores: 22,5, 30°, 45° e 60° (Figura 11). Na Figura 12, é apresentado o porta-amostras, que tem dimensões de 0,30 x 0,30 x 0,29 m (largura x comprimento x espessura), determinadas de acordo com as condições possíveis de extração de blocos de solo em campo quanto a peso e ergonomia.

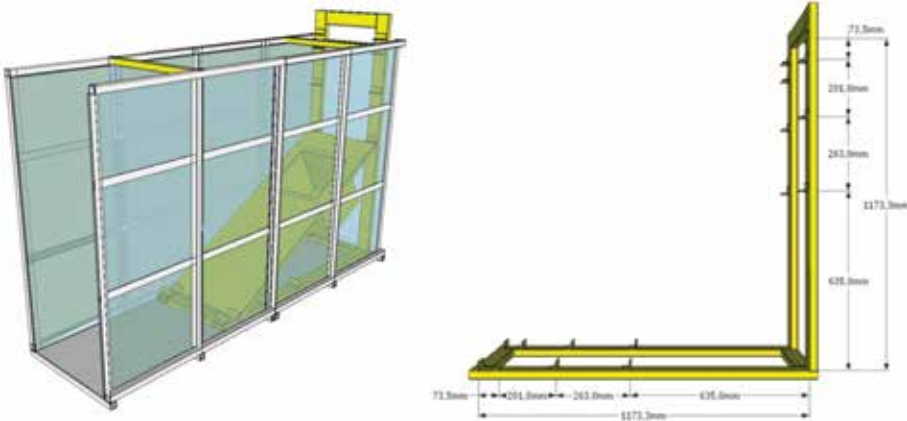


Figura 11. Desenho da rampa metálica com porta-amostras (Menezes, 2017).

O sistema gerador de ondas tipo flap, escolhido para a construção do canal hidráulico, baseado nos estudos de Souza e Morishita (2003), é formado por um motor elétrico, um redutor de frequência e um disco conectado ao eixo do motor, com acoplagem de uma haste móvel fixa a uma placa metálica, de dimensões 1,0m x 0,5m, articulada na base do canal, conforme consta na Figura 13.

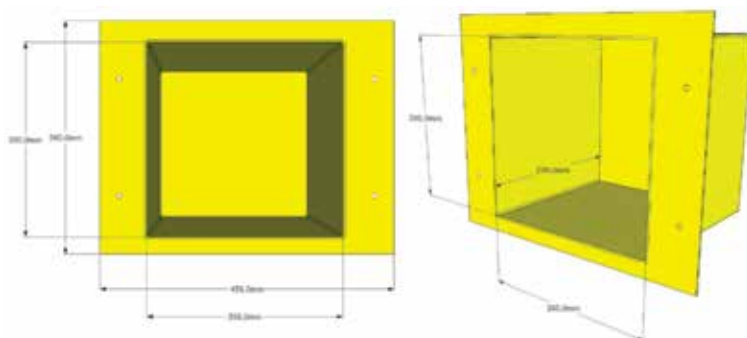


Figura 12. Porta-amostras para encaixe em rampa metálica (Menezes, 2017).

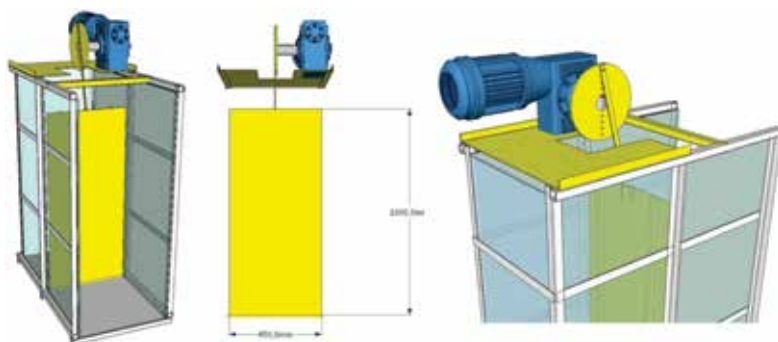


Figura 13. Gerador de ondas tipo flap com motor acoplado (Menezes, 2017).

Com essas modificações (porta-amostra e rampa com inclinação variável), o equipamento proposto por Menezes (2017) permite a execução de ensaios em amostras, deformadas e indeformadas, em diversas inclinações de taludes, sob combinações de frequências de ondas geradas e controladas por equipamento eletrônico (inversor de frequência), o que possibilita simular em laboratório várias situações de campo.

2.2 Erosões devido à variação do nível do reservatório

Em sistemas de geração predominantemente hídricos, nos quais são comuns duas ou mais usinas hidrelétricas em uma mesma bacia, a adoção de complexas técnicas de planejamento e operação é necessária em função dos múltiplos usos da água, por exemplo, geração de energia e controle de fluxo (COSTA et al., 2014).

A partir de dados diários de monitoramento, obtidos de usinas em operação, é possível avaliar a amplitude das variações de nível que ocorrem nos reservatórios. Os gráficos da Figura 14 mostram como variou o nível nos reservatórios das usinas hidrelétricas de Batalha e Itumbiara, enquanto a Figura 15 apresenta essas informações para a usina de Furnas. A usina de Furnas localiza-se no rio Grande, entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória, no Estado de Minas Gerais, e a cota máxima operacional do seu reservatório é 768m. A usina de Batalha está no rio São Marcos, entre os Municípios de Cristalina, no Estado

de Goiás, e Paracatu, em Minas Gerais, e a cota máxima operacional do seu reservatório é 800m. Já a usina de Itumbiara foi construída no rio Paranaíba, entre os Municípios de Itumbiara, no Estado de Goiás, e Araporã, em Minas Gerais, e a cota máxima de seu reservatório é 521m.

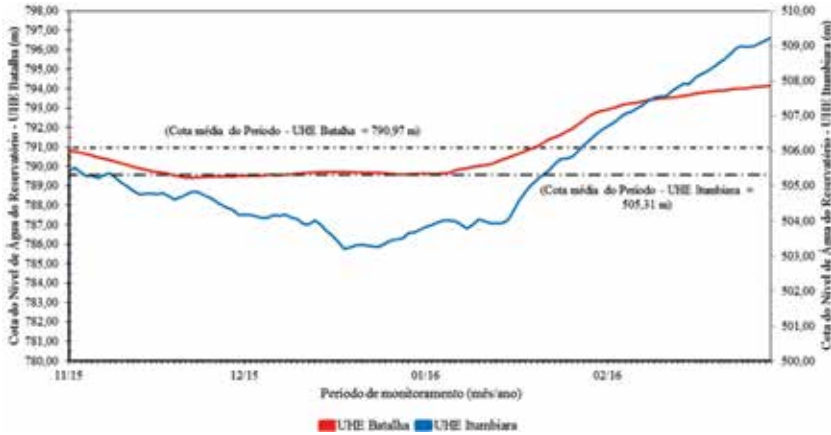


Figura 14. Variações do nível do reservatório da usina de Batalha (entre novembro/2015 e março de 2016) e da usina de Itumbiara (entre novembro/2015 e março de 2016).

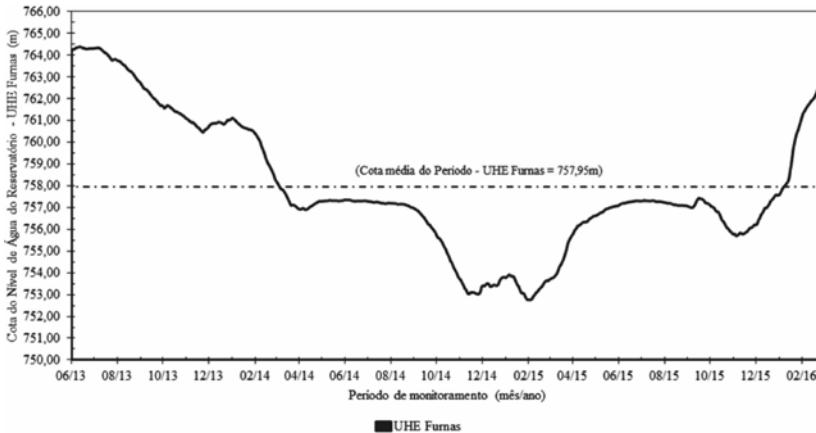


Figura 15. Variações do nível do reservatório da usina de Furnas, entre junho/2013 e março de 2016.

Ao longo de 2 anos e 8 meses, na usina de Furnas, a variação do nível do reservatório foi de 11,6m de profundidade; na usina de Batalha, a variação foi de 4,7m em 4 meses e, na Usina de Itumbiara, esse valor foi de 6,1m, ao longo de 4 meses. Vale ressaltar que, durante essas variações de níveis de água no reservatório, ocorrem variações climáticas, como precipitações e mudanças de temperatura, que alteram o perfil de sucção dos solos e mudam as propriedades físicas da água, interferindo, assim, de maneira relevante no processo de infiltração.

O efeito da variação do nível de água do reservatório na estabilidade estrutural dos solos que compõem suas bordas pode ser verificado a partir da execução de ensaios de desagregação, cuja metodologia será descrita a seguir.

O ensaio de desagregação consiste em verificar, qualitativamente, a estabilidade de uma amostra do solo frente à ação da água. O ensaio pode ser executado com inundação total ou parcial.

De acordo com Santos (1997), amostras cúbicas de solo, com 60mm de aresta, são submetidas à imersão total na água (Figura 16a) por um período de 24h e à imersão parcial (Figura 16b), na qual a amostra é colocada sobre uma pedra porosa e o nível de água mantido em sua base por 30 minutos e, em seguida, o nível de água é aumentado sequencialmente em 1/3 da altura da amostra, até atingir o topo, mantendo-se em cada posição por 15 minutos e, ao final, por 24h. No decorrer do ensaio, registram-se as observações quanto à desagregação do solo.

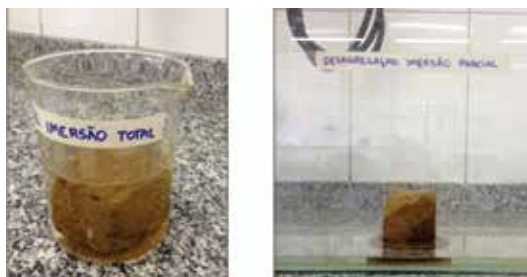


Figura 16. Ensaio de desagregação: a) imersão total; b) imersão parcial.

Terra et al. (2015) analisaram o fluxo de ar no solo durante o ensaio de desagregação por imersão total, a fim de permitir uma análise mais criteriosa dos ensaios e estabelecer um procedimento de ensaio mais adequado. Segundo os autores, quanto maior a carga hidráulica imposta no ensaio, maior é a poropressão de ar no centro da amostra, e conseqüentemente, menor é a tensão líquida, o que implica maior potencial de desagregação da amostra. Dessa forma, os autores recomendam que os ensaios devem ser executados com carga hidráulica conhecida e constante para todos os corpos de prova.

Holmgren e Flanagan (1977) afirmam que as amostras podem ser divididas nas seguintes categorias: a) sem resposta, quando a amostra se mantém intacta; b) abatimento, quando há formação de uma pilha de material desestruturado; c) faturamento, quando a amostra se quebra em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas; d) dispersão, quando as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma nuvem coloidal.

De acordo com Santos (1997), devido à baixa concentração de sódio na composição química dos solos lateríticos, dificilmente será apontada dispersão nessas amostras, visto que tal fato está relacionado à quantidade de cátions de sódio em relação à quantidade total de sais dissolvidos na água intersticial. O sódio age aumentando a espessura da dupla camada de água difusa, reduzindo a força de atração entre as partículas de argila, possibilitando a dispersão (ABNT, 1998).

De acordo com Jacintho et al. (2006), o ensaio de imersão total simula a inundação rápida de um talude. Se a fase de ar for contínua, ocorrerá pressão de ar positiva, e, se essa supera a coesão do solo, ocorrerá ruptura estrutural. Caso a inundação ocorra com a fase ar descontínua, não haverá instabilidade estrutural. Por outro lado, o ensaio de imersão parcial simula a ascensão lenta do nível de água em um talude e, nesse caso, a água ascende por capilaridade e o ar é expulso, diminuindo a desagregação do material.

Almeida et al. (2015) analisaram a influência do grau de saturação inicial de um Latossolo e de um Cambissolo na estabilidade estrutural deles frente à ação da água, por meio de ensaios de desagregação. Os autores observaram que, quanto menor o grau de saturação inicial do corpo de prova, maior a desestruturação e desprendimento de solo na base das amostras.

Esses resultados mostram a necessidade de executar ensaios em corpos de prova com distintos teores de umidade, visto que o solo situado na borda do reservatório sofrerá variações de teores de umidade, devido às variações climáticas a que está exposto, o que resultará em diferentes resistências à ação da água quando do aumento do nível do reservatório.

3 Erosões em áreas do entorno de reservatórios

Começa-se esta seção com uma questão: o que se deve saber a respeito do comportamento do solo em áreas do entorno de reservatórios que possa nos ajudar a compreender a evolução ou a ocorrência do processo erosivo? Nesse caso, é importante conhecer como as suas propriedades intrínsecas interagem com a água. Dessa forma, será possível prever se elas evoluíram, ao longo do tempo, com a operação do reservatório.

A seguir, apresentam-se três ensaios relacionados com a questão acima: o *Inderbitzen*, a partir do qual se pode obter informações do comportamento do solo quando submetido ao escoamento superficial; o ensaio furo de agulha, conhecido também como ensaio Pinhole, que pode fornecer informações sobre a dispersibilidade do solo e a suscetibilidade à erosão interna; e os ensaios para avaliação de erodibilidade por meio do método MCT (miniatura, compactado, tropical), que podem dar informações sobre a infiltrabilidade do solo e o seu comportamento frente à ação da água.

Esses ensaios foram aplicados no estudo de processos erosivos de borda do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Batalha, que obteve seu enchimento finalizado em março de 2014. O reservatório da UHE Batalha se localiza na bacia do rio São Marcos, que serve de limite entre os Estados de Goiás e Minas Gerais.

Foram estudados processos erosivos ocorrentes na margem esquerda do rio pertencente ao Município de Paracatu, Minas Gerais. Para a seleção dos locais de estudo, foram realizados uma análise de geoespacialização de um cadastro de processos erosivos e também um reconhecimento de campo. Esse trabalho prévio à coleta de amostras permitiu observar processos erosivos que apresentavam algumas características de recente evolução, tais como: marcas de batimento de ondas, movimentos de massa no perfil e água turva perto das margens devido a sedimentos em suspensão. A coleta foi realizada em área próxima à barragem onde podiam ser encontradas áreas de recente alagamento em consequência do enchimento do reservatório. Na Figura 17, apresenta-se um mapa da área estudada com os locais escolhidos para a amostragem (pontos T1, T2, T3 e T4).

Com o intuito de compreender melhor as evoluções dos processos erosivos de cada local, foram estudadas amostras na camada superficial e na camada a 3m de profundidade. A tendência à erodibilidade interna foi estudada mediante o ensaio de furo de agulha, realizado em amostras coletadas na superfície e na profundidade de 3m. Foi também avaliada a erodibilidade dessas amostras mediante a metodologia MCT. A tendência à erodibilidade superficial foi estudada mediante o Ensaio *Inderbitzen*, realizado em amostras coletadas na superfície.

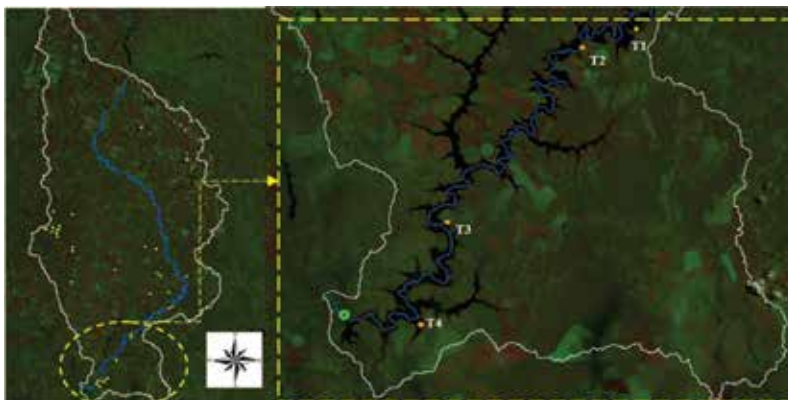


Figura 17. Área de coleta de amostras na UHE Batalha. (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

3.1 Ensaio de *Inderbitzen*

O ensaio de *Inderbitzen* foi criado em 1961 e é um método de avaliação de erodibilidade mediante a medida da taxa de perda de solo em uma área superficial. O ensaio consiste em determinar a quantidade de solo erodido em uma amostra de solo quando submetida a uma determinada vazão de água, inclinação da superfície e teor de umidade. A rampa inclinada deve ter uma superfície adequada para o escoamento sem interferência, sendo a vazão medida por um rotâmetro. O ensaio foi introduzido no Brasil no âmbito geotécnico, como ensaio de erodibilidade, e o esboço do aparelho foi enviado pelo LNEC, na década de setenta, para estudo de taludes com solo de alteração de gnaiss em São Paulo. O ensaio ressurgiu na década de noventa com a proposta de Fácio (1991).

As condições de preparação do corpo de prova e de execução do ensaio podem variar segundo o objetivo de estudo, e dependendo do estilo de aparelho construído ou encontrado no laboratório a ser executado. Nos primeiros estudos realizados no Brasil pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), em São Paulo, foram utilizados corpos de prova com dimensões de 15,24cm de diâmetro e 4,6cm de altura, vazões variando de 179 cm³/s a 314 cm³/s e inclinação da rampa entre 44 e 59 graus. Os ensaios eram realizados em corpos de prova na umidade natural, após ressecamento e embebedimento (FONSECA, 1981 apud BASTOS et al., 2000).

Fácio (1991) estudou processos erosivos em cidades satélites do Distrito Federal e utilizou cilindros de 10cm de diâmetro e 10cm de altura, submetidos às seguintes condições de ensaio: vazão de 50 cm³/s, inclinação de rampa de 10 graus, corpo de prova com embebedimento prévio de 15 min e tempo de escoamento superficial de 20 min. Santos (1997) estudou processos erosivos em Goiânia e utilizou condições de ensaio similares às de Fácio (1991), alterando apenas a vazão para 17,5 cm³/s e o tempo de execução do ensaio para 30 min. Almeida et al. (2015) estudaram erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis (GO) e utilizaram corpos de prova prismáticos de base quadrada com lados de 10cm e altura de 5cm, submetidos à vazão de 50 cm³/s, com inclinação da rampa de 10 graus e 1h de escoamento superficial. Os corpos de prova foram ensaiados em cinco teores de umidades diferentes.

Os corpos de provas para o ensaio de *Inderbitzen* podem ser: 1) solos deformados e compactados em laboratório; 2) moldados no laboratório a partir de blocos indeformados amostrados em campo; ou 3) moldados diretamente em campo, mediante amostradores de corpos de prova para campo.

3.1.1 Procedimento de ensaio

Para os ensaios de *Inderbitzen*, foram estudados solos situados nas camadas superficiais, visto que esse ensaio representa as condições de escoamento superficial em campo. Esses solos, localizados em três locais distintos (T1, T2, T3), são classificados, pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos, como silte de alta plasticidade (T1-S) e argila siltosa de baixa plasticidade (T2-S e T3-S).

Os amostradores, confeccionados para o aparelho construído por Fácio (1991) na Universidade de Brasília, são enrosáveis, de forma a serem acoplados no equipamento no momento do ensaio. Para isso utilizou-se tubos de PVC de 5 mm de espessura, com diâmetro externo e altura de 10 cm, conforme apresentado na Figura 18a.

A Figura 18b apresenta um anel de aço biselado que se enrosca na parte externa de uma das extremidades do amostrador de PVC. O referido anel foi utilizado para moldar os corpos de prova em campo e, no momento da cravação do amostrador de PVC na superfície do terreno, romper as tensões de superfície com maior facilidade.



(a)



(b)

Figura 18. Amostrador para o ensaio de *Inderbitzen*: a) amostrador PVC; b) anel de aço do amostrador.

O procedimento de amostragem adotado foi o proposto por Cunha e Campos (2014), em que o terreno era nivelado e escavado em um minibloco com dimensões de 6 a 8 cm, maior que o diâmetro do amostrador (Figura 19a). Em seguida, a porção externa do bloco era lapidada em formato cilíndrico. Essa etapa foi feita com uso de espátulas e ferramentas de corte (facas e facões), retirando o solo de modo a liberar tensões das partes que se encontravam mais confinadas na área a ser amostrada, até atingir uma altura em torno de 4cm. Após esse procedimento, o amostrador com o anel de aço foi roscado e cravado no solo e empurrado lentamente sem uso de força (Figura 19b). Ao perceber resistência do solo, o processo de liberação de tensões foi repetido até a total cravação do amostrador, seguido do corte da parte inferior do bloco. A amostra extraída é envelopada com filme plástico e com papel bolha, etiquetada e colocada em caixas de isopor para seu transporte ao laboratório.

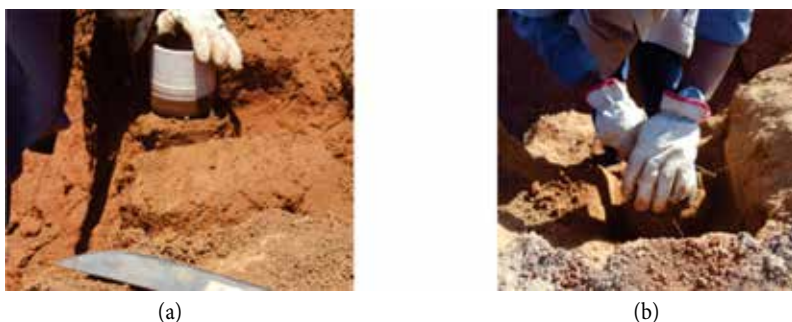


Figura 19. Coleta de amostra em campo: a) mini-bloco moldado (MATAMOROS SEVILLA, 2016); cravação do moldador no solo.

A preparação do corpo de prova consistiu em remover cuidadosamente o solo excedente que ficou no amostrador depois da coleta realizada em campo, até deixar nivelados o topo e a base do corpo de prova. Em seguida, o corpo de prova era pesado. Com o material excedente, obteve-se o teor de umidade da amostra. Os ensaios foram executados em corpos de prova na umidade natural e após embebibimento prévio de 15 min.

Nessa pesquisa, foi utilizada apenas uma das rampas do equipamento, para se obter uma melhor observação da amostra e uma melhor manipulação dos recipientes no momento da coleta do solo erodido no ensaio. Na Figura 20, é apresentado o aparelho *Inderbitzen* utilizado.



Figura 20. Aparelho *Inderbitzen* (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

Para a execução do ensaio, adotou-se a metodologia de Santos (1997), ou seja, inclinação de rampa de 10° e vazão constante de 17,5 ml/s. O tempo definido para o ensaio foi de 30 min, e a coleta do solo erodido no ensaio se fez nos minutos 1, 5, 10, 15, 20, 25 e 30. As coletas foram realizadas nas peneiras n° 40, 100 e 200, realizando-se também a coleta do material passante pela peneira n° 200, seguindo a proposta de Bastos (2004). O autor sugere a medição indireta do solo passante por essa peneira, mediante a obtenção de amostra representativa da solução água-finos, coletada no balde após ter sido homogeneizada. Os materiais coletados foram transferidos cuidadosamente para cápsulas de alumínio para posterior secagem em estufa e pesagem.

3.1.2 Discussão dos resultados

Nas Figuras 21a e 21b, constam os resultados da perda de massa ao longo do tempo dos três solos estudados na condição natural e embebidos em água, respectivamente. Com os resultados prévios da massa específica dos solos ensaiados, foi possível expressar esses resultados como espessura total erodida vs tempo.

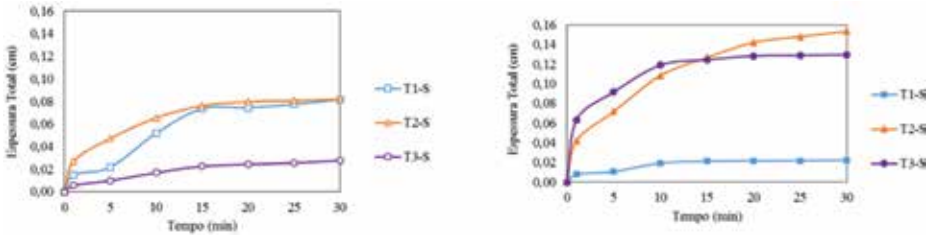


Figura 21. Perda de massa ao longo do tempo: a) amostra natural; b) amostra embebida (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

Observa-se, nas Figuras 21a e 21b, que os solos T2-S e T3-S têm uma maior perda de solo quando são ensaiados com embebedimento prévio de 15 min, ao contrário do solo T1-S, que obteve maiores valores de perda de solo ao ser ensaiado sob condição de umidade natural. Tal fato pode ser explicado em razão de o solo T1-S possuir material agregado que pode desagregar rapidamente ao contato com a água.

De acordo com Lafayette (2006), o fator de erodibilidade (K) é o valor do coeficiente angular da equação da reta que melhor ajusta os pontos do gráfico ‘Tensão Cisalhante Hidráulica’ (τ_h) versus ‘Perda do Solo’ (por unidade de área e tempo de ensaio). Os valores da perda do solo são obtidos diretamente do ensaio de *Inderbitzen*, já os valores das tensões cisalhantes hidráulicas podem ser obtidos conforme a Equação 01.

$$\tau_h = \gamma_w \cdot h \cdot i \tag{01}$$

onde: γ_w é o peso específico da água (kN/m^3), h é a altura da lâmina de fluxo (m) e i é a declividade da rampa ($^\circ$).

Nas Tabelas 1 e 2, são apresentadas as taxas de erodibilidade para ambas as condições do ensaio.

Tabela 1. Avaliação da taxa de erodibilidade em corpos de prova ensaiados na umidade natural. (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

Local	Tensão cisalhante hidráulica (Pa)	Taxa de Erosão Acumulada (15 min) ($g/cm^2/min$)	Taxa de Erodibilidade K (15 min) ($g/cm^2/min/Pa$)	Avaliação Qualitativa
T1-S	4,34	0,0055	0,0013	MEDIANA
T2-S	4,34	0,0066	0,0015	MEDIANA
T3-S	4,34	0,0016	0,0004	BAIXA

Tabela 2. Avaliação de taxa de erodibilidade em corpos de prova embebidos em água. (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

Local	Tensão cisalhante hidráulica (Pa)	Taxa de Erosão Acumulada (10min) (g/cm ² /min)	Taxa de Erodibilidade K (10 min) (g/cm ² /min/Pa)	Avaliação Qualitativa
T1-S Embebido	4,34	0,0021	0,0005	BAIXA
T2-S Embebido	4,34	0,0181	0,0042	MEDIANA
T3-S Embebido	4,34	0,0125	0,0029	MEDIANA

As amostras apresentam um potencial de erodibilidade de baixo a médio porte, de acordo com o critério estabelecido por Bastos (2004). Destaca-se que o solo T1 - S passou de medianamente erodível na condição natural para baixa erodibilidade na condição embebida, ao contrário do que ocorreu para T2 - S, ressaltando-se a importância do teor de umidade do solo em sua perda de massa.

3.2 Ensaio Pinhole

O Ensaio de Pinhole, ou furo de agulha, foi desenvolvido por Sherard et al. (1976), com vistas à avaliação de potencial à dispersibilidade ou erosão interna de solos argilosos, mediante observações da coloração da água.

O ensaio consiste na passagem de um fluxo de água através de um furo com dimensões de 1 mm de diâmetro, dentro de um corpo de prova com dimensões de 38 mm de comprimento (Figura 22). O corpo de prova é submetido a várias cargas hidráulicas durante o ensaio. Esse ensaio tem sido frequentemente utilizado para estudos de barragens. Segundo as normas D 4647/98 (ASTM, 1998) e NBR 14114 (ABNT, 1998), os ensaios podem ser executados em corpos de prova indeformados ou compactados sob diferentes umidades de compactação.

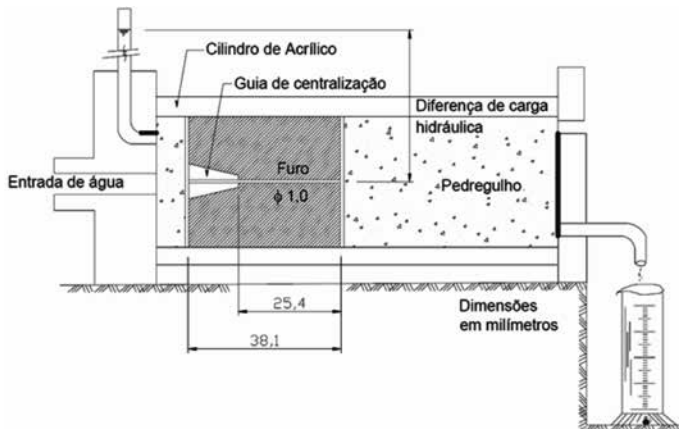


Figura 22. Esquema Geral do Equipamento para Ensaio Pinhole (modificado -ABNT, 1998).

Santos (1997) propõe uma alteração da metodologia para solos tropicais, que não são dispersivos devido à baixa concentração de sódio. Assim, o autor recomenda a realização do ensaio com o aumento e diminuição de carga hidráulica, visto que os corpos de prova com suscetibilidade à erosão interna apresentam maior vazão na fase de descarga, do que na fase de carga.

Para descartar as possíveis interferências das bolhas de ar nos macroporos, típicos de argilas lateríticas, Santos (1997) propõe a saturação prévia da amostra, mediante ascensão capilar, e Nadal-Romero et al. (2011) propõem a compactação prévia da amostra, seguida por secagem durante três dias e por uma simulação de chuva pelo período de uma hora.

3.2.1. Procedimento de ensaio

Para a execução desses ensaios, foram coletadas amostras indeformadas superficiais e a 3m de profundidade, em quatro locais diferentes, mediante amostradores previamente confeccionados com as dimensões finais dos corpos de prova.

Os amostradores consistiram em tubos de acrílico transparente, confeccionados conforme as especificações das normas D 4647/98 (ASTM, 1998) e NBR 14114 (ABNT 1998), porém, com dimensões de 4cm de diâmetro externo e altura de 15cm (Figura 23a). Um anel de aço com dimensões ajustáveis ao tubo e um pistão foram confeccionados para auxiliar na coleta da amostra em campo (Figura 23b).



Figura 23. Amostragem de corpos de prova para ensaio Pinhole: a) amostradores de acrílico e acessórios; b) uso em campo.

Devido à condição instável do solo nos locais da coleta, foi impossível moldar a amostra na condição ideal para esse ensaio (sentido horizontal). Dessa forma, o procedimento de coleta foi o mesmo descrito para o ensaio de *Inderbitzen*, utilizando-se o anel.

Destaque-se que os corpos de prova indeformados eram moldados além da altura de 3,8cm para a obtenção do teor de umidade do corpo de prova. Para acomodar o corpo de prova dentro do tubo de acrílico, a amostra foi levemente empurrada pelo pistão, e o espaço restante do amostrador foi ocupado por papel filme (enrolado), de forma que o corpo de prova ficasse protegido nas extremidades, para que depois fosse envolvido em papel filme e papel bolha e colocado na caixa de isopor devidamente etiquetado.

A preparação da amostra consistiu em remover cuidadosamente o solo excedente do tubo de acrílico até atingir o comprimento indicado pela NBR 14114 (ABNT, 1998). Em se-

guida, o solo foi montado no tubo de acrílico como um sistema constituído de areia, malha, corpo de prova, malha e areia, como apresentado na Figura 24.



Figura 24. Amostra montada no ensaio Furo de Agulha (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

Os ensaios foram realizados na condição de umidade natural e de saturação, como proposto por Santos (1997). A saturação por sucção capilar foi aplicada por um período de 20 horas, submetendo-se o corpo de prova a uma carga hidráulica pequena de 20 mm de coluna de água, conforme proposto por Matheus (2006).

Foram aplicadas cargas hidráulicas de 5, 18, 40 e 66 cm (sendo a última a capacidade máxima do painel), mantidas cada uma por 5 minutos, começando o tempo de descarga hidráulica no final do período de tempo da carga hidráulica de 66 cm, seguindo a proposta de Santos (1997). Para cada carga hidráulica, foram registrados os volumes de água de saída e, no final do ensaio, o corpo de prova foi drenado e extraído do tubo de acrílico.

3.2.2 Discussão dos resultados

Na Figura 25, são apresentados os resultados dos ensaios de Pinhole, coletados no ponto T1 para os corpos de prova nas condições saturada e não saturada, em amostras coletadas superficialmente (T1 - S) e na profundidade de 3m (T1 - P). Observa-se que, no ponto T1, o solo coletado na camada mais profunda possui maior vazão e indícios de ocorrência de *piping*, tanto na condição saturada quanto na condição não saturada. O mesmo comportamento foi observado no ponto T2. O ponto T3 diferenciou-se dos demais por apresentar suscetibilidade à erosão interna, com baixas cargas hidráulicas na camada superficial na condição saturada, e por apresentar maiores valores de vazão quando os solos foram ensaiados na condição natural.

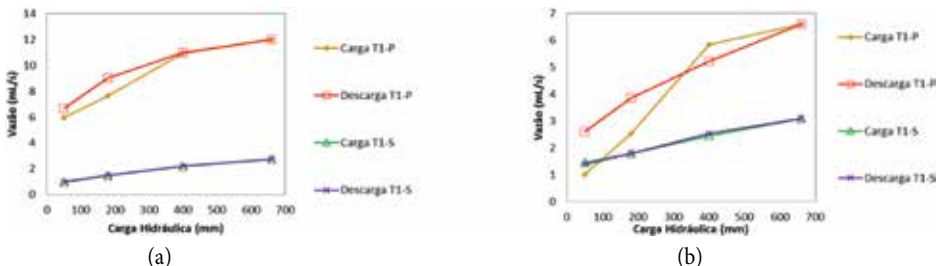
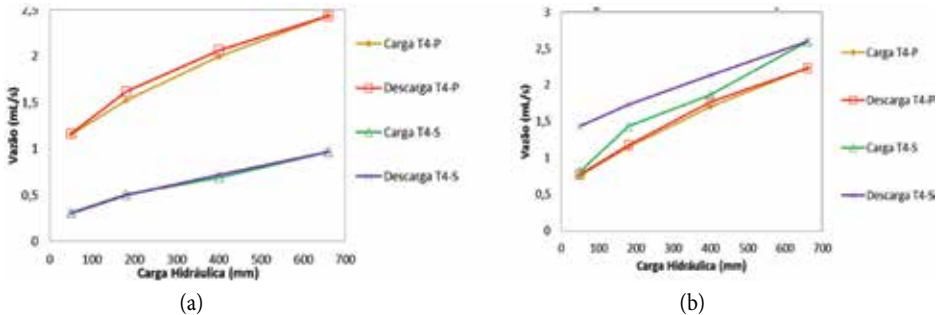


Figura 25. Vazão versus carga hidráulica do ponto T1: a) condição saturada; b) condição não saturada (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

Na Figura 26, são apresentados os resultados dos ensaios de Pinhole do ponto T4 para os corpos de prova nas condições saturada e não saturada, em amostras coletadas superficialmente (T4-S) e na profundidade de 3m (T4-P). Observa-se que, nessa amostra, as vazões do solo superficial foram maiores do que do solo situado a 3m de profundidade, na condição não saturada. Além disso, houve uma mudança na trajetória de descarga e uma inflexão na curva, o que sugere suscetibilidade à erosão interna profunda e indícios de ocorrência de processo de erosão interna ou *piping*. As amostras saturadas não apresentaram indícios de erosão interna devido à sua heterogeneidade, pois as amostras ensaiadas na condição saturada possuíam áreas mais compactas.



3.3 Ensaio de avaliação de critério de erodibilidade mediante metodologia MCT

O ensaio de erodibilidade mediante a metodologia MCT proposta por Nogami e Villibor (1979) determina o fator de erodibilidade por meio de dois ensaios. O primeiro é o ensaio de sucção capilar (ou infiltrabilidade), que consiste na colocação de uma amostra cilíndrica, confinada lateralmente por um tubo de amostragem, conectada a um fluxo ascendente de água por ascensão capilar. A velocidade de ascensão é quantificada por meio da cronometragem do fluxo por um tubo capilar colocado horizontalmente no nível da base da amostra. O segundo é o ensaio de perda de massa por imersão, similar ao utilizado para a classificação MCT, diferenciando-se unicamente pela realização do ensaio com amostras indeformadas, confinadas lateralmente pelo tubo de amostragem com o topo coincidente à borda do tubo. Os corpos de prova são submersos por 20h. A proposta de Nogami e Villibor (1979) é baseada em duas propriedades de solos tropicais frente à erosão, que são a infiltrabilidade e erodibilidade específica.

A partir dos ensaios de sucção capilar e erodibilidade específica, estabelece-se a relação π/s : π representa a porcentagem de perda de massa por imersão, calculada com base na fórmula descrita na norma DNER -ME 256/9 (DNER, 1994); s representa o coeficiente de sorção ou sucção capilar da água, calculada a partir da metodologia MCT proposta na norma DNER-ME 194 (DNER, 1988). De acordo com Nogami e Villibor (1979), quando essa relação for superior a 52, os solos são considerados erodíveis. Nogami e Villibor (1995) propuseram esse mesmo critério graficamente.

3.3.1 Procedimento de ensaio

Os amostradores para as coletas consistiram em tubos de PVC de espessura grossa (5 mm) para garantir um risco menor de fratura ou deformação da amostra moldada no momento dela ser armazenada na caixa de isopor em campo.

As dimensões do tubo foram definidas de acordo com a proposta de Bastos (2004): 5cm de diâmetro externo e 5cm de altura. Os tubos foram biselados em uma extremidade, com o intuito de proteger o corpo de prova no momento da cravação do tubo. Na Figura 27, são apresentados os amostradores utilizados na amostragem em campo. O procedimento de coleta e a preparação da amostra foram os mesmos descritos para o ensaio de *Inderbitzen*.



Figura 27. Amostradores para ensaio da metodologia MCT.

Para esse ensaio, foram coletados os corpos de provas em quatro locais distintos na profundidade de 2,5 a 3,0m e na camada superficial. Os ensaios foram realizados nas amostras com umidade natural e após secagem por 72h.

Para a preparação do ensaio de sucção capilar, assegurou-se que o reservatório de água colocado abaixo do corpo de prova estivesse totalmente cheio, para garantir que a pedra porosa em contato com o corpo de prova estivesse completamente umedecida. Também foi garantido que o sistema de fornecimento de água para o corpo de prova e de leituras do ensaio não contivesse bolhas de ar. O corpo de prova foi totalmente vedado com uma borracha na área de contato com a pedra porosa.

Para o ensaio de perda de massa por imersão, foram preparados vários recipientes para colocar os corpos de provas espaçadamente, de forma que não houvesse interferências entre eles.

O ensaio de sucção capilar (Figura 28a) e o ensaio de perda de massa por imersão (Figura 28b), foram realizados em conformidade com a proposta original de Nogami e Villibor (1979) e as normativas ME 194/88 (DNER, 1988) e ME 256 (DNER, 1994) respetivamente.

3.3.2 Discussão dos resultados

Os resultados do ensaio de sucção capilar executado na amostra em sua condição natural de umidade são apresentados na Figura 29, sendo que V é o volume absorvido pela amostra e A é a seção transversal da amostra. Observa-se que há uma inclinação íngreme no

trecho inicial do gráfico e, com a saturação da amostra por ascensão capilar, a velocidade de absorção de água do corpo de prova diminui, o que suaviza a curva. O valor de s (inclinação da curva) foi determinado nos dois trechos.



Figura 28. Ensaio de avaliação de critério de erodibilidade mediante metodologia MCT: a) sucção capilar; b) perda de massa por imersão.

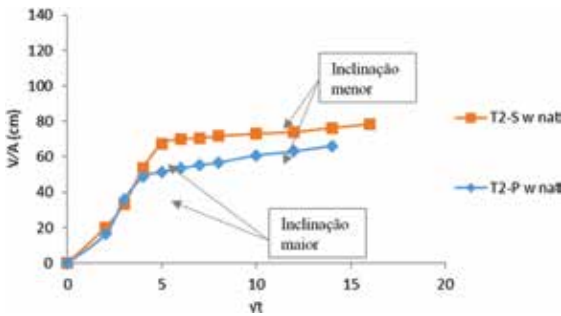


Figura 29. Gráfico V/A versus \sqrt{t} , obtido do ensaio de sucção capilar para amostra T2, em condição de umidade natural (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

Nas Figuras 30 e 31, são apresentados os resultados dos ensaios; são considerados erodíveis os pontos situados abaixo da reta. Observa-se que, no trecho de maior inclinação, apenas as amostras T1-P e T2-P são consideradas erodíveis. Por outro lado, a saturação por capilaridade tornou as amostras T1-S, T1-P, T2-S, T2-P e T4-P suscetíveis à erosão.

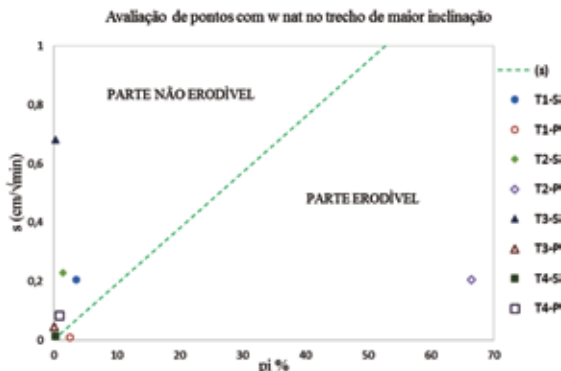


Figura 30. Gráfico π_i versus s para amostras na umidade natural no trecho de maior inclinação (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

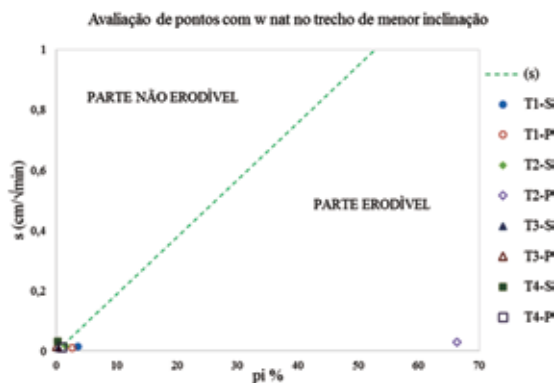


Figura 31. Gráfico π versus s no trecho de menor inclinação das amostras atingindo condições de saturação (MATAMOROS SEVILLA, 2016).

3.4 Considerações finais

Os resultados laboratoriais apresentados da pesquisa realizada na UHE de Batalha mostraram semelhanças com as condições observadas em campo. Tais semelhanças foram evidenciadas, por exemplo, na verificação de maior suscetibilidade à erosão dos solos situados nas profundidades de 2,5 a 3,0m nos pontos T1 e T2, visto que, em campo, foram encontradas, nessas áreas, águas enturvecidas, devido a sedimentos que se encontravam em suspensão, provenientes do material situado nessa profundidade. Além disso, em campo, observou-se que os solos situados mais próximos aos corpos hídricos apresentavam pequenos desprendimentos ou movimentos de massa, provavelmente em decorrência da saturação por ascensão capilar, conforme verificado nos ensaios laboratoriais. Dessa forma, esses ensaios são adequados para estimar o comportamento do solo quando submetido ao escoamento superficial, ao fluxo interno de água e ao processo de enchimento do reservatório até a cota máxima (temporada de chuva).

4 Comentários finais

Erosões são problemas recorrentes, associados à construção, uso e operação de reservatórios, ocasionando assoreamentos que reduzem a capacidade de armazenamento dessas construções. Essa situação complexa provocou o interesse da comunidade geotécnica em procurar solucionar esses problemas. As erosões ocorrem no talude do reservatório, devido aos efeitos de onda e à alteração do nível do reservatório, bem como na bacia de captação, devido ao escoamento superficial e ao fluxo interno de água. Para fazer o diagnóstico desses processos erosivos, é necessária a execução de ensaios laboratoriais, os quais foram descritos nesse capítulo. Observou-se, no estudo da UHE de Batalha, que os ensaios laboratoriais fornecem boas previsões do comportamento do solo em campo. A descrição dos equipamentos e das metodologias desses ensaios foi detalhada, na medida do possível, para servir de base às pesquisas futuras sobre essa temática. Espera-se, com isso, contribuir na evolução do estudo de erosões em reservatórios, que é bastante complexo, especialmente por envolver diferentes áreas de conhecimento.

Referências

ALMEIDA, J.G.R; ROMÃO, P.A.; MASCARENHA, M.M.A.; SALES, M.M (2015). Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis (GO). **Geociências**, 34:441-451.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14114**. Solo – solos argilosos dispersivos – identificação e classificação por meio do ensaio de furo de agulha (pinhole test). Rio de Janeiro, 1988, 8 p.

_____. **NBR 7199**. Projeto, execução e aplicações de vidros na construção civil. Rio de Janeiro, 1989, 18p.

ASTM D. **4647 – 93**: Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test, american society for testing and materials. USA, 1998, 11p.

BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 2004. 303 p. Tese de Doutorado em Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. **A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, 2000, 1:17-25.

COSTA, F.S; RAUPP, I.P; DAMÁZIO, J.M.; OLIVEIRA, P.D.; GUILHON, G.F. The methodologies for the flood control planning using hydropower reservoirs in Brazil. In: **VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT**, São Paulo, 1-12, 2014.

CUNHA, R.P; CAMPOS, J.E. Amostragem e ensaios laboratoriais para avaliação de potencial erosivo na margem de reservatório de usina hidroelétrica na Região Norte do Brasil. In: **XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE MÊCANICA DE SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA**, GO, 2014, 8 p.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. Ed. Prentice-Hall, v. 2, 1991, 353 p.

DNER. **ME 256-94**. Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão, 1994, 6p.

_____. **ME 194/88**. Ensaio de sucção capilar d' água e permeabilidade, 1988, 13p.

FACIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo de erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. 120 p. Dissertação de Mestrado, Publicação No. G DM 002A91, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 1991.

FERNANDEZ, O. V. Q.; FULVARO, V. J. Rates and processes of bank erosion, Itaipu Reservoir, Paraguay-Brazil border, South America. In: **5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT**. Belo Horizonte. 2000, 9 p.

FNZAS (2011). **Federation of New Zealand aquatic societies**. Disponível em: <www.fnzas.org.nz>. Acessado em: 1º fev. 2011.

HOLMOREN, G. G. S.; FLANAGAN, C. P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects. **ASTM Special Technical Publication 623**: 218-239, 1977.

JACINTHO, E. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. ; CARDOSO, F. B. F.; SANTOS, R. M. M.; GUIMARÃES, R. C.; LIMA, M. C. G. Solos tropicais e o processo erosivo. In: SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006.

KAMPHUIS, J. W. Introduction to coastal engineering and management. **World Scientific**, v. 30, 2010, 525 p.

LAFAYETTE, K.P.V. Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti - Cabo de Santo Agostinho/PE. 2006. 358 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2006.

MATAMOROS SEVILLA, T.M. **Estudo de processos erosivos: análise geotécnica de áreas degradadas no entorno do reservatório de batalha, GO/MG**. 2016. 151 p. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-273/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

MATHEUS, I.C. **Proposta de metodologia para dimensionamento da espessura de núcleos argilosos em barragens baseada em ensaios pinhole**. 2006. 160 p. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-147/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

MENEZES, A.V. **Proposta metodológica para estudo de perda de massa de solos situados em bordas de reservatório devido ao efeito de ondas por meio de um canal hidráulico**. 2017. 100 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2016.

NADAL-ROMERO, E., VERACHTERT, E., MAES, R.; POESEN, J. **Una nueva herramienta para evaluar la susceptibilidad de los suelos a los procesos de sufosión o piping: el pinhole test**. Cuad. Investig. Geogr., 37(1): 99–114, 2011.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area**. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. - Bull. l'Association Int. Géologie l'Ingénieur, 19(1): 196–199, 1979.

SANTOS, dos R. M. M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia**. 1997. 138 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

SHERARD, J., DUNNIGAN, L., DECKER, R.; STEELE, E.F. Pinhole test for identifying dispersive soils. **Journal of the geotechnical, division engineering**. ASCE, 102: 69–85, 1976.

SOUZA, C.A.G.F.; MORISHITA, H.M. Projeto, implantação e análise de um gerador de ondas, Havana. In: **18° PAN-AMERICAN CONGRESS OF NAVAL ENGINEERING, MARITIME TRANSPORT AND PORT ENGINEERING COPINAVAL**, 18, Cuba, 2003.

STREETER, V. L.; WYLIE, E.B. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: McGraw Hill, 1982, 585 p.

TATTO, J. **Comportamento de filtros geotêxteis em taludes sujeitos a impactos de ondas**. 2014. 123 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

TERRA, V.S; GITIRANA, GILSON DE F. N.; MASCARENHA, M.M.A; DOMINGOS, V.H.; ALMEIDA, J.G.R. Influência da poropressão de ar no ensaio de desagregação por imersão total em água. In: **VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE NÃO SATURADOS**. Fortaleza, 1-8, 2015.

U.S. Army Coastal Engineering Research Center. **Shore protection manual**. V.3. Coastal Engineering Research Center, 1984.

VOLKER, A.; HENRY, J. C. Influence of wind waves on the erosion of reservoirs banks in Slovakia. In: Side effects of water resources management: overviews and case studies. International Program of Hydrology (IPH-III). **IAHS Publication**. United Kingdom.. p.51-78, 1988.

CAPÍTULO 12

Monitoramento e modelagem de ondas em reservatório

Klebber T. M. Formiga
Joel R. G. Vasco
Tatiane S. R. Pereira

Palavras Chave: Propagação de ondas. Modelagem de sedimentos. Modelagem.

1 Introdução

O Brasil é o berço de alguns principais sistemas hídricos mundiais, e a sua matriz energética é baseada na energia hidráulica. Após alguns anos sem expansão na década de 90 e no início dos anos 2000, nos anos subsequentes, o número de barragens no país, para fins de geração de energia, tem aumentado, frente a uma nova expansão do sistema elétrico, momento em que tanto grandes barramentos, a exemplo de Jirau, Santo Antônio, Estreito, Serra do Facão e Batalha, quanto pequenos, como as PCHs e CGHs, foram propostos e/ou construídos recentemente. Nesses empreendimentos, um fator decisivo foram os impactos ambientais a eles associados.

Apesar da sua importância para o desenvolvimento do país, a construção de reservatórios tem sido contestada em face dos impactos socioambientais que provocam. As mudanças vão desde a desapropriação de terras, com a consequente mudança dos moradores, passando por problemas de degradação da qualidade de água a jusante pela redução do oxigênio dissolvido até problemas de erosões das margens e encostas na região do entorno do lago (CARVALHO et al., 2000).

A formação do lago do reservatório provoca grandes modificações físicas em toda a região de entorno, uma vez que o terreno natural, antes seco, passa a ter contato direto e frequente com a água, mudando também as características de umidade dentro do solo. Tal processo introduz a necessidade de um novo equilíbrio entre o solo e a água, refletindo, na maioria dos casos, na erosão de parte das margens dos reservatórios (OZEREN; WREN, 2009).

Os processos erosivos de margem de reservatórios têm sido foco de solicitações por parte dos órgãos ambientais, quando da instalação de novos empreendimentos. Dentro dos programas ambientais, é cobrado o monitoramento e a remediação das erosões na região das margens dos reservatórios. Nos empreendimentos antigos, o poder público, por meio das procuradorias ambientais, tem também cobrado dos empreendedores a adoção de medidas para se mitigar este processo, pois estas erosões provocam prejuízos tanto ao meio ambiente quanto à atividade econômica local, em especial nos lagos em que ocorrem atividades de turismo.

As erosões nas margens de reservatório são decorrentes principalmente de tempestades acompanhadas de ventos fortes que produzem ondas superiores a 2m de altura em grandes reservatórios. Essas tempestades, provenientes de frentes frias ou ciclônicas, são mais comuns na Região Sul, mas também são percebidas com grande intensidade no Sudeste e no Centro-Oeste e têm sido mais recorrentes nos últimos anos. Após tais eventos, surgem alterações perceptíveis nas margens das represas, que são, normalmente, locais de recreação e/ou trabalho, trazendo riscos para os residentes da região e a seu patrimônio.

O entendimento do processo de propagação de ondas em um reservatório possibilitará prever a energia da água em todas as margens dos reservatórios, permitindo-se assim determinar o seu impacto sobre as bordas e consequentemente a vulnerabilidade de um determinado local a um processo erosivo.

2 Classificação das Ondas

As ondas podem ser definidas como movimentos verticais da superfície da água, existindo uma grande variedade de tipos de ondas que podem ser classificadas em termos de período ou comprimento de onda (que serão abordados no item 3). As ondas mais longas são de trans-maré, geradas pelas flutuações de baixa frequência na crosta e da atmosfera da Terra. Essas ondas têm um período da ordem de 24hs (Figura 1).

As marés, ondas ligeiramente mais curtas, são geradas pela interação entre os oceanos, por um lado, e entre a lua e o sol, por outro. Seus períodos podem variar de algumas horas até um pouco mais que um dia, e seus comprimentos de onda variam entre algumas centenas e alguns milhares de quilômetros. Estes dois tipos de ondas são exclusivos de oceanos, não ocorrendo em reservatórios interiores (DEAN e DALRYMPLE, 1991).

O comprimento de onda e período de ondas geradas por tempestades (furacão, ciclones, etc.) são, em regra, ligeiramente mais curtos que os de marés. Elas são geradas por uma elevação em grande escala da superfície do oceano em um evento mais severo, desencadeado pela baixa pressão atmosférica no seu centro e pelos ventos fortes com velocidades altas. As escalas de espaço e de tempo deste tipo de onda são, portanto, mais ou menos iguais aos de marés, ou seja, algumas centenas de quilômetros e um ou dois dias. Quando uma tempestade se aproxima da costa, a água tende a se elevar, causando graves inundações. Por exemplo, a

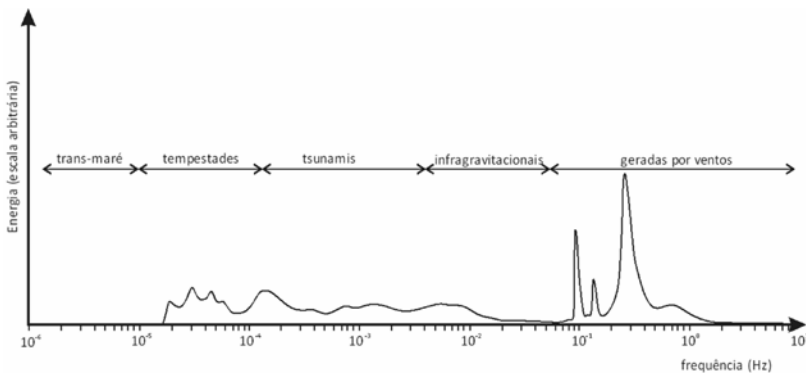


Figura 1. Frequência para diferentes tipos de ondas (Adaptado de HOLTHUIJSEN, 2007).

inundação de Nova Orleans pelo furacão Katrina em agosto de 2005, ou a inundação anual do Bangladesh por ciclones (HOLTHUIJSEN, 2007).

Os próximos tipos de ondas na sequência da escala são os tsunamis, tipos de onda gerados por deslocamento de terra submarina ou terremoto por um terremoto. Eles são difíceis de prever e pouco perceptíveis em mar aberto, devido à sua baixa amplitude. No entanto, eles causam estragos nas regiões costeiras, pois tendem a aumentar a sua amplitude consideravelmente ao se aproximar da costa, a exemplo do tsunami do Natal de 2004 no Oceano Índico (HOLTHUIJSEN, 2007).

As ondas da próxima escala são ainda mais difíceis de prever. Trata-se das ondas estacionárias, chamadas seichas, com uma frequência igual à frequência de ressonância da bacia em que ocorrem (em portos e baías ou mesmo no mar, por exemplo, no Mar Adriático). Em um porto, a amplitude de uma seicha pode ser grande o suficiente para inundar áreas baixas, quebrar linhas de ancoragem e perturbar atividades portuárias. Essas ondas são usualmente geradas por ondas do mar aberto; sua origem não é bem compreendida, embora algumas, pelo menos, sejam geradas por tempestades.

Em seguida, vem a escala de ondas infragravitacionais, que é gerada por grupos de ondas formadas pela ação do vento. Em geral, a zona de rebentação das praias, possuem períodos de apenas alguns minutos. O período da categoria seguinte, as ondas geradas pelo vento, é inferior a 30 s. Quando dominado pela gravidade (períodos superiores a 1/4 s), elas são chamadas de ondas de gravidade de superfície (que é o foco deste capítulo, pois são as que ocorrem em reservatórios). Ondas com períodos inferiores a 1/4 s (comprimentos de onda mais curtos que 10 cm), são afetadas pela tensão de superfície e são chamadas de ondas capilares (JANSSEN, 2009).

Os tipos de ondas acima são definidos em termos do seu período de onda ou comprimentos de onda. As ondas de gravidade na superfície geradas pelo vento são, portanto, caracterizadas por seu período, de 0,25 a 30 s, e comprimento de onda correspondente de 0.1 a até 1500m. Assim, inicialmente, será feita uma descrição das características físicas da onda (HOLTHUIJSEN, 2007).

3 Características físicas das Ondas

O primeiro passo para descrever ondas de vento é considerar o movimento vertical da superfície da água em uma posição horizontal, por exemplo, ao longo de uma haste vertical. Nesta visão, as ondas se manifestam como uma superfície se movendo para cima e para baixo no tempo em que um único local. Ao se observar apenas o local, poder-se-ia deduzir que o movimento seria resultado de um plano horizontal se movendo verticalmente, de modo aleatório. No entanto, quando se olha toda a região, verifica-se um comportamento completamente caótico, sem nenhum padrão ao se avaliar tridimensionalmente uma região do espaço. Para tentar entender esse comportamento, precisa-se definir variáveis de análise que, neste caso, são a altura e o período da onda (JANSSEN, 2009).

O conceito de altura de onda significativa e período é muito útil em muitas situações. No entanto, dois parâmetros de ondas dão apenas uma descrição limitada das condições das ondas. Por exemplo, condições das ondas podem muito bem ser semelhantes no que se refere

ao fato de que altura significativa de vaga e período são iguais, mas eles ainda podem ser muito diferentes no sentido transversal. Para distinguir tais condições, são necessários mais parâmetros, obtidos a partir da análise espectral da onda, que se baseia na noção de que o movimento aleatório da superfície do mar pode ser tratado como a soma de um grande número de componentes de ondas harmônicas.

Antes de definir o conceito de altura de onda e período, será elaborada uma definição mais apurada do que seria uma onda. Para tanto, é preciso diferenciar o que seria uma onda de uma elevação da superfície da água.

A superfície de elevação ($\eta(t)$) pode ser definida como a posição do nível da água em um ponto, em um determinado momento, tomando um nível estabelecido como referência ($\eta(t)=0$), que coincide com a médias das elevações observadas. Os valores de $\eta(t)$ tendem a ter um comportamento Gaussiano com a média igual a zero (BUCKLEY et al., 1984). A onda, por outro lado, envolve uma sequência de observações da superfície que ocorrem entre duas passagens sucessivas pela posição zero ($\eta(t)=0$) em uma mesma direção, subida ou descida (Figura 2) (GODA, 1986).

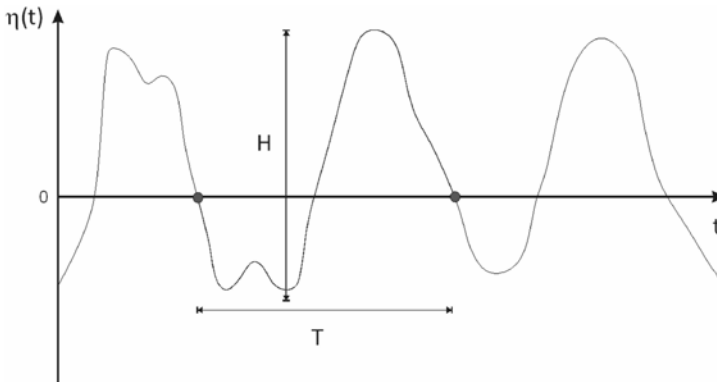


Figura 2. Definição de uma onda a partir do registro no tempo de dados de elevação do nível de água.

3.1 Altura da onda

A altura da onda (H) é definida como a distância vertical entre a maior e a menor elevação da superfície de uma onda (Figura 2). Uma onda terá, assim, apenas uma altura de onda.

Em um registro de dados de ondas com N observações, a altura média (\bar{H}) é então prontamente definida como:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (1)$$

sendo i o número da onda no registro observado.

Nos estudos relacionados à energia da onda, a altura média quadrática (H_{RMS}) é frequentemente empregada como a variável que define a altura das ondas, pois a energia da onda é proporcional ao quadrado da altura. A H_{RMS} pode ser expressa por:

$$H_{RMS} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{1/2} \tag{2}$$

Embora a H e a H_{RMS} sejam os valores naturais para indicar a amplitude da onda, muitas vezes, principalmente no caso de observação visual do fenômeno, elas não são empregadas, pois os seus valores tendem a ser diferentes daqueles visualizados. Assim é comum empregar outras medidas para a altura da onda. Uma delas é a altura significativa (H_s), que é definida como a média do terço superior das alturas observadas. É fornecida pela expressão:

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \tag{3}$$

O valor de j não é a sequência das ondas observadas, mas a ordem decrescente da onda em relação a todas as observações, sendo esse o valor para em $N/3$. Essa parece ser uma maneira estranha de definir uma altura característica da onda, mas as experiências têm mostrado que o valor desta altura da onda é próximo do valor da altura da onda estimada visualmente (H_v) (HOLTHUIJSEN, 2007).

Para um espectro de ondas em águas rasas, a relação entre os valores de H_{RMS} e $H_{1/3}$ é expressa por:

$$H_{RMS} = 0,7071H_{1/3} \tag{4}$$

3.2 Período de onda

Pode-se definir o período T de uma onda como o intervalo de tempo entre o início e o fim da onda, ou seja, o intervalo entre duas passagens consecutivas pelo nível *zero* (na descida ou na subida da onda [Figura 2]). Uma vez que esse período da onda é definido com passagens por zero, ele é chamado o período de passagem zero (T_0). A média deste período de onda é então definida em analogia com a altura média das ondas H , como:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0,i} \tag{5}$$

Sendo i o número sequencial de observações da onda no registro.

De modo semelhante ao que foi feito na análise do período de ondas, o período significativo ($T_{1/3}$) está associado com o aspecto visual do fenômeno observado (T_v) e, embora estes tenham origens diferentes, com o primeiro obtido a partir de uma filtragem do registro de ondas e o segundo definido a partir de observações, os seus valores tendem a ser bem próximos. O valor do período significativo ($T_{1/3}$) será expresso por:

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_{0,j} \tag{6}$$

Sendo j a ordem decrescente da onda em relação à todas as observações, este valor para em $N/3$.

4 Técnicas de Observação das Ondas

O interesse na observação de ondas por Engenheiros e Cientistas está em entender o comportamento caótico praticado por elas e fazer uma previsão de eventos futuros. Para tanto, é necessário gravar os movimentos de subida e descida da superfície como uma função no tempo, além de se determinar a sua direção de descolamento.

Esses detalhes não estão disponíveis em observações visuais, que ainda são feitas principalmente a partir de navios. Mas observações visuais que sejam feitas por pessoas experientes, que sigam padrões específicos de medição, ainda são empregadas, principalmente em locais em que seja a única fonte de informação disponível (TUCKER E PITT, 2001).

A fim de se evitar os problemas inerentes de observações visuais, recorre-se a estudos mais detalhados e precisos e a medições realizadas por instrumentos. Tais instrumentos são objetivos e precisos, não tendendo a apresentar vieses nas medições. As duas principais formas de mensurar as ondas são: a) medições diretas; b) sensoriamento remoto.

Embora sejam mais precisas, as medições de ondas empregando instrumentos ainda apresentam alguns problemas. As medições diretas, ou *in situ*, são precisas, necessitam de instalação nos locais e estão sujeitas às intempéries de meio, principalmente se realizadas no mar, e suas medidas se limitam ao local estudado. O uso de medições empregando sensoriamento remoto pode abranger grandes áreas e não sofre efeitos de intempéries. No entanto, as suas observações não têm um nível de precisão tão bom quanto às feitas *in loco* (WYATT e PRANDLE, 1999).

A seguir, são descritas as principais técnicas de medição de ondas.

4.1 Medições diretas

As medidas diretas das ondas podem ser feitas na superfície da água (usando boias), no leito do corpo d'água (por meio de transdutores de pressão, medidores de velocidade ou perfilhadores acústicos) ou medidores imersos parcialmente (geralmente fios que são montados sobre uma plataforma acima da superfície da água e que se estende, até certo ponto, por baixo da superfície). A maioria desses instrumentos é utilizada para adquirir registros no tempo do movimento para subida e descida da água em um ponto específico.

4.1.1 Boias

Uma forma tradicional de se medir ondas é seguir o movimento tridimensional da superfície da água empregando boias, que seguem de perto esse movimento ao flutuarem na superfície. A medição é feita avaliando a aceleração vertical e empregando um acelerômetro interno. Para essa medição, é preciso que o sensor estabeleça um horizonte artificial para a definição do movimento vertical. Esse tipo de boia faz a leitura apenas da variação vertical da onda, não projetando a sua direção (NAGAI et al., 2004).

As leituras das boias, devido à existência de um movimento horizontal (limitado), tendem a registrar as ondas mais simétricas do que são, reduzindo a inclinação da crista e tendendo a aumentar a região de vale. Outro problema das boias é que elas possuem massa,

fazendo com que elas subestimem ou não captem ondas curtas. Outro problema é que não existe um tipo universal de boia que se adeque a todas as faixas de altura/períodos de ondas. Em geral, as boias podem ser esféricas ou de casco plano.

As boias mais modernas enviam seus dados por satélite e possuem GPS de precisão para indicar a localização. A precisão desses GPS's já é relativamente elevada. Em muitos casos, com a devida correção – empregando tecnologia RTK (Real Time Kinematics) ou D-GPS (Differential GPS) – têm valores da variação e altura melhores que os fornecidos por alguns sensores de boia.

As boias mais modernas têm também medidores de inclinação da superfície da água, fazendo com que seja possível indicar, além da altura, a direção da onda, medindo, além das três direções (x, y, z), as rotações nesses eixos (Figura 3). No Brasil, a fabricante NAVCON possui uma boia de monitoramento de última geração - Boia Meteo-Oceanográfica Brasileira (Figura 3) - que inclui informações meteorológicas. Ela pode monitorar espectros de onda (incluindo altura e direção), dados provenientes da estação meteorológica (incluindo direção e velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, dados de precipitação). Também possui GPS interno. Ela é uma boia de casco plano, propícia para o uso off-shore. No entanto, para medição de ondas menores, ela não é indicada. Um problema que também acompanha as boias é o seu alto custo, na ordem de US\$ 200.000,00.



Figura 3. Boia Meteo-Oceanográfica.

4.1.2 Estruturas instaladas no fundo (Fonte: www.navcon.com.br)

Uma técnica que vem se desenvolvendo nos últimos anos é a dos medidores de fundo. Este tipo de dispositivo pode ser empregado principalmente em águas rasas; são capazes de efetuar as medições com elevado grau de acurácia. A principal dificuldade diz respeito ao acesso a eles, que ficam, na maior parte dos casos, submersos, requerendo cuidados tanto na sua instalação quanto na coleta das informações armazenadas (CAVALERI, 2000).

Os equipamentos mais empregados são transdutores de pressão, que são capazes de medir a variação da pressão hidrostática, resultante da alteração da altura da onda. Eles podem ter precisão de alguns milímetros, com possibilidade de aquisição de mais de 100 dados por segundo (100 Hz).

Embora sejam precisos, os transdutores de pressão, sozinhos, conseguem indicar apenas a variação na altura da onda (leitura vertical), não podendo fornecer dados da sua direção. Para suprir esta lacuna, equipamentos capazes de medir a corrente têm sido empregados acoplados a transdutores de pressão.

As principais classes desses equipamentos são os baseados em medidores de velocidades pontuais, ou correntômetros, e os perfilhadores de corrente.

4.1.2.1 Correntômetros ou medidores pontuais

Os medidores pontuais de velocidade conseguem medir, nas três direções, a velocidade e a direção do deslocamento da água em um ponto pouco distante do equipamento. Ele tem a vantagem de ser mais compacto, podendo ser instalado em pequenas profundidades.

Um equipamento que se enquadra nessa classificação é o SonTek ADVOcean-Hydra, da Xylem (Figura 4), que pode ser instalado até 20 m de profundidade e tem uma resolução temporal de 25 Hz.

O Nortek Vector (Figura 5) é um correntômetro que coleta dados de velocidade (em 3D) com alta resolução temporal (100 a 250 Hz). Como o equipamento da Sontek, ele tem uma limitação de 20 m de profundidade para instalação. O equipamento da Nortek é relativamente compacto, estando todo o seu centro de processamento e armazenamento de dados e fonte de energia dentro do equipamento.

A desvantagem deste tipo de dispositivo é ser empregado em pequenas profundidades, o que limita o seu uso a águas rasas. No entanto, para o estudo de ondas em reservatórios e águas interiores, esse pormenor não é empecilho. O custo desses equipamentos é da ordem de US\$ 15.000, excluída a estrutura de fixação no fundo da água.

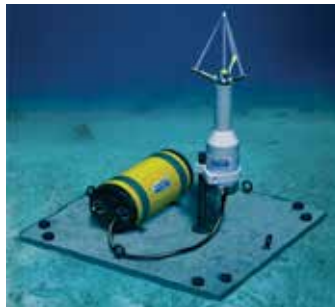


Figura 4. SonTek ADVOcean-Hydra (Fonte: www.sontek.com).

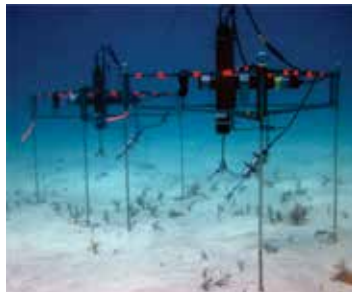


Figura 5. Nortek Vector (Fonte: www.nortek.com).

4.1.2.2 Perfiladores de corrente

Outra forma de se avaliar a variação da direção e pressão das ondas é empregando perfiladores de velocidade. A diferença desse equipamento para os correntômetros é a possibi-

lidade de se criar o perfil de velocidades em uma coluna d'água, que pode se estender até a superfície. A desvantagem é a frequência de aquisição dos dados de velocidades, o que limita a aquisição de dados de ondas com períodos maiores que 1s.

Existem diversos fabricantes e equipamentos disponíveis no mercado. A maior parte dos equipamentos é uma adaptação de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), que são empregados tradicionalmente para determinar perfis de velocidades e medição de vazão em rios.

Entre os equipamentos disponíveis, pode-se destacar a linha Sentinel V Waves Array da Teledyne RDI (Figura 6), que pode funcionar a profundidades de até 80m, sendo que todos os sensores, incluindo os de pressão, têm uma taxa de aquisição de 2 Hz. Para a maioria das situações observadas em reservatórios, esse equipamento não seria muito indicado, pois o período mínimo do perfil de velocidade seria de 3,5s, quando instalado a 20m de profundidade. O equipamento não possui baterias externas, fazendo-se necessário, portanto, o uso de um módulo extra para isso.

A fabricante Nortek tem dois sistemas diferentes de perfilamento acústico: o AWAC (Figura 7), que tem características similares ao Sentinel V, e o Aquadopp Profiler (Figura 8). A principal diferença deste segundo é que ele possui baterias internas com autonomia de até 80 dias de medição. Por ser compacto, o equipamento pode ser instalado em estruturas como boias ou mesmo em veículos autônomos. Ambos os equipamentos apresentam a mesma limitação para medir períodos de onda mais curtos e/ou amplitudes menores, que são frequentes nas águas interiores.

Os perfilhadores de corrente têm preços a partir de US\$ 22.000,00, que tendem a variar dependendo dos acessórios requeridos.



Figura 6. Teledyne RDI Sentinel V (Fonte:www.teledynemarine.com).

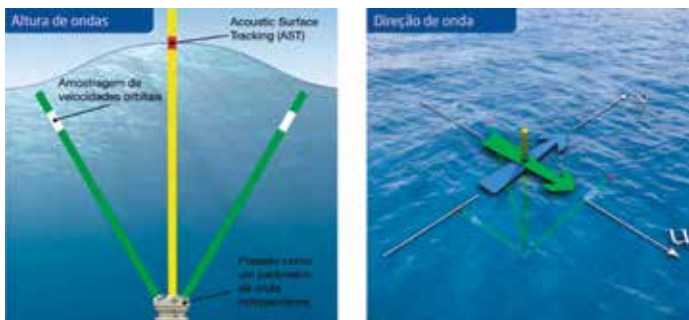


Figura 7. Nortek AWAC (Fonte: www.nortek.com).

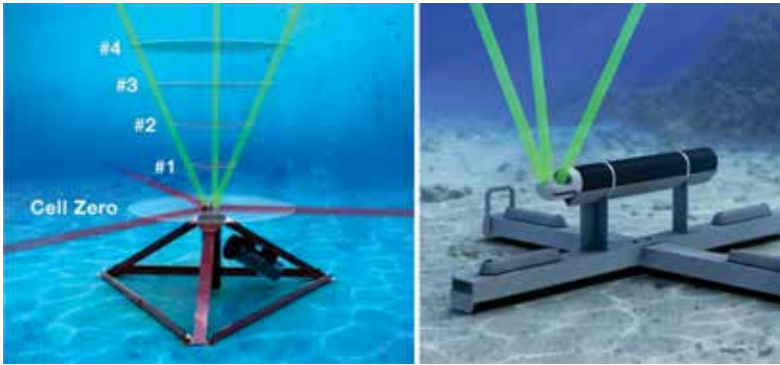


Figura 8. Nortek Aquadopp (Fonte: www.nortek.com).

4.2 Sensoriamento remoto

Os equipamentos que são montados acima da superfície da água em uma plataforma fixa ou movendo são chamados instrumentos de sensoriamento remoto. A plataforma pode ser uma torre de observação no mar, um navio, um avião ou um satélite.

O princípio dessas técnicas é receber reflexões de luz visível da superfície do mar, infravermelha ou energia de radar. A diferença operacional mais importante das técnicas *in situ* é que grandes áreas podem ser cobertas quase que instantaneamente, particularmente se a plataforma for um satélite. No entanto, a medida remota é muitas vezes imprecisa, mas ainda estão em fase de desenvolvimento, o que a torna muitas vezes mais cara que as medições *in situ*. Por outro lado, os governos e as organizações internacionais frequentemente subsidiam a detecção remota, e os seus custos são compartilhados com muitos outros usuários, de forma que o sensoriamento remoto ainda pode ser financeiramente viável para o usuário individual (HWANG et al., 1998).

4.2.1 Uso de imagens

Estereofotografia

A fotografia é uma técnica natural para observar as ondas. Com estereofotografia, é possível obter uma imagem tridimensional da superfície. Essa é uma técnica antiga e muito empregada na topografia do continente: uma câmera de alta qualidade, focada verticalmente para baixo de um avião, tira fotografias a cada poucos segundos de seções sobrepostas do terreno abaixo. As diferenças nas fotos sobrepostas podem ser convertidas em elevações, criando-se assim uma imagem tridimensional do terreno.

Para o monitoramento de ondas que estão em movimento, esta técnica com uma câmera não é suficiente porque a própria superfície mudaria entre uma foto e outra, se essas fotos fossem tiradas sequencialmente no tempo. Assim, para o monitoramento de ondas, são necessárias duas câmeras sincronizadas, geralmente operadas a partir de dois aviões voando em formação (HOLTHUIJSEN, 1983).

Radar

O radar de navio convencional é normalmente usado para detectar obstáculos rígidos em torno de um navio, isto é, obstáculos que são potencialmente perigosos para a embarcação. Esse monitoramento é realizado por meio de sua tela bem conhecida, denominada Indicador de Posição do Plano ou PPI, mostrando uma varredura do ambiente. Estes radares são, portanto, sempre ajustados para mostrar as reflexões de tais superfícies rígidas. No entanto, eles também podem ser configurados para mostrar as reflexões de superfícies mais suaves, como uma praia ou ondas.

O reflexo captado deve-se principalmente à ressonância entre as ondas do radar e as características na superfície da água (dispersão de Bragg). Uma vez que o comprimento de onda do radar está geralmente na escala do centímetro, somente as ondas de água muito curtas refletem as ondas do radar (ondas capilares, que são geradas pelo vento corrente, mas de outra maneira dominadas pela tensão de superfície). Essas ondas muito curtas são moduladas por ondas mais longas, as ondas de interesse no estudo de erosões, porque, devido ao movimento orbital das partículas de água nas ondas mais longas, elas são ligeiramente mais curtas na crista do que nas depressões dessas ondas mais longas.

O radar detecta essa modulação, cujo padrão é que cria a imagem das ondas mais longas na tela do radar. Radares baseados no mesmo princípio foram construídos em aviões e satélites para observar ondas em uma escala regional ou oceânica. O problema para aplicações em grandes altitudes é que a antena precisa ser muito grande para distinguir as ondas individuais mais longas no padrão de modulação.

Esse radar com um sinal programado é chamado radar de abertura sintética (SAR). As imagens SAR são suficientemente realistas e podem ser analisadas para obter não a própria elevação de superfície, mas suas características estatísticas em áreas selecionadas de tamanho limitado, na forma do espectro de número de onda bidimensional.

4.2.2 *Altimetria*

Altimetria Laser

Uma técnica muito utilizada, baseada também na emissão de luz, é o laser. Como um medidor de nível, um laser descendente pode medir a distância vertical do instrumento para a superfície da água com bastante precisão. Ele pode ser montado em uma plataforma fixa ou em um avião, mas não em um satélite, onde sua operação estaria demasiado impedida pelas condições meteorológicas (KURIYAMA, 1994).

O desdobramento de um avião tem algumas características especiais, porque a superfície da água é medida ao longo de uma linha (laser simples) ou em uma área limitada (Lidar), e o avião e a elevação de superfície movem-se durante a observação.

O Lidar é um altímetro de laser montado a partir de um avião capaz de escanear a superfície com um feixe em movimento, refletindo fora de um espelho giratório, ao longo de linhas estreitamente espaçadas na superfície da água, normal à trajetória de voo ou em um padrão circular.

Esta técnica fornece uma imagem tridimensional da superfície do mar, praticamente “congelada” no tempo como em uma estereofoto. No entanto, algumas distorções ocorrem,

visto que o scanner precisa de tempo para construir a imagem e tanto a superfície da água e o avião se movem no tempo. (SASAKI et al., 2005).

Altimetria por Radar

Um radar de raio estreito, olhando para a superfície do mar, também pode ser usado como um altímetro. Se o radar estiver localizado perto da superfície da água (em uma plataforma fixa ou em um avião de voo baixo), ele é preciso o suficiente para medir a elevação real da superfície do mar diretamente abaixo do instrumento. Uma variação dessa técnica é a varredura da superfície do mar com o feixe de radar, de uma maneira quase idêntica à do mapeador topográfico aerotransportado a laser (ATM, ver acima). Esse sistema é chamado de radar de contorno de superfície ou de radar de varredura.

A partir de uma distância maior, em particular a partir de um satélite, o modo de funcionamento do altímetro radar é bastante diferente. Para tais aplicações, o feixe de radar (sem varredura) está apontando para baixo, para a superfície do mar, mas sua pegada (o ponto na superfície do mar que é “iluminado” pelo feixe de radar) é tipicamente de alguns quilômetros de diâmetro, o que também é grande para resolver ondas individuais. No entanto, o sinal de radar que é refletido a partir da pegada para o satélite é de alguma forma distorcido pela presença das ondas na pegada. Essa distorção pode ser usada para estimar a rugosidade da superfície, que, por sua vez, pode ser convertida em uma altura característica da onda (a altura significativa da onda. Veja a Seção 3.3.2). Para explicar isso, considere um instrumento de radar que transmite um pulso de energia eletromagnética do satélite para a superfície do mar (Fig. 2.7). Esse pulso, quando proveniente de uma altitude suficientemente elevada, chega à superfície do oceano como uma frente (quase) horizontal e plana. Quando a superfície da água é horizontal e plana também, a reflexão do pulso do radar é instantânea e é recebida pelo satélite como um pulso. No entanto, na presença de ondas, as reflexões ocorrem primeiramente nas cristas de ondas mais altas. Isso dá um início fraco da reflexão recebida pelo satélite. À medida que a frente do radar na superfície do mar se propaga mais para baixo, para dentro das calhas de onda, ela cobre cada vez mais área superficial e eventualmente chega ao fundo das calhas de onda. A reflexão se acumula correspondentemente e morre quando é recebida pelo satélite. Quando as ondas são muito baixas, a distorção do pulso é pequena e o sinal de retorno é curto (estreito no tempo). Se as ondas são mais altas, a distorção é maior e o sinal de retorno se alarga. Esse alargamento é, por conseguinte, uma medida da rugosidade da superfície do mar e de alguma altura de onda característica na pegada do feixe de radar. Na prática, a inclinação do bordo dianteiro do sinal de retorno é usada como uma medida da rugosidade da superfície do mar.

5 Modelos de Propagação de Ondas

5.1 Energia das ondas

A energia mecânica total numa onda de gravidade da superfície é a soma das energias cinética e potencial. As equações, para cada forma, podem ser derivadas considerando a Figura 2.

A energia cinética (E_k) para uma unidade de largura de crista da onda e para um comprimento de onda é igual ao integral sobre um comprimento de onda e a profundidade da água, multiplicada pela massa de um elemento diferencial vezes a velocidade do referido elemento quadrado. Assim:

$$E_k = \int_0^L \int_{0-d}^0 \frac{1}{2} \rho dx dz (u^2 + w^2) \quad (6)$$

sendo u e w as velocidades de deslocamento da onda na direção x e y , respectivamente. O limite superior da integral vertical é tomado como zero, de acordo com os pressupostos da teoria das ondas de pequena amplitude. Integrando os termos, encontra-se que:

$$E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (7)$$

Ao subtrair a energia potencial de uma massa de água fixa (em relação ao fundo) a partir da energia potencial, ter-se-á a energia potencial devida unicamente à forma de onda. Isso dá a energia potencial (E_p) por largura de onda crista da unidade e por um comprimento de onda, como:

$$E_k = \int_0^L \rho g (d + H) \left(\frac{d + H}{2} \right) dx - \rho g L d \left(\frac{d}{2} \right) \quad (8)$$

em que d é a profundidade média da onda em relação ao fundo.

Integrando e arrumando as equações, obtêm-se:

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (9)$$

Assim, as energias cinética e potencial são iguais e a energia total em uma onda por unidade de largura de crista E será:

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (10)$$

Uma onda de propagação através de uma estrutura com aberturas para passagem, por exemplo, em que a profundidade da água é a mesma em ambos os lados da estrutura, terá o mesmo período de comprimento de onda e em ambos os lados. Assim, uma redução de energia da onda, devido à reflexão a partir da estrutura e dissipação viscosa dentro da estrutura, irá resultar numa diminuição na altura da onda. Uma redução de 50% na energia das ondas resultaria em apenas uma diminuição de 29% na altura da onda porque a energia da onda é proporcional ao quadrado da altura da onda.

A energia dada pela Eq. 10 é variável de um ponto para outro ao longo de um comprimento de onda. No entanto, um conceito útil é a energia média por unidade de área superficial dada por:

$$\bar{E} = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (11)$$

O termo da Eq. 11 é conhecido como a densidade de energia ou a energia específica de uma onda.

5.2 Equações básicas da cinética das ondas

As equações básicas que regem a propagação das ondas são a equação da conservação de massa e a equação da conservação da quantidade de movimento.

A equação da conservação de massa obedece ao padrão para escoamentos trimensionais e é fornecida por:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

sendo u a velocidade do escoamento.

A equação para a quantidade de movimento para águas rasas é obtida a partir de uma versão dependente do tempo da equação do balanço da ação da onda. Semelhante ao model HISWA (Hindcasting of Waves in Shallow-Water), proposto por Holthuijsen et al. (1989), a distribuição direcional da densidade de ação das ondas é tomada em consideração, ao passo que o espectro de frequências está representado por uma única frequência representativa. O saldo da onda de ação é então dado por (ROELVINK ET AL., 2009):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} + \frac{\partial c_\omega A}{\partial \omega} = T - D_w$$

onde A densidade de ação da onda definida como

$$A = \frac{\bar{E}}{\sigma} \quad (2)$$

Em que \bar{E} é a densidade de energia, ω é a frequência absoluta, θ é a direção, x e y são as direções espaciais, ω é a frequência relativa, c_x e c_y são os componentes do grupo de celeridade da onda nas direções x e y , D_w é a energia dissipada devido à rebentação, que se descreve abaixo, e T é a energia gerada pelo vento. A frequência relativa é dada por (HULTHUIJSEN ET AL., 1989):

$$\sigma = \omega - \mathbf{kV}$$

k é o número da onda obtido pela equação do eikonal, e V é a velocidade da corrente.

$$\frac{\partial k_x}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0$$

O valor de k será então dado por:

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

A frequência absoluta radial é fornecida por:

$$\omega = \sigma + k_x u^l + k_y v^l$$

As velocidades de onda de ação de propagação em x (c_x) e y (c_y) são dadas por:

$$c_x = c_g \cos(\theta) + u^L$$

$$c_y = c_g \sin(\theta) + v^L$$

$$c_\theta = \frac{\sigma}{\text{senk}2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \text{sen}\theta - \frac{\partial h}{\partial y} \text{cos}\theta \right) + \text{cos}\theta \left(\text{sen}\theta \frac{\partial u}{\partial x} - \text{cos}\theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \text{sen}\theta \left(\text{sen}\theta \frac{\partial v}{\partial x} - \text{cos}\theta \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

em que u^L e v^L são as velocidades Lagrangianas médias em profundidade nas direções transversal e longitudinal, respectivamente, e c_g a velocidade de grupo obtida pela teoria linear da onda, dada por (DE VRIES, 2009):

$$c_g = nc_w = \left(\frac{1}{2} + \frac{k_w h}{\sinh 2k_w h} \right) \frac{\omega}{k_w}$$

A equação de dissipação da energia, integrada no espectro na direção da propagação, devido ao efeito da arrebentação, é dada por:

$$\bar{D}_w = \frac{\alpha}{\pi} Q_b \sigma E$$

Sendo os termos expressos pelas equações abaixo:

$$Q_b = 1 - e^{-\left(\frac{H_{RMS}}{H_{MAX}} \right)^n}$$

Pela equação (11):

$$H = \sqrt{\frac{8E}{\rho g}}$$

E a energia total é igual à soma das energias de densidade de onda, na onda e na direção de propagação:

$$E = \int_0^{2\pi} \bar{E} d\theta$$

A altura máxima da onda é fornecida pela equação:

$$H_{MAX} = \frac{\delta \tanh kh}{k}$$

Sendo a constante de arrebentação da onda e a massa específica da água.

O modelo assume que a energia total dissipada é distribuída proporcionalmente em todas as componentes direcionais, assim:

$$D_w = \frac{\bar{E}}{E} \bar{D}_w$$

Após serem calculadas a distribuição espacial da ação da onda e a energia da onda, são calculadas as tensões de radiação, com base na teoria linear:

$$S_{xx,w} = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) \bar{E} d\theta$$

$$S_{yy,w} = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \sin^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta$$

$$S_{xy,w} = S_{yx,w} = \int \sin \theta \cos \theta \frac{c_g}{c} \bar{E} d\theta$$

5.3 Transporte de sedimentos

O processo de transporte de sedimentos em suspensão em um fenômeno que ocorre nas 3 dimensões do espaço. Alguns modelos já foram desenvolvidos levando a direção vertical explicitamente em consideração (Smith e O'Connor, 1977), considerando um direção de propagação, tornando um modelo bidimensional (2DV). A extensão desses métodos para situações de 3D, contudo, será muito onerosa computacionalmente, especialmente se for constatado que longos períodos de tempo precisam de avaliação. Problemas semelhantes para substâncias dissolvidas foram resolvidos pela introdução do conceito de dispersão, por meio da integração em profundidade chamada modelos 2DH. Essa abordagem proposta por Galappatti e Vreugdenhil (1985) é amplamente adotada em modelos de previsão de erosões em ambientes costeiros e se aplicam plenamente à análise de reservatórios.

No modelo acima referido, o balanço de massa para o sedimento em suspensão em uma corrente de fluxo pode ser expresso na forma de uma equação diferencial parcial, que descreve os processos de convecção, difusão turbulenta e precipitação em termos da concentração local de sedimentos.

Se a equação do balanço de massa for obtida pela média profundidade, o processo de reajuste vertical dos perfis de concentração – possivelmente o mecanismo mais importante envolvido – é diminuído e substituído por uma função de arraste empírica. No entanto, a necessidade de calibrar esse efeito muito importante restringirá o poder preditivo de tais modelos com média de profundidade. A verificação de uma função de arrastamento geralmente tem de ser feita indiretamente. Assim, há uma necessidade de desenvolver outras soluções aproximadas para a equação de balanço de massa, com base em suposições mais explícitas e facilmente verificáveis (ROELVINK et al., 2009).

No modelo desenvolvido por Galappatti e Vreugdenhil (1985), o ajuste da distribuição de concentração é formulado em termos de perfis de similaridade, incluindo o desvio do equilíbrio local para as diferentes equações. Os coeficientes dos perfis de similaridade dependem da concentração média ponderada e das suas derivadas horizontais.

Assim, para uma situação verticalmente 2D, as equações a serem resolvidas são reduzidas para 1D; para situações 3D, as equações têm de ser resolvidas em uma região 2DH. O modelo resultante pode ser usado em conjunto com as equações hidrodinâmicas, com média de profundidade em grandes regiões e por grandes períodos. Como de costume, a solução de similaridade não pode ser aplicada para fenômenos de pequena escala, mas somente em escalas suficientemente grandes.

O uso do modelo de Galappatti e Vreugdenhil (1985) para o transporte de sedimentos em ambientes sujeitos à erosão por ondas foi efetivado por De Vries (2009) e implementado em modelos de propagação de ondas de fase como o XBEACH (ROELVINK et al., 2009).

Assim, transporte de sedimentos pode ser modelado com uma equação de difusão-advecção, com média na profundidade pela seguinte equação Galappatti (1983):

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu}{\partial x} + \frac{\partial hCv}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}$$

onde C representa a concentração média de sedimentos na profundidade, que varia na escala de tempo do grupo de ondas, e D_h é o coeficiente difusivo dos sedimentos.

A concentração de sedimentos adapta-se gradualmente à alteração das condições hidráulicas, usando uma escala de tempo de adaptação T_s para o arraste de sedimentos, que é dada por uma expressão simples na profundidade da água local h e a velocidade de queda do sedimento w_s :

$$T_s = \max \left(0,05 \frac{h}{w_s}, T_{s,min} \right)$$

Nessa expressão, $T_{s,min}$ é um tempo mínimo de adaptação adotado (recomenda-se um valor de 1,0s). Em águas rasas, T_s torna-se muito pequeno, assim, T_s tende a ser igual à $T_{s,min}$, e a concentração de sedimentos responde quase instantaneamente à hidrodinâmica em mudança.

O transporte ou deposição de sedimento é determinado pela defasagem entre a concentração real de sedimento C e a concentração de equilíbrio C_{eq} , representando assim o termo de origem na equação de transporte de sedimentos proposta.

O valor da concentração de sedimento de equilíbrio (C_{eq}) pode ser calculado com uma formulação de transporte proposta por Van Rijn (2007):

$$C_{eq} = \frac{A_{sb}}{h} \left(\sqrt{(u)^2 + 0,64u_{RMS,2}^2} - u_{cr} \right)^{1,5} + \frac{A_{ss}}{h} \left(\sqrt{(u)^2 + 0,64u_{RMS,2}^2} - u_{cr} \right)^{2,4}$$

onde A_{sb} e A_{ss} são os coeficientes de transporte de carga de leito e suspensa, respectivamente. O sedimento é agitado pela velocidade de fluxo Euleriana e pela velocidade orbital da onda curta próximo ao leito. O efeito da turbulência induzida pela quebra de onda está incluído em u_{rms} , que é a velocidade orbital próximo do fundo, e teve o seu valor proposto por Reniers et al. (2004):

$$u_{RMS,2} = \sqrt{u_{RMS}^2 + 1,45k_b}$$

em que k_b é a média da energia média de turbulência do leito. A velocidade de pico do orbital próximo no leito (u_{rms}) é obtida a partir da energia de onda variável do grupo de ondas, usando a teoria de ondas lineares:

$$u_{RMS} = \frac{\pi H_{rms}}{\sqrt{2} T_m \sinh(kh)}$$

Para que possa ocorrer um arraste do sedimento, a velocidade crítica u_{cr} tem de ser excedida. O valor da velocidade crítica é obtido pelos termos devido somente à corrente, baseado em Shields ($u_{cr,c}$) e no escoamento crítico provocado pelas ondas ($u_{cr,w}$), baseado no trabalho de Komar e Miller (1975). Assim:

$$u_{cr} = \alpha u_{cr,c} + (1 - \alpha) u_{cr,w}$$

onde:

$$\alpha = \frac{u}{u + u_{rms,2}}$$

5.4 *Avalanche*

Para explicar a queda do material não coesivo durante um evento de erosões de solapamentos, é preciso que a modelagem considere as alterações que ocorrem no leito e nas bordas da região do reservatório. A avalanche, ou solapamento, ocorre quando uma inclinação crítica do fundo é excedida.

Com uma expressão semelhante para a direção y . Deve-se considerar que as áreas submersas são muito mais propensas a solapar e, portanto, aplicam-se valores de inclinações críticas separados para pontos secos e úmidos: os valores de m_{cr} padrão são 1 e 0,3, respectivamente. Esses valores são consistentes com o perfil de equilíbrio verificado por Vellinga (1986). Ele é mais alto que o ângulo de repouso natural e deve ser visto como uma inclinação média observada após a erosão das dunas, em que alguns trechos podem exibir declives verticais e outras partes mais secas podem ter inclinações maiores.

A declividade crítica submersa é mais baixa, e a estimativa sugerida é baseada no trabalho de Visser (1998).

O processo de ajuste do leito no modelo deve ser feito quando a inclinação crítica entre duas células adjacentes é excedida. O sedimento é trocado entre essas células para a quantidade necessária, a fim de trazer a inclinação de volta para a inclinação crítica. Essa taxa de transferência é limitada por uma taxa de transporte de avalanche máxima adotada, que, para ambientes não coesivos, é normalmente tão elevada que não tem qualquer influência sobre o resultado, garantindo-se simultaneamente estabilidade numérica. (ROELVINK et al., 2009).

Em simulações de modelos, o mecanismo de avalanche é tipicamente desencadeado quando uma onda com muita energia atinge a frente de dunas e a inunda parcialmente. O declive submerso crítico é repentinamente excedido e as duas células da grade na parte inferior da duna são ajustadas durante o primeiro passo de tempo quando isso acontece.

Em passos de tempo subsequentes, uma reação em cadeia pode ocorrer tanto em pontos situados na parte seca, na qual agora o declive seco crítico pode ser excedido por causa do abaixamento do último ponto úmido como em pontos para o reservatório, nos quais agora a inclinação crítica molhada pode ser excedida. Como resultado, o sedimento é trazido da parte seca para a úmida, quando é transportado mais para o interior do reservatório.

Referências

- BUCKLEY, W. H. ; PIERCE, R.D; PETERS, J.B; DAVIS, M.J. Use of the half-cycle analysis method to compare measured wave height and simulated Gaussian data having the same variance spectrum. *Ocean engineering*, v. 11, n. 4, p. 423-445, 1984.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica. 106p, 2000.
- CAVALERI, L. The oceanographic tower Acqua Alta—activity and prediction of sea states at Venice. *Coastal Engineering*, v. 39, n. 1, p. 29-70, 2000.
- DEAN, Robert G.; DALRYMPLE, Robert A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific Publishing Co Inc, 1991.
- DE VRIES, J. S. M. T. *Dune erosion during storm surges*. Tese de Doutorado. TU Delft, Delft University of Technology. 2009.
- GALAPPATTI, G.; VREUGDENHIL, C. B. A depth-integrated model for suspended sediment transport. *Journal of Hydraulic Research*, v. 23, n. 4, p. 359-377, 1985.
- GODA, Y. Effect of wave tilting on zero-crossing wave heights and periods. *Coastal Engineering in Japan*, v. 29, p. 79-90, 1986.
- HWANG, P. A.; WALSH, E.J.; KRABILL, W.B.; SWIFT, R.N; MANIZADE, S.S.; SCOTT, J.F; EARLE, M.D. Airborne remote sensing applications to coastal wave research. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 103, n. C9, p. 18791-18800, 1998.
- HOLTHUIJSEN, L.H., BOOIJ, N., T.H.C. HERBERS. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, v. 13, p. 23-54, 1989.
- HOLTHUIJSEN, L.H. Stereophotography of ocean waves. *Applied ocean research*, v. 5, n. 4, p. 204-209, 1983.
- HOLTHUIJSEN, L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge: Cambridge University Press. 2007.
- JANSEN, Peter. *The interaction of ocean waves and wind*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- KOMAR, P.D.; MILLER, M.C. On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold: Reply. *Journal of Sedimentary Research*, v. 45, n. 1, 1975.
- KURIYAMA, Y. Numerical model for longshore current distribution on a bar-trough beach. In: *Coastal Engineering 1994*. p. 2237-2251, 1995.

NAGAI, T.; SATOMI, S.; TERADA, Y.; KATO, T.; NUKADA, K.; KUDAKA, M. *GPS buoy and seabed installed wave gauge application to offshore tsunami observation*. In: The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2005.

RENIERS, Ad JHM; ROELVINK, J. A.; THORNTON, E. B. Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 109, n. C1, 2004.

ROELVINK, D.; RENIERS, A.; Van DONGEREN, A.; Van THIEL de VRIES, J.; McCALL, R.; LESKINSKI, J. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, Vol. 56, p. 1133 – 1152, 2009.

SASAKI, W.; IWASAKI, S.I; MATSUURA, T; IIZUKA, S; WATABE, I. Changes in wave climate off Hiratsuka, Japan, as affected by storm activity over the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 110, n. C9, 2005.

SMITH, T. J. ; O'CONNOR, B. A., *A 2-d model for suspended sediment transport*. Baden-Baden: IAHR Congress, 1977.

TUCKER, M.J.; PITT, E.G. *Waves in Ocean Engineering*, Amsterdam: Elsevier, 2001, 521 pp.

VAN RIJN, L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of hydraulic engineering*, v. 133, n. 6, p. 649-667, 2007.

VISSER, P.J. *Breach growth in sand dikes*. Tese de Doutorado. TU Delft, Delft University of Technology. 1998.

WOLF, J.; PRANDLE, D. Some observations of wave-current interaction. *Coastal Engineering*, v. 37, n. 3, p. 471-485, 1999.

CAPÍTULO 13

Cartografia geotécnica e a preservação ambiental das bordas dos reservatórios

Newton Moreira de Souza
Patrícia de Araújo Romão

Palavras-chave: Planejamento. Análise espacial. Geoprocessamento. Sensoriamento remoto.

1 Introdução

A cartografia geotécnica surge como técnica para o entendimento das condições do meio físico, voltada para os interesses da engenharia, na passagem do século XIX para o XX. No desenrolar do século XX se desenvolveu, estabelecendo bases metodológicas que permitiram a incorporação das tecnologias da informação, colocando-a como ferramenta fundamental nos processos de decisão. A Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Ambiental (IAEG) formou sua primeira Comissão Técnica em 1968, cuja temática era a cartografia geotécnica. Essa Comissão, presidida pelo professor Milan Matula, promoveu amplo debate sobre o estado da arte dessa técnica, e em 1976 publicou com apoio da Unesco um guia, editado pelo professor W. R. Dearman, para elaboração de cartas geotécnicas (IAEG, 1976). Em 1991 Dearman publicou seu livro, reunindo o conhecimento adquirido (DEARMAN, 1991).

É interessante observar que os trabalhos pioneiros de cartografia geotécnica no Brasil ocorreram na década de 1960, coincidindo com a inclusão, no mercado de trabalho, dos primeiros geólogos formados no País e, mais ainda, com o princípio do desenvolvimento da Geologia de Engenharia face às exigências inerentes ao surto de grandes obras civis nessa época. Os trabalhos pioneiros que tratam de metodologia de mapeamento geotécnico ou similar e sua aplicação no Brasil tiveram lugar também nessa década, em especial os trabalhos desenvolvidos na Universidade do Rio de Janeiro pelo professor Hermann Haberlehner em 1966, com a primeira publicação nos Anais do 20º Congresso Brasileiro de Geologia, em Vitória (ES).

Na década de 1970, inicia-se no Brasil a aplicação de métodos internacionais de cartografia geotécnica.

Em 1974 dois importantes produtos foram desenvolvidos, um de Coulon sobre a região de Morretes e Montenegro (RS); outro, do IPT sobre os morros de Santos e São Vicente (SP). Apesar de deixarem a desejar quanto ao conteúdo geotécnico, ambos são marcos históricos – não só quanto à elaboração de documentos cartográficos, mas também quanto à preocupação com o uso das informações geotécnicas. (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004).

Na década de 1980, a cartografia geotécnica passou a ter maior importância e ganhou impulso com os trabalhos realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do estado de São Paulo, voltados inicialmente aos problemas urbanos, como escorregamentos e erosão em encostas ocupadas por loteamentos nas áreas de expansão. Houve incremento no volume de trabalhos, na década de 1990, com a consolidação do grupo de pesquisa da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), liderado pelo professor Nilson Gandolfi. Nessa década também ocorreu uma maior disseminação desta tecnologia, resultando no aumento do envolvimento de outras instituições de pesquisa com trabalhos de cartografia geotécnica. Entre essas, podemos citar a Universidade de Brasília (UNB), a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), a Universidade Federal de Viçosa (UFV), a Universidade do Estado de São Paulo (Unesp), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), além de instituições governamentais responsáveis por mapeamentos sistemáticos, tais como o Instituto Geológico do estado de São Paulo (IG/SP) e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

As facilidades na elaboração de produtos cartográficos advindas da incorporação das tecnologias de geoprocessamento, bem como a grande demanda pela conservação ambiental incluindo o planejamento, projeto e controle das atividades antrópicas, estão levando a um uso cada vez maior da cartografia geotécnica.

A degradação ambiental provocada pelo mau uso dos recursos naturais evidencia um dos principais objetivos da cartografia geotécnica, que é o de harmonizar as atividades humanas com as condições do meio ambiente. O represamento de água para os mais diversos usos que ela pode ter leva a preocupações com os impactos, positivos e negativos, que tal intervenção pode causar, bem como com o desempenho do empreendimento ao longo do tempo. A degradação ambiental no entorno de um reservatório pode ser fatal para o seu bom funcionamento, podendo levar não só à diminuição da sua vida útil, mas também à redução da qualidade dos serviços oferecidos pela própria degradação da qualidade da água e de seu entorno.

Neste sentido, a cartografia geotécnica se mostra como ferramenta apropriada para entender os processos de degradação promovida pelas atividades antrópicas e para propor ações preventivas e restauradoras das boas condições ambientais.

Usando o método dos modelos, constroem-se esquemas simplificados com os componentes que têm significativa importância ao entendimento geotécnico, a saber: a distribuição e propriedades da rocha e solo, a água subterrânea e superficial, as características do relevo e dos processos geodinâmicos presentes (IAEG, 1976).

Ainda segundo a IAEG (1976), uma carta geotécnica mostra que a distribuição e relações espaciais desses componentes básicos podem refletir a história como também a dinâmica do desenvolvimento das condições geotécnicas, permitindo prognosticar a influência do ambiente na obra, assim como prever em qual aspecto essa interferirá no ambiente. Evidentemente, tais cartas não são capazes de substituir uma investigação detalhada local, mas poderão auxiliar no projeto racional da investigação local e na interpretação dos resultados. As cartas podem servir somente a certas finalidades específicas, ou podem apresentar um extenso propósito de múltiplas finalidades necessárias para resolver problemas mais gerais. Elas podem ser úteis nas primeiras etapas do planejamento, como também nos estágios finais dos projetos urbanos, industriais, de transporte, hidrotécnicos e de outras

construções. Dependendo da finalidade, as cartas podem ser de variada extensão, escala e detalhe. Podem ter diferentes conteúdos e uma variada escolha dos atributos mapeados, como também distintos aspectos de sua avaliação. Em todas essas variedades e individualidades, as cartas geotécnicas, assim como as cartas litológicas, estratigráficas e tectônicas, devem incorporar certas convenções, uma classificação, princípios comuns e certo grau de padronização.

No caso das bordas dos reservatórios, especial atenção deve ser dada aos processos erosivos que causam danos não só onde ocorrem, mas também por onde os sedimentos gerados se deslocam e principalmente onde se depositam. Áreas com baixas condições de drenagem e alto potencial de alagamento podem se formar pela elevação do lençol freático. A alteração da dinâmica do lençol freático também pode induzir movimentos de massa, como escorregamentos e rastejos em bordas mais suscetíveis, não só pela sua condição de relevo, mas associada a outros fatores que devem ser investigados em conjunto para definição de ações de prevenção e controle desses processos danosos.

2 Princípios da Cartografia Geotécnica

Os principais fatores criadores da condição geotécnica são: rocha e solo, água, condição geomorfológica e processos geodinâmicos. Uma carta fornece uma melhor ideia de um ambiente geológico quando incluir o caráter e a variação das condições geotécnicas, seus componentes individuais e suas inter-relações, mas, ao mesmo tempo, trata-se de um modelo simplificado dos fatos, uma vez que a complexidade dos vários fatores geológicos nunca poderá ser inteiramente representada. O grau de simplificação depende principalmente da finalidade e escala do mapa, da importância relativa dos fatores geotécnicos específicos ou relacionados, da precisão das informações e técnicas da representação usada.

Uma carta geotécnica deve satisfazer às seguintes exigências:

1 – Retratar as informações objetivas necessárias para avaliar as características geotécnicas relativas ao planejamento regional, à seleção do lugar e ao método mais adequado de construção e mineração.

2 – Fazer o possível para prever as variações na situação geológica induzida pelo empreendimento proposto e para sugerir medidas preventivas necessárias.

3 – Apresentar informações de forma a facilitar o entendimento por profissionais que a usarão, os quais podem não ser geólogos / geotécnicos.

Cartas geotécnicas podem ser baseadas nos mapas geológicos, hidrogeológicos e geomorfológicos, mas devem apresentar e avaliar os fatos básicos fornecidos por esses mapas em termos de geotecnia.

Uma carta geotécnica é um tipo de carta geológica, que fornece uma representação generalizada de todos os componentes do ambiente geológico de significado no planejamento do uso da terra e em projetos, construção e manutenção aplicada a obras civis e de mineração.

As feições geológicas representadas nas cartas geotécnicas são:

1 – Caráter das rochas e solos, incluindo sua distribuição, arranjo estratigráfico e estrutural, idade, gênese, litologia, estado físico e suas propriedades mecânicas, físicas e mineralógicas.

2 – Condições hidrogeológicas, incluindo a distribuição da capacidade de armazenamento da água no solo e rochas, zonas de saturação em descontinuidades abertas, profundidade do nível de água e suas variações flutuantes, regiões de água confinada e níveis piezométricos, coeficiente de estocagem, direção de fluxo, fontes, rios, lagos e o limite e intervalo de ocorrência de enchentes, pH, salinidade e corrosividade.

3 – Condições geomorfológicas, incluindo superfície topográfica e elementos importantes da paisagem.

4 – Fenômeno geodinâmico, incluindo erosão e deposição, fenômeno eólico, movimentos de encostas, formação de condições cársticas, subsidências, variação no volume do solo, dados de fenômenos sísmicos (inclusive falhas ativas), movimentos tectônicos regionais atuantes e atividades vulcânicas.

5 – Outras informações, em especial as das atividades antrópicas, tais como as de uso e ocupação do solo, áreas especiais definidas em legislação, divisão fundiária.

3 Uso de Sistemas de Informações Geográficas para a Cartografia Geotécnica

Devido aos avanços ocorridos na cartografia digital, no geoprocessamento e no sensoriamento remoto durante os últimos anos, hoje é muito difícil conceber qualquer análise de fenômenos espaciais sem o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A solução de problemas complexos de planejamento e gerenciamento, que envolvam a manipulação de dados espacialmente localizados, passa necessariamente pelo uso do SIG. Da mesma forma, as tecnologias de dados espaciais digitais podem facilitar os trabalhos de compartimentação da carta geotécnica.

O uso do SIG não garante o sucesso de um projeto, mas permite uma melhor organização, armazenamento, recuperação e atualização das informações cartográficas e a formação de bases de dados, possibilitando a análise espacial. Com a análise espacial é possível não só recuperar as informações espacializadas, mas estabelecer modelos a partir de critérios técnicos para definição de diagnósticos e prognósticos geotécnicos, visando à identificação de locais adequados para obras, locais suscetíveis à ocorrência de eventos danosos, vulnerabilidade frente a esses eventos, exploração de recursos naturais, definição de diretrizes de projetos e monitoramento, bem como orientações para o uso e ocupação territorial em harmonia com o meio ambiente.

O fluxograma da Figura 1 apresenta de forma sucinta como a cartografia geotécnica organizada em um SIG pode dar suporte a decisões.

O início do processo se dá pela definição dos objetivos e da escala de mapeamento. Uma vez conhecidas essas diretrizes, são coletados os dados para a realização dos trabalhos, incluindo cartas e mapas existentes, relatórios de temas pertinentes, produtos de sensoriamento remoto, bases cartográficas, levantamentos de campo e laboratório e demais dados que se julgar necessário. Com essa base de dados é possível desenvolver modelos lógicos e algébricos baseados nos conhecimentos geotécnicos, de forma a se realizar diagnósticos, isto é, zoneamentos geotécnicos.

Com base nos zoneamentos geotécnicos, são definidas as ações de monitoramento e de indução. As ações de monitoramento podem ser voltadas para se obter um melhor diagnós-



Figura 1. Fluxograma para realização da cartografia geotécnica em SIG.

tico ou para o controle de situações potencialmente danosas ou em processo de recuperação. As ações de indução incluem os aspectos educacionais, econômicos e legais. Muitos dos problemas identificados podem ser resolvidos com o estabelecimento de programas de educação informal ou até mesmo com a inclusão de temas na educação formal. A indução econômica com linhas de financiamento específicas para o melhor manejo dos recursos naturais também induz a práticas que preservem e ou recuperem as boas condições ambientais. O estabelecimento de marcos legais no uso do território e a sua fiscalização induzem ao bom uso dos recursos naturais. Todos os dados e informações geradas devem ser armazenados no banco de dados do SIG.

Um segundo nível de análise espacial deve ser realizado para se obter os prognósticos geotécnicos que incluem as análises de impacto, de risco e avaliação de cenários, bem como as definições de orientações para o planejamento da ocupação territorial e projetos de obras de prevenção e remediação, isto é, ações estruturantes ou de intervenção.

4 Cartografia Geotécnica Aplicada a Estudos de Borda de Reservatórios

O SIG deve ser estruturado segundo o modelo conceitual norteador da análise pretendida. O fluxo se inicia pela consolidação das demandas estabelecidas pela legislação traduzida em objetivos claros e pela definição de escalas apropriadas para atender a cada uma dessas demandas. Cada escala de trabalho deve ser definida segundo o produto almejado, que leve em conta o objetivo do mapeamento. No caso da geração de um instrumento norteador para o controle das bordas de reservatório, a escala deve se ajustar ao nível de detalhe compatível com o zoneamento de áreas de interesses específicos, assim como deve levar em consideração a legislação vigente.

Para a concretização do processo de elaboração e disponibilização dos produtos da cartografia geotécnica, é necessário no início da etapa de inventário criar um banco de dados geográficos para armazenar e disponibilizar os produtos gerados. Os dados iniciais para alimentar o banco e elaborar produtos da cartografia geotécnica são provenientes de produtos de sensoriamento remoto, da base cartográfica digital e de cartas complementares quando existentes em escalas apropriadas, cujos temas mínimos necessários encontram-se no fluxograma da Figura 2. O banco deve ficar hospedado em um servidor que tenha acesso diferenciado por tipo de usuário.

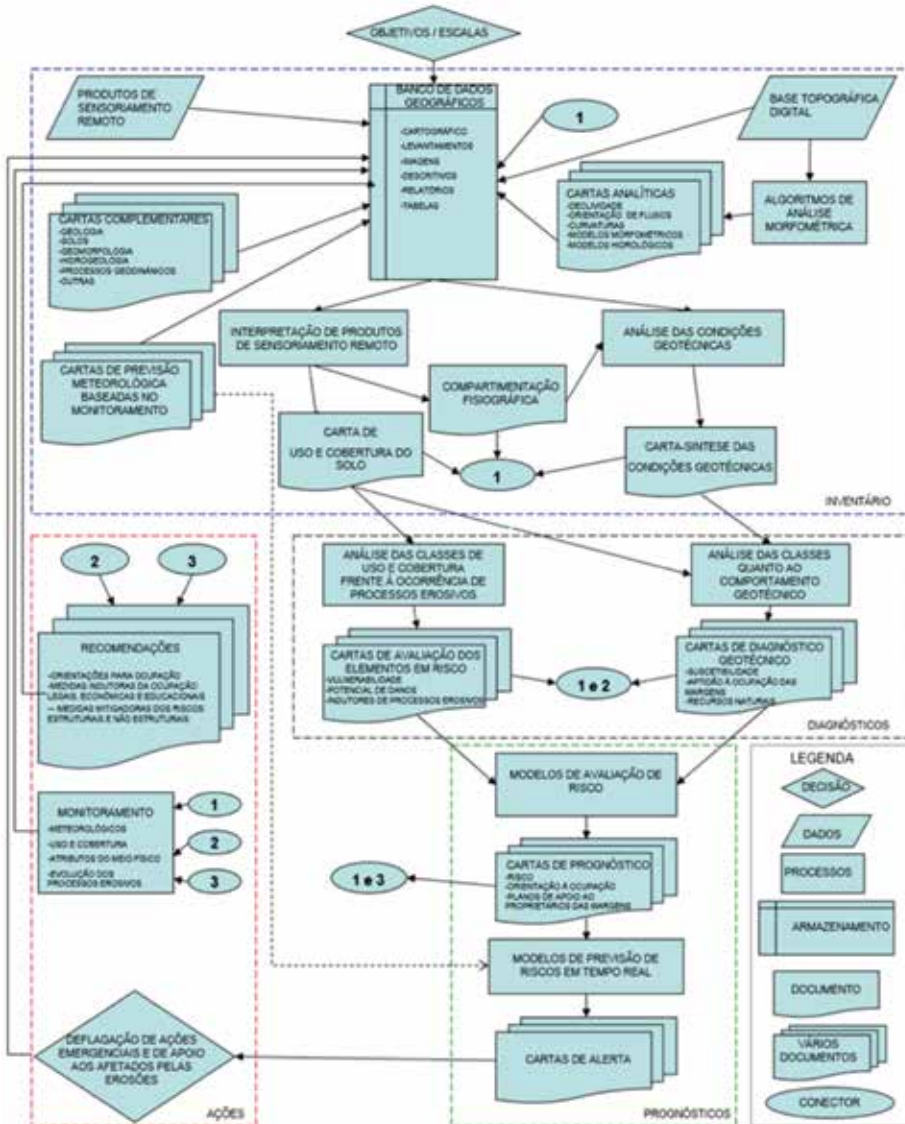


Figura 2. Fluxograma para cartografia geotécnica das bordas de reservatório.

A base planialtimétrica digital deve estar em escala compatível com os objetivos. O processamento dos dados nela contidos, por meio de algoritmos de análise morfométrica, deve gerar cartas analíticas da morfometria, que servirão de apoio na interpretação das condições geotécnicas. Nessa etapa são realizadas as cartas hipsométricas, de declividade, de curvaturas plana e de perfil, e modelos hidrológicos com orientação de fluxo, de fluxo acumulado.

Com base na interpretação dos produtos de sensoriamento remoto, tendo apoio das cartas analíticas, trabalho de campo e outras informações disponíveis no banco, deverá se realizar a compartimentação fisiográfica da área cartografada.

Analisando as condições geotécnicas de cada compartimento mapeado deverá ser gerada a carta-síntese das condições geotécnicas. Essa carta contém as unidades de terreno, bem como as características de cada unidade organizada na forma de tabela de atributos por objetos. Os atributos básicos a serem descritos são os referentes a solos e rochas, às condições hidrogeológicas, geomorfológicas e processos geodinâmicos.

Com base na interpretação dos produtos de sensoriamento remoto, tendo apoio das informações disponíveis no banco e levantamentos de campo, deverá ser realizado o levantamento do uso e cobertura, para produzir a carta de uso e cobertura do solo. Essa carta temática deverá ser acompanhada da descrição em forma de tabela de atributos de cada classe organizada por objetos.

Todos os documentos gerados na compartimentação fisiográfica, na carta-síntese das condições geotécnicas e na carta de uso e cobertura do solo deverão ficar armazenados no banco de dados geográficos.

Uma vez concluída a fase de inventário, que tem como produtos básicos os documentos da carta-síntese das condições geotécnicas e da carta de uso e cobertura do solo, inicia-se a fase de diagnóstico. Essa fase tem por objetivo o zoneamento geotécnico quanto à avaliação dos elementos em risco e quanto à suscetibilidade à ocorrência de eventos perigosos, do potencial de uso e da disponibilidade de recursos naturais para apoio às intervenções que se fizerem necessárias para a mitigação dos riscos nas áreas afetadas por esses processos.

Com base na análise das características do uso e cobertura e sua relação com a ocorrência de eventos perigosos, deverão ser realizadas cartas de avaliação dos elementos em risco. Essas cartas deverão avaliar aspectos da vulnerabilidade, dos potenciais danos e do uso e cobertura do solo como fatores de modificação das condições naturais e de indução à ocorrência de eventos perigosos. As cartas serão compostas por documentos cartográficos, descritivos, tabulares e outros que se fizerem necessários e que devem ser armazenados no banco. Com base nessa documentação deverão ser traçadas recomendações para o planejamento da ocupação e orientações para o monitoramento do uso e cobertura do solo.

A carta-síntese das condições geotécnicas deve ter suas características avaliadas em termos do comportamento geotécnico para a elaboração de cartas de diagnóstico geotécnico, incluindo uma compartimentação dos terrenos em termos da suscetibilidade de ocorrência de eventos perigosos, da aptidão à ocupação das bordas do reservatório e da disponibilidade de recursos naturais para obras de prevenção e recuperação de áreas afetadas. Na avaliação das condições geotécnicas, as informações do uso e cobertura do solo devem ser consideradas, uma vez que alteram as condições geotécnicas inicialmente encontradas sem a intervenção antrópica e por vezes induzem à ocorrência de eventos perigosos. Essas cartas serão compostas por documentos cartográficos, descritivos, tabulares, e outros que se fizerem necessários,

e devem ser armazenados no banco. Com base nessa documentação, deverão ser traçadas recomendações para o planejamento da ocupação, definição de medidas que proponham formas de ocupação adequada às características dos terrenos, bem como orientações para o monitoramento do uso e cobertura do solo, dos atributos do meio físico e da evolução de processos identificados.

A partir dessa documentação, deverão ser traçadas recomendações para o planejamento da ocupação, definição de medidas que induzam formas de ocupação adequada com as características dos terrenos, definição de projetos para mitigação das situações de risco e planos de contingência. Em situações de maior risco deve ser incluído o acompanhamento meteorológico e até a geração de cartas de alerta no momento de perigo eminente.

5 Considerações Finais

O uso da cartografia geotécnica para o planejamento, projeto e acompanhamento de empreendimentos de grande porte tem sido de fundamental importância para a organização e entendimento da relação das obras com o meio ambiente. A identificação dos fatores do meio físico de importância para esse entendimento é essencial para o bom resultado da cartografia geotécnica e sua real contribuição no gerenciamento que resulte na harmonização do empreendimento com o meio ambiente.

A construção de cartografia geotécnica em um Sistema de Informações Geográficas resulta na facilidade de acesso, contribuindo para o entendimento das análises realizadas, o que permite o efetivo uso no processo de decisão.

Referências

DEARMAN, W. R. *Engineering Geological Mapping*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991. 387 p.

IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT. *Engineering geological maps: a guide to their preparation*. Paris: Unesco Press, 1976. 79 p.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. *Cartografia geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 190 p.

Leituras Recomendadas

BITAR, O. Y. *Guia Cartas Geotécnicas: orientações básicas aos municípios*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2015. 28 p.

BRINK, A. B. A.; PARTRIDGE, T. C.; WILLIAMS, A. A. B. *Soil Survey for engineering*. Oxford: Clarendon Press, 1982. 378 p.

DICKINSON, G. C. *Maps and air photographs*. London: Edward Arnold, 1979. 348 p.

GERRARD, A. J. *Soils and landforms*. An integration of geomorphology and pedology. London: George Allen & Unwin, 1981. 219 p.

GRANT, T.K. *The PUCE Programme for terrain evaluation for engineering purposes*. I-Principles. Division of applied geomechanics technical paper n. 15. II-Procedure for terrain classification. Division of applied geomechanics technical paper n. 19 CSIRO. Australia, 1975. Parte I, 32p. Parte II, 68p e 1 mapa.

IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG commission on engineering geological mapping. *Bulletim IAEG*, n. 24. Aachen/ Essen, p. 235-274, 1981.

MARTINELLI, M. *Curso de Cartografia Temática*. São Paulo: Contexto, 1991.

MATULA, M. *Regional Engineering Geology of Czechoslovak Carpathians*. Bratislava: Publishing House of Slovak Academy of Sciences. Slovak Academy of Sciences, 1969.

RAISZ, E. *Cartografia geral*. Trad. N. M. Schneider e P. A. M. Neves. Rio de Janeiro: Científica, 1969. 414 p.

SANEJOUAND, R. *La cartographie géotechnique em France*. Paris: Ministère de l'équipement et du logement, 1972. 90 p.

VARNES, D. J. The logic of geological maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes. *Geological survey professional paper*, 837, U.S. Dep. of Interior, Geological survey, Washington, 48 p., 1974.

ZUQUETTE, L. V. *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras*. 1987. 3v. 673 p. Tese (Doutorado) – EESC/USP São Carlos, 1987.

CAPÍTULO 14

Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas

Wagner Santos de Almeida
Mariana dos Santos Diniz
Lenildo Santos da Silva
Eleudo Esteves de Araújo Silva Junior
Newton Moreira de Souza
Rideci de Jesus da Costa Farias
José Camapum de Carvalho

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Erosão. Geoprocessamento. VANT. Autômatos celulares (AC).

1 Introdução

Os estudos técnico-científicos sobre reservatórios no País revestem-se de importância significativa, principalmente no que tange aos fatores que possam vir a comprometer a sua vida útil. O Brasil tem como principal componente da matriz energética o represamento de águas fluviais para geração de energia elétrica e, além disso, também o utiliza para atividades de mineração, lazer e abastecimento de água potável.

A construção de reservatórios em canais fluviais provoca alterações em diversos aspectos locais, sejam de ordem física, socioeconômica e ambiental. Envolvendo o próprio reservatório, as principais alterações são as erosões de borda ou dentro da bacia de contribuição e o aporte de sedimentos a elas devido. Intervém como provocadores do assoreamento o próprio barramento, ao reduzir a velocidade do fluxo, devido ao aumento da secção transversal de escoamento. Esse fenômeno ocasiona a redução gradativa da capacidade de armazenamento do reservatório, o que reduz a sua vida útil e pode prejudicar a sua operacionalização, seu potencial de geração de energia elétrica e o atendimento a outros usos não consuntivos e consuntivos da água represada.

Para a previsão dos processos erosivos no entorno de reservatórios, tanto os laminares quanto os lineares e em anfiteatro, faz-se primordial o conhecimento das condicionantes que interferem em sua dinâmica fluvial. Desse modo, faz-se necessário analisar, entre outros, a geomorfologia, a topografia do terreno, a geologia, a hidrogeologia, o clima e os condicionantes climáticos, a cobertura vegetal e os tipos de solo da bacia hidrográfica que tem suas águas represadas. Além das condicionantes naturais, é preciso observar as atividades antrópicas, pois elas podem potencializar consideravelmente os processos erosivos que acarretam o assoreamento do reservatório, mediante a retirada ou simples alteração da cobertura vegetal, o uso inadequado do solo na agricultura mecanizada, o aumento de áreas de pastagem e a crescente urbanização, que, além de modificar os aspectos da paisagem, diminui a estabilidade do solo e ocasiona a produção de sedimentos impulsionados pela erosão laminar e outras formas de

erosão. O aporte desses sedimentos e de outros carregados pelos cursos d'água contribui para a redução da qualidade da água do reservatório e da disponibilidade hídrica. Esses sedimentos são, na maioria das vezes, um volume muito maior que aqueles produzidos em centenas de anos nas condições de equilíbrio natural da bacia hidrográfica.

Por seu turno, os impactos ambientais de natureza antrópica também acontecem com a ocupação das Áreas de Proteção Permanente (APP) no entorno do reservatório, principalmente com a abertura de estradas em direção a ele, pois estas servem de escoadouro de sedimentos nas estações chuvosas e não raro passam elas próprias por processos de erosão, conduzindo mais sedimentos. Têm-se ainda, como já observado, os sedimentos transportados pelas drenagens das bacias subsidiárias ao reservatório, que se depositam principalmente nas suas margens, diminuindo a área do espelho d'água e o seu volume como um todo. Somam-se a isso os resíduos sólidos e efluentes domésticos lançados no reservatório, que alteram a qualidade das águas e podem acarretar o surgimento de algas do tipo macrófitas, que modificam todo o ecossistema aquático e, em concentrações elevadas, restringem significativamente o fluxo hidráulico operado pelas turbinas de geração de energia elétrica.

A ação humana na construção e gerenciamento de uma barragem para geração de energia elétrica, por si só, é um permanente modificador dos elementos que conformam a hidrografia local. Algumas vezes, o próprio reservatório desempenha o papel de agente desestabilizador do equilíbrio natural, o que gera condições para a ocorrência de impactos ambientais, sociais e econômicos que ocorrem durante e após a construção do empreendimento. Entre esses impactos, estão a transferência de populações que ocupam as áreas inundadas e suas adjacências, a perda da biodiversidade, a destruição de ecossistemas e de sítios arqueológicos, entre outros que, em seu conjunto, podem também contribuir para uma intensificação de processos erosivos e de deposição de sedimentos, principalmente pela transformação do uso do solo nas bacias hidrográficas contribuintes do reservatório.

Além desses impactos citados, acresce-se o fato de as barragens de usinas hidrelétricas (UHE) situadas na Região Centro-Oeste, como no caso da UHE de Corumbá IV, no Município de Luziânia (GO), experimentarem, em suas bacias hidrográficas contribuintes, expansão significativa do cultivo mecanizado de certas culturas agrícolas. Essa prática, muitas vezes, ao envolver o uso intenso de defensivos e fertilizantes químicos e técnicas de manejo inapropriadas, contribui para a degradação e erosão do solo, carregando-o para as redes de drenagem que alimentam os reservatórios, assoreando a ambos.

A Usina Hidrelétrica (UHE) Corumbá IV, localizada no Estado de Goiás (GO), abrange, em toda extensão, os Municípios de Luziânia, Santo Antônio do Descoberto, Alexânia, Abadiânia e Silvânia. Em 21 de janeiro de 2005, teve início o enchimento do seu reservatório, processo que se estendeu até o início de operação da primeira unidade, cerca de 11 meses depois. Ele possui um volume máximo de água calculado de 3,7 bilhões de m³, potência nominal de 127 MW e 173 km² de área inundada, encontrando-se no bioma cerrado, com mais de 9000 hectares de Área de Preservação Permanente (APP).

A importância da UHE de Corumbá IV perpassa não apenas os Municípios do Estado de Goiás, mas também o Distrito Federal (DF), que já tem 15% de sua demanda energética atendida por essa usina. Além disso, é preciso enfatizar que esse é um reservatório de uso múltiplo, abarcando, além da geração de energia, atividades como lazer, turismo e, futuramente, abastecimento urbano de água.

O reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Corumbá IV apresenta, em suas sub-bacias tributárias, alterações significativas do uso e ocupação do solo, como acontece na microbacia hidrográfica do Ribeirão do Sarandi (ALMEIDA et al., 2012), caracterizada pela elevada expansão do cultivo mecanizado de culturas agrícolas, principalmente as de soja e de milho, por áreas extensas de atividades pastoris, e pela apropriação e desenvolvimento de áreas urbanas no entorno do reservatório.

Todas essas alterações potencializam os efeitos erosivos na região, bem como reduzem a qualidade da água dos cursos tributários, por meio do carreamento de fertilizantes e agrotóxicos. Portanto, torna-se justificável a realização de estudos científicos que subsidiem a prevenção de possíveis assoreamentos que causem danos ambientais, sociais, econômicos e redução do ciclo de vida do reservatório em questão.

Para realização desses estudos científicos, é imprescindível a utilização de geotecnologias, como as técnicas de geoprocessamento e de modelagem matemática inseridas em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Tais técnicas vêm ganhando importância significativa, pois apresentam um custo econômico relativamente baixo e possibilitam a visualização histórica do processo de uso e ocupação do solo, a análise da vulnerabilidade ambiental, a quantificação das perdas de solo e a determinação das áreas mais suscetíveis a processos erosivos. Além disso, servem de subsídio para a implantação de medidas mitigadoras e corretivas de processos erosivos no entorno de reservatórios, como o da UHE Corumbá IV. Outrossim, o desenvolvimento e aprimoramento de softwares pertencentes à categoria dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), como o Dinamica EGO, permite a geração de cenários prospectivos de uso e ocupação do solo e observação das tendências dos processos de erosão e assoreamento, auxiliando nas ações de planejamento e de manejo adequados do solo no entorno dos reservatórios.

Como exemplificação dessa proposta de análise, este capítulo apresenta, então, a pesquisa científica que tem por objetivo precípuo a análise da vulnerabilidade ambiental em uma das bacias contribuintes do reservatório da UHE Corumbá IV (GO), a do Ribeirão Sarandi. Em vista disso, será analisada a realização da modelagem da sua dinâmica ambiental, no que tange ao uso e cobertura do seu solo, para geração de um cenário prospectivo de sua área mais vulnerável. Ressalte-se que a metodologia empregada neste estudo de caso pode ser replicada para outras bacias hidrográficas contribuintes de reservatórios de UHE no País.

2 Vulnerabilidade ambiental

O termo vulnerabilidade ambiental possui definições diversas que variam de acordo com a área de aplicação e o contexto. O capítulo não possui o objetivo de debatê-las, mas se fundamenta na definição de Tagliani (2003), que a define como sendo a suscetibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer.

Assim sendo, a análise da vulnerabilidade ambiental tem se tornado uma ferramenta importante por concatenar diversos aspectos físicos do território, de modo a possibilitar a observação do ambiente de maneira holística e integrada. Permite, sobretudo, visualizar as interferências antrópicas sobre o meio, o que é fundamental, diante da intensificação de diversos impactos ao longo dos últimos anos, tais como: desmatamentos, aumento nos níveis de erosão, deterioração na qualidade das águas e uso inadequado do solo.

Como alicerce para a produção dos mapas de vulnerabilidade ambiental, está a proposta de Ross (1994), que uniu os elementos territoriais (pedologia, geologia, declividade, corpos d'água) e as ações antrópicas, mediante a utilização dos mapas de uso e cobertura do solo. Nesse sentido, com a integralização desses aspectos, é obtida a vulnerabilidade ambiental da região estudada. Mas, especificamente, no capítulo, é dada ênfase às condicionantes responsáveis pelos processos erosivos e de inundação presentes na respectiva bacia hidrográfica estudada, a do Ribeirão Sarandi.

A proposta de Ross (1994) fundamenta-se no princípio das Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1997), em que a ecodinâmica corresponde à avaliação integrada das unidades territoriais, em que é executado um balanço entre a pedogênese e a morfogênese, permitindo-se a classificação do meio quanto aos seus graus de instabilidade. Nesse conceito, existe a ideia de que as trocas de energia e matéria na natureza se processam por meio das relações de equilíbrio dinâmico. Acrescenta-se à proposta de Ross (1994) a importância da geomorfologia para os processos erosivos e, portanto, como fator de vulnerabilidade. A morfologia é importante não apenas pelas características de superfície, como também pelo fato de ela interferir diretamente na umidade de equilíbrio e, por consequência, na sucção e estabilidade dos maciços nos entornos de reservatórios.

Neste capítulo, a classificação do meio quanto aos seus graus de instabilidade é obtida pela integralização dos mapas de suscetibilidade à inundação, à erosão linear (método baseado em geoindicadores) e à erosão laminar (Equação Universal da Perda de Solo- EUPS), além dos mapas de uso e cobertura do solo, conforme apresentado na metodologia da pesquisa. Para a integralização dos mapas considerados, é preciso reclassificá-los quanto aos seus graus de vulnerabilidade ambiental. Desse modo, foram atribuídos pesos que variam de muito baixa ou nenhuma a muito intensa suscetibilidade (I a V). Assim, como principal ferramenta de integralização utilizada em sistemas de geoprocessamento, está a baseada em lógica *fuzzy*, fundamental na aplicação da análise multicritério, que permite a integração dos mapas considerados por meio de pesos diferenciados.

Um dos principais benefícios da utilização da lógica *fuzzy* na realização dos processamentos e operações cartográficas, segundo afirma Fang (1997), é o modo de codificação dos conhecimentos inexatos, utilizados por esse modelo, que se assemelham aos utilizados nos processos de decisões. Assim, os sistemas que utilizam essa lógica possibilitam uma maior percepção do território e do sistema como um todo, por se aproximarem do “modelo cognitivo” utilizado na análise de problemas. Nesse sentido, a aquisição de informações ocorre de maneira mais simples, confiável e com menor proporção de erros não identificados.

Para a integralização dos diferentes dados, diversos métodos têm sido utilizados. Nesse capítulo, será utilizado o método da Combinação Linear Ponderada, apresentado em Corseuil (2006), no qual os fatores são padronizados, baseando-se em uma escala numérica comum que, por sua vez, recebe pesos, que são combinados por uma média ponderada. O método de Combinação Linear Ponderada apresenta como principal propriedade a possibilidade de se efetuar uma compensação entre os fatores por meio da aplicação de pesos ponderados, os chamados pesos de fatores. Isso significa que, para uma qualidade ruim (valor muito baixo), é atribuído um determinado critério, que pode ser compensado por um conjunto de boas qualidades (valores mais altos) aplicadas a outros.

Para a aplicação tanto da lógica *fuzzy* como do método de Combinação Linear Ponderada, são utilizadas ferramentas que possibilitam a tomada de decisão e facilitam a forma de combinação dos mapas e os pesos a eles atribuídos, de modo a permitir a manipulação racional dos dados. Uma das ferramentas que buscam essa articulação é a Análise Hierárquica de Processos (*Analytic Hierarchy Process - AHP*). Esse método foi desenvolvido pelo matemático Thomas Saaty em 1980 e visa auxiliar na tomada de decisão, por meio da construção de hierarquias às alternativas de combinações de dados, fundamentadas em uma coerência lógica, classificada como um método multicritério e multiobjetivo.

Para a aplicação da AHP, é preciso que sejam inicialmente definidas as variáveis de entrada que serão consideradas na combinação final. Essa etapa é importante, pois é necessário que o problema seja analisado minuciosamente, para que os principais fatores que ocasionam os impactos estudados sejam considerados. Posteriormente, com as variáveis previamente definidas, é realizada uma combinação pareada; desse modo, é feito um julgamento de valor entre elas. Para isso, Saaty (1980) propôs a escala comparativa de valores utilizados apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Escala numérica proposta por Saaty (1980).

VALORES	IMPORTÂNCIA MÚTUA
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.

Essa etapa de definição das prioridades é a parte mais importante do processo. Para a sua realização, é necessário o conhecimento de cada um dos critérios e de sua importância na composição do mapa final. Por fim, deve-se verificar a consistência lógica das comparações realizadas, para o que o método propõe o cálculo da Razão de Consistência (RC), que possui um limiar superior de aceitação de 0,1 (10%). Desse modo, caso a RC seja superior a 10%, é necessário refazer as comparações pareadas, pois não estão apresentando coerência lógica entre si.

Nesse sentido, ao final do processo, será obtido um mapa de vulnerabilidade ambiental da região estudada, que indicará a área mais vulnerável, que será a utilizada para a realização da modelagem da dinâmica ambiental, por meio da construção de um cenário prospectivo do uso e cobertura do solo.

3 Modelagem ambiental

Segundo Novaes (1981), os modelos buscam representar simplificada-mente a realidade de um sistema ou de um dos seus componentes. Os fenômenos ambientais são por si só complexos, portanto, a utilização de modelos permite facilitar o entendimento do sistema/fenômeno estudado. A modelagem possui aplicações em diversas áreas, como os estudos hidrológicos e hidráulicos, a difusão de epidemias e contaminantes, os estudos climáticos, entre outras.

A modelagem da dinâmica espacial como proposto por Burrough (1998) procura transcender as limitações da maior parte dos SIG, pois a tecnologia de geoprocessamento foi concebida inicialmente para representação exclusiva dos fenômenos espaciais em mapas, isto é, de maneira estática e bidimensional. Entretanto, vários fenômenos espaciais precisam de uma abordagem dinâmica para sua compreensão e previsibilidade. Desse modo, muitos softwares vêm sendo criados na busca de integralizar a capacidade dos SIG existentes com implementações de técnicas e abordagens matemáticas, de modo a expressar adequadamente os fenômenos espaço-temporais.

A modelagem espacial dinâmica de uso e ocupação do solo é útil para a ação do planejamento territorial em bacias hidrográficas, pois torna-se possível a compreensão da tendência de expansão e retração de diferentes usos que permitem, assim, prever os impactos e as áreas críticas, como forma de subsidiar a implementação de ações preventivas.

Para isso, têm sido utilizadas algumas abordagens probabilísticas e matemáticas. Neste capítulo, será dada ênfase para a modelagem baseada em autômatos celulares (AC), que possuem um elevado potencial de representar e simular complexos sistemas dinâmicos de mudança de uso e cobertura do solo.

Os AC podem ser compreendidos como sistemas de grades de células (*arrays*), nos quais os processos de mudança são representados célula a célula, como um simples mapeamento do estado atual de uma célula e das suas vizinhas para o estado no instante de tempo seguinte. Essa mudança ocorre em tempos discretos, sendo que os estados que cada célula pode assumir dependem de um conjunto específico de regras de transição (ALMEIDA, 2003).

Os modelos de simulação espacial baseados em AC começaram a ser incluídos em *softwares* de SIG, em que se buscou utilizar sua facilidade de implementação e capacidade de ser moldado para reproduzir vários tipos de fenômenos espaciais. Nesse sentido, uma das plataformas de simulação ambiental que utiliza AC é o sistema Dinâmica EGO, desenvolvido pela Universidade de Minas Gerais (UFMG).

3.1 Dinâmica EGO

O Sistema Dinâmica EGO, acrônimo em ambiente para objetos de geoprocessamento, foi desenvolvido para investigação de trajetórias de paisagens e dinâmica dos fenômenos espaciais. Registre-se ainda que possui aplicações em estudos de desflorestamento e dinâmica urbana, além da utilização do *software* para replicações de padrões de difusão de contaminantes e modelagem de corredores de conservação ambiental.

Esse *software* pode ser classificado como um modelo estocástico e probabilístico baseado em AC, em que o espaço é representado por um mosaico de células de tamanhos e formas iguais (*pixels*) e o tempo também é visto de maneira discretizada (exemplo: ano, mês, dia). Assim, o modo no qual o estado de cada célula se apresenta na modelagem ambiental depende do seu estado prévio e é influenciado pelas regras de transição que determinam o porquê de o estado da célula se alterar em relação ao estado das células vizinhas.

O Dinamica EGO utiliza, para análise da dinâmica de uso e cobertura do solo, um conjunto de mapas de entrada em formato matriz de pixels (*raster*), que possui, como subdivisão no modelo, mapas ditos estáticos (suporte e necessários para a configuração de mudanças) e dinâmicos (calculados a cada interação do modelo). Para a realização da simulação, há a entrada de dados e seu respectivo processo de função de mudança e de saída. A parte mais complexa do modelo encontra-se na função de mudança, que pode ser decomposta, conforme Soares-Filho (2003), em duas funções, uma de quantificação de mudanças (matriz de transição) e uma outra dedicada à alocação espacial das mudanças (método dos pesos de evidência e AC). Importante salientar que essas mudanças não ocorrem ao acaso, mas estão atreladas à estrutura espacial do modelo matemático processado no Dinamica EGO.

A matriz de transição nada mais é que um cruzamento entre mapas de uso e cobertura do solo (inicial e final), no qual obtém-se o resultado da taxa de transição de um estado para o outro no tempo discretizado. Os pesos de evidência, por sua vez, referem-se ao cálculo de probabilidades de transição entre as classes temáticas dos mapas de uso e cobertura. Esse cálculo está fundamentado no teorema da probabilidade condicional de Bayes (Bonham-Carter, 1994), e, portanto, precisa ter seus dados de entrada como independentes entre si. Para verificar se as variáveis são independentes, o próprio *software* possui alguns métodos estatísticos implementados, como o coeficiente de *Crammer (V)* ou o teste *Join Information Uncertainly (U)* - Incerteza da Informação Conjunta.

O outro fator que opera juntamente aos pesos de evidência para a alocação espacial de mudanças são os AC. No Dinamica EGO, os AC (*Patcher e Expander*) possuem regras locais de transição, com base nas quais é preciso um ajuste dos parâmetros de tamanho médio, variância e isometria das manchas, o que se dá de maneira diferenciada para cada um dos AC - *Patcher* (função formadora de manchas) e *Expander* (expansão ou contração de manchas). Nesse sentido, o cenário simulado para o mapa de uso e cobertura do solo da microbacia do Ribeirão Sarandi será realizado mediante a utilização do Dinamica EGO, buscando-se obter respostas da tendência de ocupação antrópica da região e sua influência na intensificação dos processos erosivos, a fim de subsidiar a atuação do planejamento territorial da região.

4 Área de estudo

A área de estudo é a microbacia do Ribeirão Sarandi, localizada no município de Luziânia, no Estado de Goiás (GO), uma das bacias tributárias da UHE de Corumbá IV, representada na Figura 1. A bacia do Ribeirão Sarandi possui um perímetro total de 49,12 km, com área total de 61,02 km² e comprimento de seu canal principal de 15,97 km. Localiza-se entre as coordenadas geográficas de 16° 19' e 16° 28' de latitude sul e 48° 13' e 48° 19' de longitude oeste.

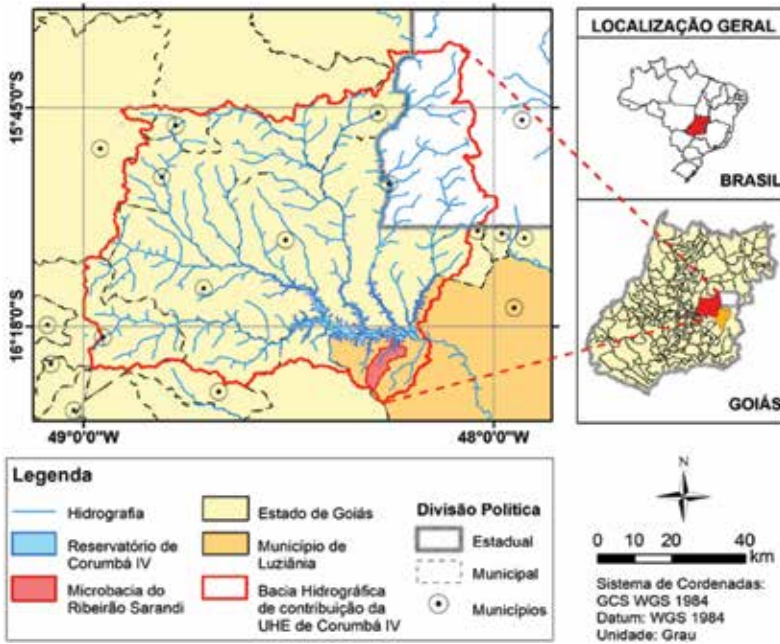


Figura 1. Localização da área de estudo.

A Figura 2 apresenta alguns tipos mais comuns de uso do solo encontrados na área de estudo.



Figura 2. Exemplos de uso de solo no entorno do reservatório da UHE Corumbá IV: a) pastagem na borda do reservatório; b) pastagem ocupando área agrícola após colheita; c) área agrícola com remanescente de mata de galeria; e, d) solo preparado para cultura de soja.

5 Materiais e métodos

5.1 Materiais

5.1.1 Softwares

No capítulo, foram utilizados os algoritmos de geoprocessamento inseridos nos Sistemas de Informações Geográficas ArcGIS 10.3.1 *trial* e SPRING 5.4.1, para a classificação temática das imagens multiespectrais de sensores remotos, para produção dos mapas de uso e cobertura do solo e geração de mapas de vulnerabilidade ambiental, com respectivos mapas de susceptibilidades e criação do banco de dados, que auxiliou na obtenção dos cenários prospectivos de uso e ocupação do solo. Tais cenários foram obtidos por meio da plataforma de simulação ambiental Dinamica EGO 2.4.1, desenvolvida pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais. Além disso, utilizou-se o *software* PhotoScan Modeler 3D/Agisoft para a confecção do Modelo Digital de Terreno (MDT), obtido com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), desenvolvido na área de Representação Gráfica e aplicado nas pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, denominado, neste capítulo, como VANT/UnB.

5.1.2 Produtos cartográficos

Os mapas utilizados para a realização do capítulo são os mapas pedológico (1:500.000) e geológico (1:250.000) expressos na Figura 3, obtidos no Banco de Dados do Governo do

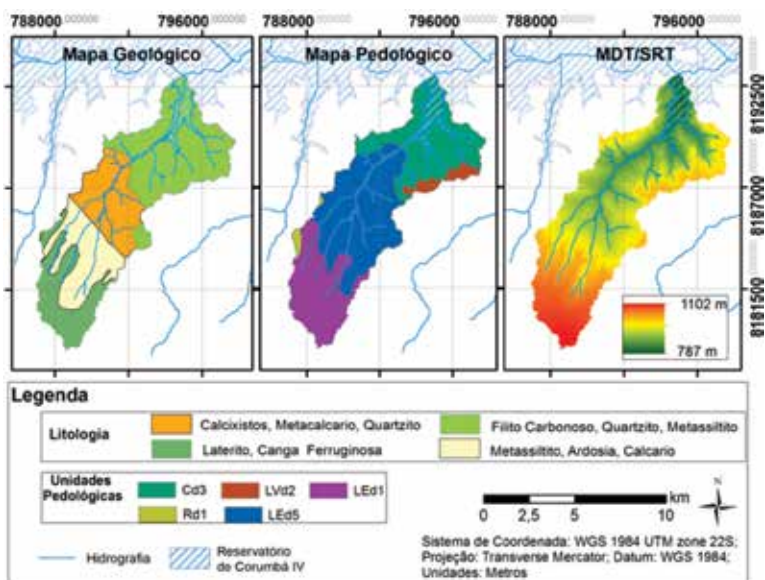


Figura 3. Mapas cartográficos utilizados na confecção do mapa de Vulnerabilidade Ambiental.

Estado de Goiás (SIEG) e da Empresa Embrapa Solos. Além disso, o modelo digital de terreno (MDT) utilizado possui resolução espacial de 30 metros, mediante utilização do radar altimétrico da missão orbital *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), obtido no site da instituição *United States Geological Survey* (USGS) e de uma base cartográfica de mapas digitais de drenagens e rodovias, produzidas a partir das ortofotos digitais do Veículo Aéreo não Tripulado, aparelho desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (VANT/UnB).

Para a modelagem ambiental, será utilizado como mapa intermediário, além dos obtidos com o VANT/UnB, um mapa de situação fundiária de ocupação da área de estudo, elaborado por meio de idas a campo, todos apresentados nas Figuras 3 e 4.

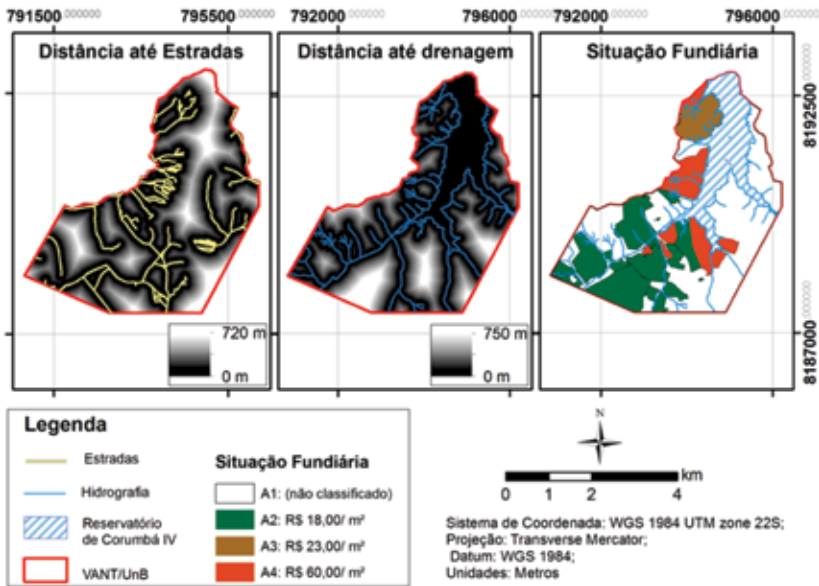


Figura 4. Mapas cartográficos utilizados para a modelagem da dinâmica de uso e cobertura do solo da região mais vulnerável da microbacia do Ribeirão Sarandi.

5.1.3 Dados de pluviometria

Para a obtenção da erosividade da chuva, foram utilizados dados de pluviosidade média mensal de 19 estações pluviométricas pertencentes à bacia de contribuição do reservatório de Corumbá IV e obtidos do sistema Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA), com dados de cerca de 30 anos de observação diária.

5.1.4 Imagens de sensores remotos

A Tabela 2 apresenta as imagens de sensores remotos e MDT utilizados, com as datas que foram obtidas, resoluções espaciais no modo multiespectral e fonte fornecedora.

Tabela 2. Imagens de sensores remotos e MDT utilizados.

Satélite/Tipo de Dado	Data (mês/ano)	Resolução Espacial (Metros)	Fonte
Quick-Bird/ Imagem	09/2007	2/ (0,7 – Pancromática)	Empresa Corumbá Concessões S.A
RapidEye/Imagem	09/2011; 06/2015	5	Ministério do Meio Ambiente/Brasil
Ikonos/Imagem	02/2010; 07/2015	1,3	Google Pro
Ortomosaico/Imagem	07/2016	2,0	VANT/UnB
MDT/SRTM	09/2014	30	METI/NASA
MDT/VANT	07/2016	2,0	VANT/UnB

5.2 Metodologia

A metodologia aplicada foi dividida em três fases, a saber:

- 1) Obtenção dos mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2007, 2011 e 2015, por algoritmos de processamento/classificação temática de imagens no SPRING e no ArcGIS;
- 2) Produção do mapa de vulnerabilidade ambiental, por meio de algoritmos de Análise Multicritério, nos quais foram integralizados os mapas de suscetibilidade a processos erosivos laminares (aplicação da EUPS) e lineares (baseada em geoindicadores), mapa de suscetibilidade devido à ação antrópica (reclassificação mapa de uso e cobertura) e o mapa de suscetibilidade à inundação;
- 3) Produção do mapa prospectivo de uso e cobertura do solo na plataforma de simulação ambiental, Dinamica EGO, desenvolvida pela UFMG. A modelagem da dinâmica ambiental do uso do solo foi realizada por meio da variação dos autômatos celulares (ACs) para criação e expansão de classes temáticas, utilizando-se, no processo, os mapas de uso do solo obtidos na primeira fase, mapas de distâncias de drenagem e de rodovias, mapa de declividade obtido a partir do MDT (VANT/UnB) e o mapa de tendência fundiária.

5.2.1 Mapas temáticos de uso e cobertura do solo

Os mapas de uso e cobertura do solo, para os anos de 2007, 2011 e 2015, foram gerados nos sistemas SPRING/INPE e ArcGIS/Erdas, utilizando-se as imagens *Quick-Bird*, *RapidEye* e *Ikonos*, por meio dos passos metodológicos citados em Almeida et al. (2012), conforme explicitado na Figura 5, descritos a seguir:

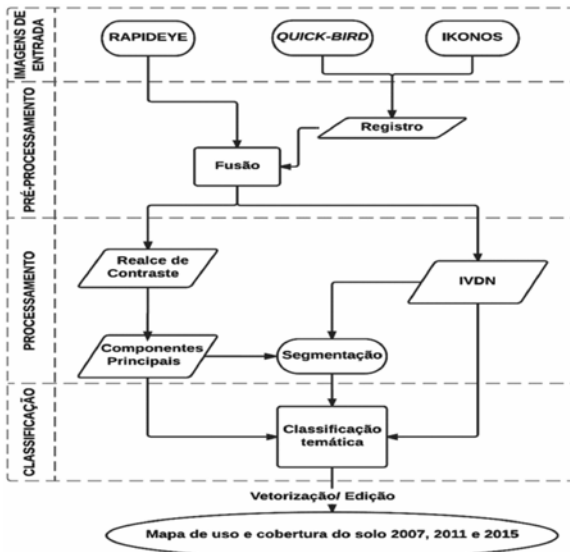


Figura 5. Passos metodológicos para a geração do mapa de uso e cobertura do solo.

Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2012).

- **Registro das imagens:** o registro é o processo de correção geométrica no qual as linhas e colunas de uma imagem são ajustadas com as coordenadas geográficas em latitude e longitude. Os pontos de controle para o processo de registro foram baseados em um plano de informação georreferenciado, contendo as imagens *RapidEye*. Desse modo, as imagens *Quick-Bird* e *Ikonos* foram, então, georeferenciadas para o Sistema GAUSS/UTM - Datum WGS 84;
- **Fusão de Imagens:** as bandas multiespectrais das imagens *RapidEye* de 2011 e 2015 foram submetidas ao processo de fusão de imagens, utilizando-se a transformação RGB-IHS, em que, no espaço IHS, substituíram-se as bandas Intensidade pelas imagens pancromáticas do *Ikonos/Google-Pro*, e novamente para o espaço RGB, para obtenção de imagens com resolução espacial de 1,3 metros;
- **Realce de contraste:** em cada uma das imagens resultantes do processo de fusão para os anos de estudo, foi realizada a ampliação histográfica do contraste da imagem, de modo a melhorar a qualidade visual, sob os critérios subjetivos do olho humano. O realce foi feito no algoritmo de expansão do histograma de natureza linear;
- **Imagem Índice de Vegetação Normalizada (IVDN):** obtido pela operação aritmética, expressa na Equação , das bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximos do *RapidEye*, obtendo-se imagens IDVN com melhor separação entre solo e vegetação;

$$IVDN = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

Onde, *IR* é a banda do infravermelho próximo e *R* é a banda vermelha, do espectro eletromagnético.

- Análise de componentes principais (bandas PC): as imagens foram submetidas ao algoritmo de análise de componentes principais, e as três primeiras bandas espectrais resultantes foram utilizadas por possuírem mais de 85% das informações espectrais das bandas originais;
- Segmentação da imagem: as imagens de componentes principais (bandas PC), juntamente à imagem obtida com IVDN, foram submetidas ao processo de segmentação, com a opção de crescimento de regiões, em que os parâmetros de área de pixel e similaridade utilizados foram obtidos a partir do processo interativo em que se buscam os polígonos que mais se adequam para as classes temáticas selecionadas para o estudo;
- Classificação das imagens: para a execução da classificação temática, como produtos de entrada, utilizaram-se as três bandas de componentes principais, a imagem do IVDN e a imagem segmentada. Em seguida, realizou-se a classificação pixel a pixel por meio do algoritmo MAXVER (supervisionado), cujos temas de uso e cobertura do solo foram agrupados nas seguintes classes temáticas: mata galeria/cerrado, corpos d'água, solos expostos, cultura agrícola, loteamentos e área de pastagens;
- Vetorização/edição das imagens: as imagens temáticas resultantes foram vetorizadas e cada classe temática foi associada ao seu respectivo polígono. Em seguida, foi realizada uma edição vetorial, tendo por alicerce as imagens do Google Earth, de modo a eliminar dados espúrios gerados no processo de classificação. Ao final do processo, têm-se os mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2007, 2011 e 2015 (nas escalas cartográficas de 1/20.000).

5.2.2 Mapa de vulnerabilidade ambiental

A obtenção do mapa de vulnerabilidade ambiental foi realizada por meio da análise multicritério com a lógica *fuzzy* e o método AHP (vide item 2), utilizando-se os mapas reclassificados de suscetibilidade a processos erosivos (lineares e laminares); de suscetibilidade à inundação e de suscetibilidade às ações antrópicas, conforme esquema apresentado na Figura 6. Serão especificados, a seguir, os procedimentos metodológicos para obtenção de cada um dos mapas de suscetibilidade.

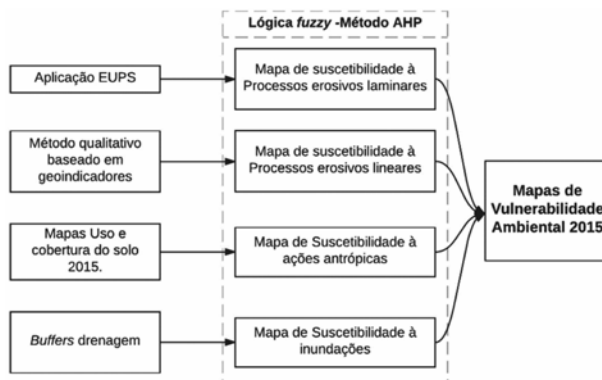


Figura 6. Procedimento metodológico para a confecção dos mapas de vulnerabilidade ambiental.

5.2.2.1 Mapa de suscetibilidade a processos erosivos laminares

Para a obtenção do mapa de erosão laminar, aplicou-se o modelo da Equação Universal da Perda de Solo (EUPS), apresentada por Wichmeier & Smith (1978), que é um modelo empírico largamente utilizado para quantificar as perdas de solo por erosão laminar. No caso da área de estudo, faz-se essencial o uso da EUPS, por ser uma ferramenta ideal para aplicação em áreas agrícolas e de pastagens, além de ser primordial para estudos de processos erosivos e de assoreamento em reservatórios. A EUPS tem, em sua versão original, a seguinte formulação:

$$A = R.K.LS.C.P \quad (2)$$

onde:

A- perda de solo [ton./(ha.ano)]; *R*: fator erosividade da chuva [(MJ.mm)/(ha.h)];

K- fator erodibilidade do solo [(ton.h)/(MJ.mm)];

LS- fator topográfico, integração do fator *L*, comprimento de rampa, e o fator *S*, declividade [adimensional];

C- fator uso e manejo do solo [adimensional]; e,

P- fator práticas conservacionistas [adimensional].

Assim, para a confecção do mapa final, utilizou-se a ferramenta de álgebra de mapas no *software* ArcGIS de cada um dos termos da Eq. (2).

Desse modo, para aferição do fator *R*, que expressa o potencial da água da chuva em desagregar e transportar o solo por meio do escoamento superficial, seguiu-se a metodologia sugerida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), para obtenção do fator de erosividade (EI_{30}), expresso na Eq. 3, que mais se adequa para regiões de realidade intertropical.

$$EI_{30} = 67,355 \cdot \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \quad (3)$$

onde: EI_{30} - média mensal do índice de erosividade [(MJ.mm)/(ha.h)]; *r* - média do total mensal de precipitação [mm]; e *P* - média do total anual de precipitação [mm].

O valor de *R* foi obtido como citado por Almeida et al. (2012), mediante a soma dos valores mensais para cada um dos índices de erosividade em cada estação pluviométrica. Depois disso, executou-se a interpolação por geoestatística, método de Krigagem, mediante a utilização do ArcGIS.

O fator de erodibilidade dos solos (*K*) representa a relação entre a perda de solo e a erosividade da chuva. Diversas avaliações experimentais têm sido utilizadas para a sua determinação, assim como métodos indiretos. Este capítulo se baseou na bibliografia correlata de Bertoni e Lombardi Neto (1990). Depois de classificar cada unidade pedológica da região (Figura 2), fez-se a reclassificação do mapa no ArcGIS, a fim de produzir o mapa de erodibilidade dos solos.

O fator topográfico (*LS*) possui forte influência no processo erosivo, pois as características de comprimento de rampa e declividade atuam diretamente na velocidade e volume de fluxo escoado. Para sua obtenção, utilizou-se a metodologia de Moore & Burch (1986), na qual *LS* pode ser obtido pela Eq. (4).

$$LS = \left(\frac{FAxCellSize}{22.13} \right)^{0,4} \left(\frac{\text{sen}(Slope)}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (4)$$

onde: *FA* é o acúmulo de fluxo ou área de contribuição; *CellSize* é o tamanho da célula do modelo digital de elevação, correspondente a dois metros de resolução espacial da imagem de acúmulo de fluxo; e *Slope* é a declividade em radianos, calculada para cada pixel.

O fator de uso e manejo do solo (*C*) e de práticas conservacionistas (*P*) foi atribuído para as classes de uso e cobertura do solo. Para a sua determinação, baseou-se nos dados de campo e nos atribuídos por Almeida et al. (2012), obtendo-se, assim, a Tabela 3.

Tabela 3. Fatores C e P da área de estudo (adaptado de ALMEIDA et al. 2012).

Classes Temáticas	Fator C	Fator P
Corpo d'água	0,00	0,00
Culturas agrícolas	0,14	0,12
Mata Galeria/ Cerrado	0,02	0,025
Pastagem	0,065	0,07
Solos expostos	0,20	0,20
Áreas urbanizadas (loteamentos)	0,00	0,00

Por fim, a produção do mapa de suscetibilidade à erosão laminar foi executada no *software* ArcGIS, mediante a utilização da função *raster calculator*, na qual implementou-se todos esses fatores da EUPS expressos na Eq. .

Com o objetivo de se verificarem as propriedades geotécnicas dos solos indicados como suscetíveis à erosão, foram coletadas amostras de solo durante os trabalhos de campo realizados na área de estudo, na bacia hidrográfica do Ribeirão Sarandi, no entorno do reservatório da usina hidrelétrica (UHE) Corumbá IV. A seleção dos locais de coleta de amostras de solo foi feita por amostragem, a partir das áreas de maior vulnerabilidade ambiental, que permitissem o acesso físico e que fossem representativas dos locais indicados.

As amostras de solo para realização dos ensaios de laboratório foram coletadas em trincheiras abertas no terreno, com profundidades que variaram de 40 cm até um metro, em alguns casos, por meio de trado. A Tabela 4 apresenta as coordenadas geográficas dos 10 locais selecionados para coleta de amostras de solo que foram submetidas aos ensaios geotécnicos.

Tabela 4. Pontos de coletas de amostras de solo na área de estudo.

Pontos de coleta de amostras de solo	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)
Ponto 1: Enseada Canal do Sarandi	16° 19' 22".3	48° 14' 57".8
Ponto 2: Ribeirão do Sarandi	16° 21' 28".5	48° 15' 09".8
Ponto 3: Canal do Sarandi	16° 20' 43".7	48° 14' 37".1
Ponto 4: Margem do Sarandi I	16° 20' 13".0	48° 13' 36".1
Ponto 5: Margem do Sarandi II	16° 21' 19".2	48° 14' 45".6
Ponto 6: Ilha do Canal do Sarandi I	16° 20' 20".8	48° 14' 19".6
Ponto 7: Ilha do Canal do Sarandi II	16° 20' 38".1	48° 14' 20".1
Ponto 8: Estrada do Sarandi	16° 21' 55".8	48° 14' 49".8
Ponto 9: Encruzilhada de Estradas	16° 22' 51".9	48° 14' 21".5
Ponto 10: Quina da Fazenda de Soja	16° 23' 20".3	48° 15' 21".4

Com base nas normas da ABNT e em outras, na ausência dessas, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais nas amostras de solo: a) verificação da expansão, penetração, resistência e plasticidade (ABNT NBR 7180:1984); b) determinação da massa específica aparente e real e determinação de índices de vazios (ABNT NBR 7182:1986); c) determinação de umidade natural e higroscópica (ABNT NBR 7185:1986); d) determinação dos limites de Atterberg: limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade (ABNT NBR 6459:1984 e ABNT NBR 7180:1984); e) determinação do peso específico dos grãos menores que 2 mm (ABNT NBR 7181:1984); f) análise granulométrica por peneiramento (ABNT NBR 7181:1984); g) análise granulométrica por sedimentação: com e sem o uso de defloculante (ABNT NBR 7181:1984); h) análise granulométrica a laser: com e sem o uso de ultrassom; i) análise química para determinação do pH em água destilada e em KCl e determinação do ΔpH ; e j) análise mineralógica por difratometria de raios-X, para identificação mineralógica dos solos, sendo geralmente detectada a presença de quartzo, gibbsita, illita, muscovita e caulinita.

Os ensaios laboratoriais permitiram a classificação unificada dos solos, de acordo com a Norma ASTM 2487D-85, pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), importante na determinação da sua erodibilidade, com base nas características de tamanho de partícula, de limite de liquidez e do índice de plasticidade. A classificação TRB (*Transportation Research Board*) foi também realizada, pois é aplicada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários, em que os solos são divididos em dois grandes grupos: os materiais granulares e os materiais silto-argilosos. A classificação de solos tropicais MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) identifica o comportamento laterítico ou não do solo. Usaram-se, neste estudo, os ensaios mini-MCV expeditos, complementados por ensaios de perda de massa por imersão do solo em estado natural. As metodologias, os conceitos teóricos e as aplicações dessas classificações de solos constam de uma gama considerável de referências bibliográficas como as que se encontram em Silva et al. (2010).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), exceto a análise mineralógica por difratometria de raios X, que foi realizada no Laboratório do Instituto de Geociências da UnB. Em campo, além das observações qualitativas, foi realizado o ensaio com o penetrômetro dinâmico Panda, que permitiu avaliar o processo de densificação do solo a partir da superfície, assim como a alteração de comportamento mecânico dos perfis de solos naturais.

5.2.2.2 Mapa de suscetibilidade a processos erosivos lineares

Para a produção do mapa de suscetibilidade às erosões lineares, utilizou-se a metodologia proposta por Campagnoli (2002), cujos passos metodológicos estão apresentados na Figura 7. Na etapa 1, foram classificadas as unidades pedológicas, baseando-se, sobretudo, em sua espessura e textura, isto é, os solos rasos serão classificados com um potencial baixo para erosão linear, pois indica que o substrato rochoso está próximo da superfície e, conseqüentemente, evita o desenvolvimento do processo erosivo. Já as unidades geológicas foram classificadas de acordo com a litologia e estrutura das rochas, em que, quanto maior for a permeabilidade e o volume dos espaços vazios no litolito, maior será o potencial erosivo, pois maior será a chance de desagregação e de condução de compostos solubilizados.

Depois do cruzamento matricial desses dois fatores, obteve-se o mapa geopedológico, que foi processado por cruzamento matricial (método de Tabulação Cruzada) com os dados de declividade, para a obtenção do mapa final de suscetibilidade à erosão linear, em que foram definidas as cinco classes de suscetibilidade à erosão linear, conforme apresentado na Tabela 5, a saber: I - pouco ou nenhum potencial; II- baixo potencial; III- médio potencial; IV- alto potencial e V - muito alto potencial.

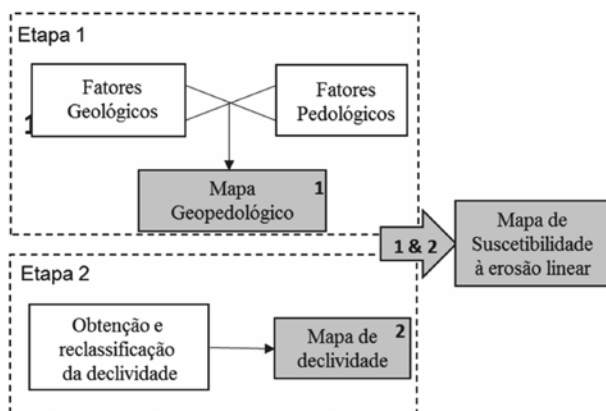


Figura 7. Metodologia para a geração do mapa de suscetibilidade à erosão linear.

Fonte: Adaptado de Campagnoli (2002).

Tabela 5. Critério adotado para os atributos do cruzamento matricial realizado para a obtenção do mapa de suscetibilidade à erosão linear.

(Modificado de CAMPAGNOLI, 2002).

Mapa geopedológico	Declividade (%)				
	(I) 0-6	(II) 6-12	(III) 12-20	(IV) 20-30	(V) >30
I	I	I	I	II	II
II	I	I	II	III	III
III	I	II	II	III	V
IV	II	II	III	IV	V
V	II	III	IV	V	V

5.2.2.3 Mapa de suscetibilidade à inundação

A análise da vulnerabilidade, devido à suscetibilidade à inundação, mostra-se relevante, pois, com a intensificação dos processos de impermeabilização e erosão crescente do solo, há alterações no fluxo dos rios e dos reservatórios, em razão de assoreamentos, tornando a área mais suscetível a processos de inundação.

Pelo fato de a área de estudo possuir predomínio de áreas rurais, foram obtidas as áreas de inundação, por meio do mapa de região de influência (*buffers*), produzido a partir do mapa da rede de drenagem, com critérios de fatiamento conforme estabelecido na Lei 12.651/2012 (Novo Código Florestal), referentes às Áreas de Preservação Permanente, com as cinco faixas

de distância até corpos d'água, cuja suscetibilidade é maior quanto mais próximas estiverem da margem do curso fluvial, a saber: I) de 0 a 30 metros; II) de 31 a 50 metros; III) de 51 a 100 metros; IV) de 101 a 200 metros; e, V) acima de 200 metros.

A rede de drenagem foi obtida por meio do Modelo Digital de Elevação Hidrológica consistente (MDEHC), pois tal metodologia elimina quaisquer depressões espúrias existentes no MDT e permite assim a correta simulação dos processos hidrológicos da região. Nesse sentido, para a obtenção do MDEHC, utilizaram-se os comandos contidos na ferramenta *Spatial Analyst*, no subitem *Hydrology* do ArcGIS, assim como para a geração da rede de drenagem.

5.2.2.4 Mapa de suscetibilidade às ações antrópicas

O mapa de suscetibilidade às ações antrópicas é obtido por meio da reclassificação do mapa de uso e cobertura do solo do ano de 2015, mediante a utilização do *software* ArcGIS em sua função *reclassify*, por meio da atribuição de números inteiros às suas classes, de modo a permitir as operações de álgebras de mapas, por meio da função *raster calculator* do ArcGIS. Os valores adotados para as classes são os propostos por Mass e Ross (2012), nos quais as classes temáticas de uso e cobertura do solo recebem notas que variam de I a V, em ordem crescente de suscetibilidade às ações antrópicas, em que o grau I é atribuído para áreas mais preservadas e o grau V para regiões mais antropizadas.

Desse modo, para o mapa final de vulnerabilidade ambiental de 2015, executou-se a integralização dos quatro mapas de suscetibilidade. Todos foram colocados na mesma escala de fragilidade atributos (graus de I a V), por meio da lógica *fuzzy* e do método AHP. A área com maior vulnerabilidade ambiental foi utilizada para a verificação da sua dinâmica ambiental, mediante a implementação do modelo por AC no *software* Dinamica EGO.

5.2.3 Cenário prospectivo de uso e abertura do solo

Objetivando a obtenção de uma melhor resolução dos dados de declividade para que possam ser utilizados na simulação, foi realizado um voo com o VANT/UnB, no qual foram obtidas 2200 imagens da área com maior vulnerabilidade ambiental, em pares estereoscópicos com 60% de área de recobrimento em comum. A Figura 8 apresenta os passos metodológicos utilizados na geração do MDT/VANT e que estão detalhados em Almeida et al. (2014). Para isso, utiliza-se o *software* PhotoScan Modeler 3D da Agisoft, a partir dos pares estereoscópicos, excluindo-se as imagens obtidas durante o voo que apresentam distorções oriundas da ação do vento e as obtidas quando o VANT inicia a linha de voo programada. É produzido, então, com os algoritmos do *software* Photoscan, um ortomosaico georreferenciado para, em seguida, ser obtida a nuvem de pontos (*Dense Cloud Points*) e a sua classificação automática para obtenção das coordenadas geográficas de pontos de controle no terreno, com o uso da ferramenta *Classify Ground Points*. Após a edição manual dessa classificação, é gerado o MDT, a partir da ferramenta “*Build Mesh*”, com interpolação por extrapolação para os pontos que não possuem dados de altimetria do nível do solo.

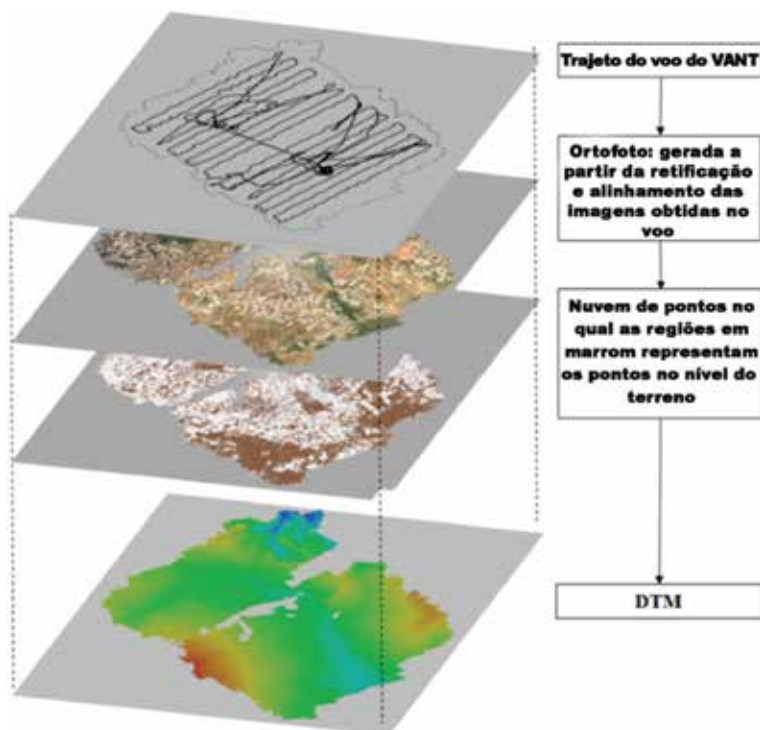


Figura 8. Passos metodológicos realizados na confecção do MDT a partir das ortofotos do VANT/UnB.

Após o processamento dos dados do VANT/UnB e de seus respectivos produtos utilizados na modelagem da dinâmica ambiental do uso do solo da área com maior vulnerabilidade ambiental, segue-se a fase de obtenção do cenário prospectivo do mapa de uso e cobertura do solo, conforme os passos metodológicos adaptados de Soares-Filho et al. (2003). Esse modelo metodológico, com a colocação do processo de revalidação, pode se dividir em cinco fases principais, conforme apresentado na Figura 9, a saber: entrada de dados; parametrização; calibração; validação e revalidação e simulação do modelo.

Na etapa inicial, foi feita a preparação dos dados de entrada, na qual foram necessários os mapas de uso e cobertura do solo (2007, 2011 e 2015), sendo que o do ano de 2015 entrou apenas na fase de revalidação e os mapas ditos intermediários, que auxiliam na função de mudança, com a determinação dos pesos de evidência e dos AC. Assim, foram utilizados os mapas de declividade, distância para a malha viária e distância até a rede de drenagem, obtidos na escala cartográfica de 1/10.000, a partir do ortomosaico produzido com o VANT/UnB, e o mapa de tendência fundiária, obtido a partir de fotointerpretação e trabalho de campo (Figura 4).

A produção do Mapa da Situação Fundiária foi realizada por meio de pesquisa de mercado em sites especializados, em anúncios imobiliários, cadernos de classificados locais e regionais e apoio de corretores de imóveis da área de estudo, seguida de visitas a campo para validação dos dados levantados e suporte à fotointerpretação das imagens anteriormente citadas.

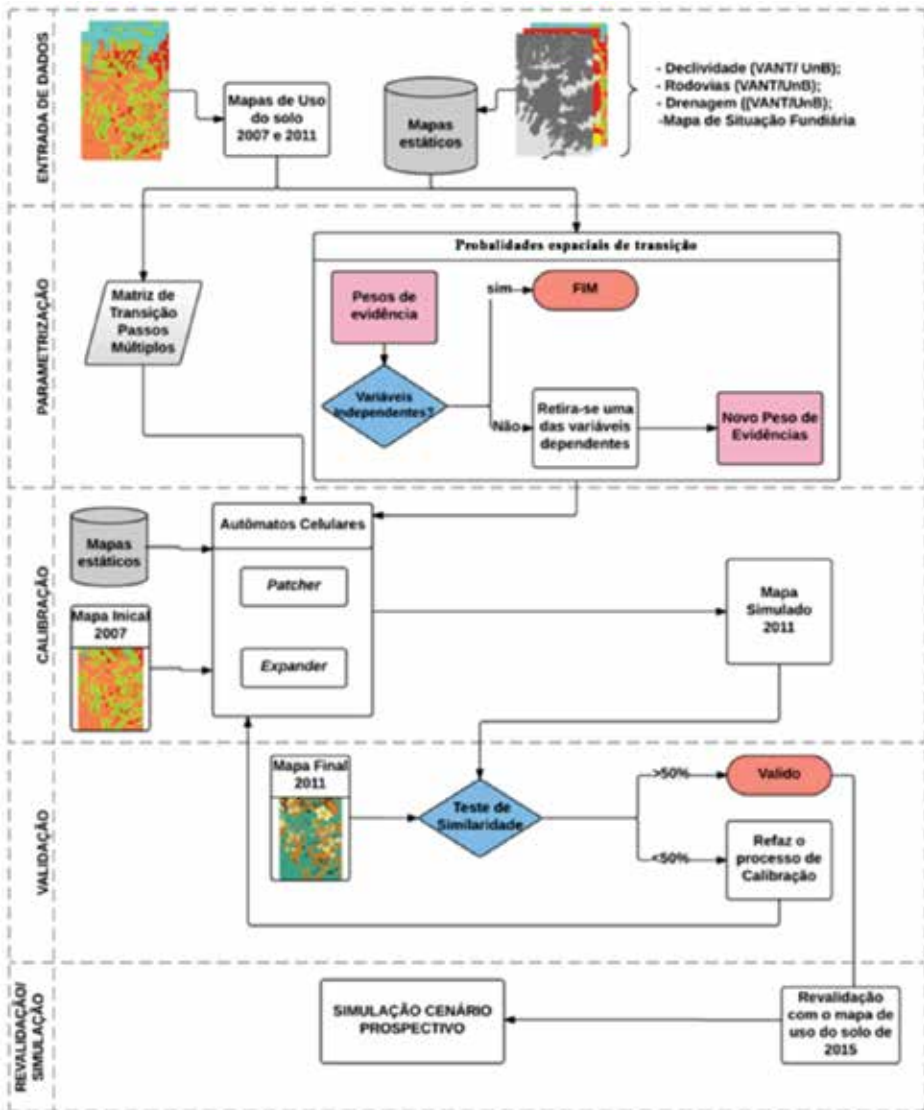


Figura 9. Passos metodológicos para a geração do mapa prospectivo de uso e cobertura do solo no *software* Dinamica EGO. Fonte: Adaptado de Soares-Filho et al. (2003).

O resultado da pesquisa de mercado juntamente com as idas a campo demonstrou que a área de estudo apresenta chácaras consolidadas, lotes com edificações construídas e infraestrutura básica, áreas de cultivo e pastagens, áreas em fase inicial de loteamento e áreas com vegetação nativa preservada, tais como cerrado e mata galeria.

Quanto aos valores de referência coletados na pesquisa, considera-se a média dos preços aplicados pelo mercado formal e informal na região e áreas vizinhas, de forma a classificar a área de estudo em quatro classes, a saber: A₁) Terra “nua” e áreas preservadas (não se atribui valor econômico); A₂) Terra com alguma finalidade rural- pasto e plantio; A₃) lotes de condo-

mínios ainda sem benefícios, áreas em fase de loteamento; e A₄) casas construídas mais lote beneficiado (vide Figura 4).

Observa-se, no entanto, que a dificuldade de acesso às propriedades particulares prejudicou a verificação do uso e cobertura do solo *in loco* e da tipologia das edificações e consequente detalhamento dos valores a serem considerados para a produção do mapa. Por outro lado, a resolução espacial elevada das imagens coletadas com o voo do VANT/UnB auxiliou na sua fotointerpretação.

A produção dos mapas de distância até a drenagem e até as estradas foi realizada no ArcGIS, com a ferramenta *Buffer Wizard*. O mapa de declividade foi obtido por meio do comando *Slope*. Todos os mapas foram, então, colocados no formato *Raster*, na mesma resolução espacial de dois metros e radiométrica de 32 bits *signed interger*.

Todos esses mapas foram integralizados em um só arquivo, chamado de “*cube raster*”, por meio do *functor- Create Cube Map* no Dinamica-EGO.

Na fase de parametrização, realizaram-se os procedimentos de geração de matrizes de transição (passo único e passos múltiplos) e cálculo dos pesos de evidências. As matrizes correspondem às mudanças percentuais das classes de uso do solo, entre os mapas dos anos de 2007 e 2011. Os pesos de evidência atuam para a alocação das mudanças espaciais e precisam ter variáveis independentes para o seu correto cálculo, conforme explicitado no subitem 3.1.

Para calibrar o modelo, executou-se uma simulação de quatro anos, correspondendo ao período compreendido entre 2007 e 2011, no qual, como entrada, foram utilizados o mapa inicial de uso e cobertura do solo (2007), os mapas estáticos (*cube raster*), a matriz de passos múltiplos (isto é, matriz que representa as mudanças percentuais das classes temáticas em um período de um ano) e os pesos de evidência. As alocações de mudança se dão no sistema Dinamica EGO, por meio de dois AC, *Patcher* e *Expander*. O primeiro é dedicado à criação de novas manchas mediante um processo de semeadura. Já o *Expander* é responsável pela expansão e contração das manchas já existentes de certa classe temática. Desse modo, em cada um dos AC, é executada a variação, de maneira interativa, desses três parâmetros, que são responsáveis pela escolha mínima da forma e do tamanho das manchas. No sistema Dinamica EGO, são denominadas de *Mean Patch Size* e *Patch Size Variance* a média e a variância do tamanho das manchas a serem formadas. Além disso, tem-se o parâmetro de isometria (*Patch Isometry*), que varia de 0 a 2, frisando-se que, quanto maior for o valor, mais a mancha assume uma forma isométrica.

Para o processo de validação, é feita uma comparação entre a similaridade do mapa simulado na etapa anterior (mapa de uso e cobertura do solo de 2011) com o mapa existente. Desse modo, quanto maior o grau de ajuste do modelo, maior será a similaridade entre os mapas. Para essa comparação, o *software* Dinamica EGO propõe métodos de comparação. O método utilizado é o de decaimento constante, que se baseia em lógica *fuzzy*, no qual um pixel de mudança não alocado exatamente no mesmo local do pixel de mudança observado é considerado correto ao se encontrar nos limites da vizinhança (SOARES-FILHO et al., 2009). O limiar de aceite para a validação é o limite inferior de 50% e, de maneira análoga, foi realizada a segunda etapa da validação, simulando para o ano de 2015 e verificando as similaridades entre o mapa simulado e o mapa de uso do solo, obtido a partir do processamento digital da imagem *RapidEye* do ano de 2015, revalidou-se a simulação por meio do limite de corte de 50%. Desse modo, realizou-se a simulação do cenário prospectivo de uso e ocupação do solo para o ano de 2019.

6 Apresentação e análise dos resultados obtidos

6.1 Mapas temáticos de uso e cobertura do solo

As classificações temáticas das imagens *Quick-Bird* (2007) e *RapidEye* referentes aos anos de 2011 e 2015, permitiram produzir os mapas de uso e cobertura do solo, conforme ilustrados na Figura 10. Eles sintetizam a dinâmica ambiental do uso do solo nesses anos para a microbacia do Ribeirão Sarandi, constituindo-se em base para a compreensão do mapa de vulnerabilidade ambiental de 2015, assim como para o cenário prospectivo obtido com a modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo para o ano de 2019. Por sua vez, a Tabela 6 apresenta os valores em quilômetros quadrados (km²) para as áreas das classes temáticas consideradas.

Cabe destacar que as datas de obtenção das imagens utilizadas são distintas, mesmo sendo de período da estação de seca na região, podendo ter alguma interferência nos resultados. Por exemplo, no ano de 2015, a imagem data de junho (início da estação de seca), enquanto as imagens de 2007 e 2011 foram adquiridas no mês de setembro (final da estação seca). A diferença dos valores de radiância da vegetação, captada pelos sensores remotos, devido às imagens terem sido obtidas em estações climáticas distintas, pode acarretar que, no processo de classificação temática, as classes de cerrado e mata galeria apresentem valores de áreas superiores no ano de 2015, como os apresentados na Tabela 6, o que não configura uma possível regeneração desse tipo de vegetação. Na realidade, o que se observou durante os trabalhos de campo foi que as áreas de pastagem e de agricultura mecanizada avançam sobre as áreas de vegetação nativa.

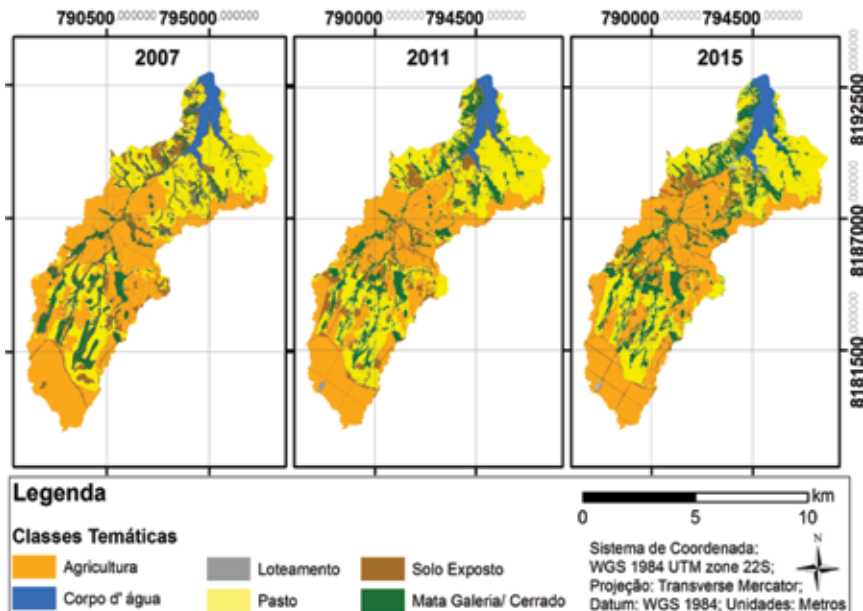


Figura 10. Mapas de uso e cobertura do solo para a microbacia do Ribeirão Sarandi nos anos 2007, 2011 e 2015.

Tabela 6. Valores de área em km² para cada uma das classes temáticas consideradas.

Classes Temáticas	Área em Km ²		
	2007	2011	2015
Agricultura	24,2	24,3	25,1
Corpo d'água	2,4	2,3	2,8
Loteamento	0,1	0,3	0,3
Pasto	19,9	19,5	17,4
Solo exposto	5,6	6,3	4,9
Mata Galeria/ Cerrado	8,8	8,4	10,5
Área Total	61,0	61,0	61,0

6.2 Mapa de vulnerabilidade ambiental (VA)

O mapa de vulnerabilidade ambiental do ano de 2015 foi obtido mediante a integração dos mapas de suscetibilidades à erosão linear, à erosão laminar, à inundação e às a oes antrópicas, por meio do método AHP, pelo qual se obtém o peso de cada mapa para a composi o da vulnerabilidade ambiental, em compara es pareadas. Para isso, utilizou-se a ferramenta “suporte a decisão (AHP)” do software Spring.

Para a confec o do mapa de vulnerabilidade ambiental, foram obtidos cada um dos mapas de suscetibilidade apresentados a seguir, iniciando-se com o mapa de EUPS para previsão de processos erosivos laminares.

6.2.1 Mapa de Suscetibilidade   erosão laminar

Assim como foi detalhado na metodologia, para a obten o do mapa de suscetibilidade   erosão laminar,   preciso gerar todos os fatores expressos na Eq. (2), os quais são apresentados na Figura 11.

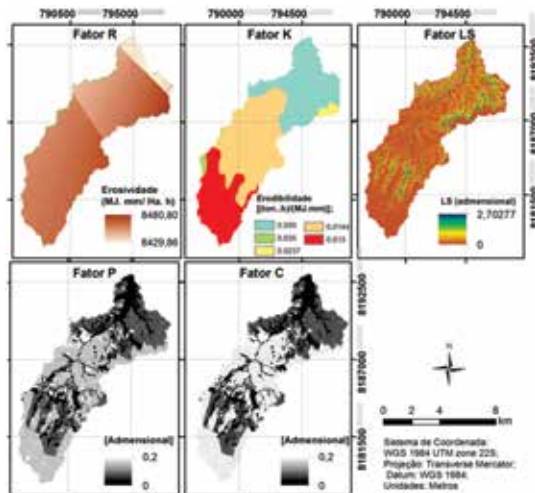


Figura 11. Fatores da EUPS obtidos para a área de estudo.

Ao se obter os fatores da EUPS, utilizando-se o algoritmo de álgebra de mapas e aplicando-se a Eq. (4), por meio da ferramenta *Map Algebra* no comando *Raster Calculator* do ArcGIS, foi obtido o mapa de suscetibilidade à erosão laminar, apresentado na Figura 12, que apresenta a perda de solo pela EUPS, usando-se a classificação em 5 graus de vulnerabilidade.

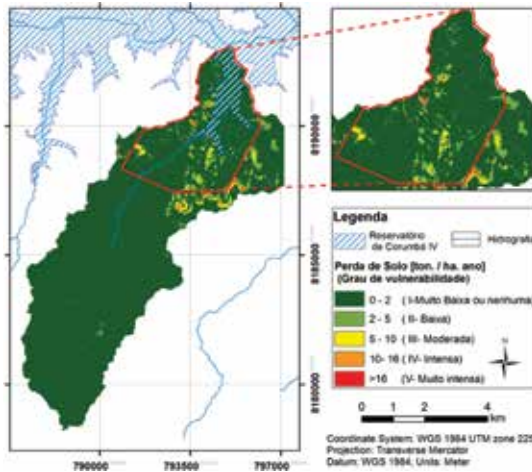


Figura 12. Mapa de suscetibilidade à erosão laminar da área de estudo.

Para confirmar os resultados de erodibilidade das áreas referentes à perda de solo apontadas no mapa da Figura 12, foram realizados ensaios geotécnicos nas amostras de solo coletadas na área de estudo (Tabela 4), com o propósito de averiguar as propriedades geotécnicas dos solos em estudo, que estariam relacionadas à capacidade de infiltração e à vulnerabilidade à erosão laminar. Estão listadas, respectivamente, nas Tabelas 7 e 8, as propriedades físicas, químico-mineralógicas e a classificação dos solos analisados.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de laboratório – Propriedades Físicas.

Ponto	G_1	S_1	M_1	C_1	G_s	W_p	W_L	I_p	E	C_L	P	R_E	ρ_d	ρ	e	W_o	W_h
1	20	34	18	28	2,84	32	43	11	N	1,4	1	MA	-	-	-	16	4,2
2	11	61	16	12	2,93	21	26	5	S	0,6	2,1	A	-	-	-	16	0,7
3	34	36	19	11	2,70	30	37	7	N	1,0	0,2	MA	1,7	2	0,7	20	1,5
4	42	28	11	19	2,76	30	36	6	N	1,5	0,1	MA	1,7	2	0,7	19	1,4
5	35	37	12	16	2,71	29	39	10	N	1,2	1	A	1,7	2	0,6	20	1,1
6	47	28	10	15	2,74	28	41	13	N	1,1	0,4	A	-	-	-	16	1,0
7	39	26	14	21	2,56	29	39	10	N	1,1	0,2	A	1,8	2	0,4	13	1,3
8	5	32	18	45	2,84	24	34	10	N	1	1	A	-	-	-	7	0,7
9	1	25	21	53	2,66	35	44	9	N	1,4	0,5	A	-	-	-	21	1,7
10	35	35	19	11	2,84	29	33	4	S	1	4	A	-	-	-	11	0,9

G_1 – % de pedregulho; S_1 – % de areia; M_1 – % de silte; C_1 – % de argila; G_s – peso específico dos grãos finos; W_p – limite de plasticidade; W_L – limite de liquidez; I_p – índice de plasticidade; E – expansão; C_L – contração; P – penetração; R_E – resistência ao esmagamento; ρ_d – massa específica aparente seca; ρ – massa específica natural; e = índice de vazios; W_o – umidade natural; W_h – umidade higroscópica.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de laboratório – Propriedades químico-mineralógicas e classificação dos solos.

Ponto	pH/ H ₂ O	pH/ KCl	ΔpH	Q	M	G	I	K	P	MCT	SUCS	TRB	Erodibili- dade
1	5,8	4,7	-1,1	S	-	S	S	S	3,70	LA'	SM	A-7-5	Média
2	5,9	5,4	-0,5	S	S	S	S	S	3,78	NA'	SC-SM	A-2-4	Alta
3	5,4	4,2	-1,2	S	-	-	S	S	0,81	LA'	SM	A-2-4	Alta
4	5,5	4,4	-1,1	-	-	-	-	-	0,76	LA'	GM	A-2-4	Média
5	5,4	5,0	-0,4	-	-	-	-	-	1,71	LA'	SM	A-2-4	Média
6	5,3	4,6	-0,8	-	S	S	-	S	0,70	LA'	GM	A-2-7	Baixa
7	5,3	4,4	-0,9	-	-	-	-	-	0,34	LA'	GM	A-2-4	Baixa
8	4,9	4,2	0,7	-	-	-	-	-	-	LG'	ML	A-4	Média
9	7,8	7,6	-0,2	-	-	-	-	-	-	LG'	ML	A-5	Alta
10	7,6	6,8	-0,8	-	-	-	-	-	-	NA	SM	A-2-4	Média

Minerais: Q – quartzo; M – muscovita; G – gibbsita; I – ilita; K – caulinita; Sistema Panda – resistência à penetração de ponta; SUCS: ML - silte com baixa plasticidade; GM – pedregulho siltoso; SM – areia siltosa; SC-SM – areia argilo-siltosa.

A título de exemplo, a Figura 13 apresenta, para a amostra de solo coletada no “Ponto 1 – Enseada do Ribeirão Sarandi” (a Figura 14 apresenta uma fotografia obtida no Ponto durante os trabalhos de campo), as curvas granulométricas obtidas por peneiramento e ensaios de sedimentação com e sem o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio (a) e ensaios no granulômetro a *laser* com e sem o uso de ultrassom (b).

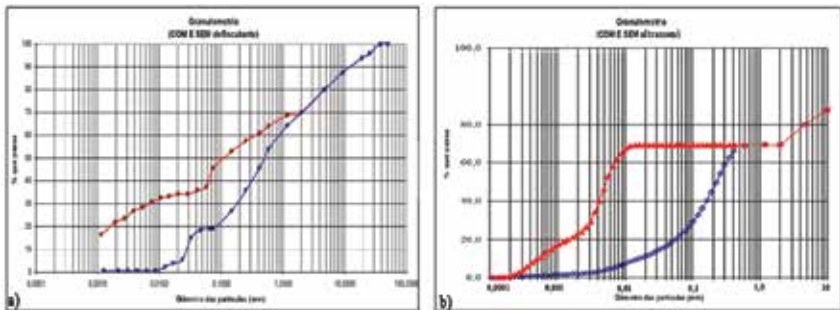


Figura 13. Análise granulométrica da amostra de solo do “Ponto 1”: a) ensaios com e sem o uso de defloculante; b) ensaios no granulômetro a *laser* com e sem o uso do ultrassom.

Observa-se, na Figura 13, que a diferença entre as curvas com e sem o uso de defloculante (Figura 13a) atesta a presença de agregados ou pacotes de argila que podem ser instabilizados e erodidos pelos componentes químicos existentes nos fertilizantes e defensivos agrícolas. Por sua vez, a diferença entre as curvas com e sem o uso de ultrassom na análise de granulometria a *laser* (Figura 13b) atesta a presença de agregados ou pacotes de argila que podem ser erodidos pela ação mecânica dos implementos agrícolas usados no preparo do solo para o plantio de culturas de soja e cana-de-açúcar, práticas comuns na agricultura mecanizada presente na área de estudo. Cabe destacar que certos agregados e pacotes de argila

podem ser instabilizados química e mecanicamente e outros não. Os agregados ou pacotes de argila encontrados no local certamente contribuem para uma melhor infiltração e resistência à erosão, no entanto, podem ser destruídos pelas atividades agrícolas na área.

A partir dos resultados dos ensaios geotécnicos, foram classificados os solos quanto à erodibilidade. Os resultados são apresentados na Tabela 8. Segundo Vale Junior et al. (2009), existe uma relação entre a velocidade de infiltração da água no solo (VIB) com a sua granulometria, em que os solos com menores teores de argila apresentam uma alta VIB. Cabe aqui abrir um parêntese para chamar a atenção para o fato de que, nos solos tropicais, é importante que se considere a granulometria do solo no estado natural e não a obtida por meio de agentes defloculantes e/ou desagregadores.

A combinação de uma boa infiltrabilidade de água com relevo predominantemente plano, a princípio, ampliaria a melhor capacidade de infiltração e reduziria o risco de perdas de solos por erosão laminar. Porém, como observado na Tabela 9, as áreas analisadas apresentaram erodibilidade do solo alta e média (pontos 9 e 10), afetadas principalmente pela intensa atividade de agricultura mecanizada e pelo uso intenso de defensivos e insumos agrícolas. Nesse caso específico, em uma primeira fase, a da aragem e do gradeamento do solo, a infiltração é favorecida; porém, com a desagregação e a compactação geradas pelos ciclos de molhagem e secagem e pela passagem dos implementos agrícolas em áreas de plantio e pisoteio de animais em áreas de pecuária, essa tendência pode se inverter. Por um lado o solo, desagregado se torna mais facilmente carregado e por outro, ocorrendo a compactação, tem-se maior impermeabilização, o que amplia o fluxo superficial, propiciando a ocorrência de erosões de superfície e maior facilidade no aporte de sedimentos em direção ao reservatório da UHE Corumbá IV.

Tabela 9. Síntese das classificações geotécnicas nas amostras de solo analisadas.

Local	Classe de solo	Erodibilidade
Ponto 1	Areia argilosa com pedregulho	Média
Ponto 2	Areia siltosa	Alta
Ponto 3	Areia siltosa com pedregulho	Alta
Ponto 4	Pedregulho siltoso com areia	Média
Ponto 5	Areia argilosa com pedregulho	Média
Ponto 6	Pedregulho argiloso com areia	Baixa
Ponto 7	Pedregulho argiloso com areia	Baixa
Ponto 8	Argila arenosa	Média
Ponto 9	Silte arenoso	Alta
Ponto 10	Areia siltosa com pedregulho	Média

Os solos nas escarpas e vertentes desmatadas da bacia hidrográfica do Sarandi não possuem mais a cobertura vegetal original de cerrado, apresentando, dessa forma, erodibilidade do solo média. A Figura 14 apresenta uma fotografia obtida no Ponto 4, em uma das margens de uma enseada do Ribeirão Sarandi, obtida durante um dos ensaios de campo com penetrômetro Panda. Essa imagem apresenta solo exposto indicativo do baixo nível do reservatório, sem que faça sobressair aparente erosão de margem. Nesses ensaios com Panda, os solos que

apresentaram baixa resistência à penetração podem ser associados à menor erodibilidade e à presença de um solo com elevada concentração de matéria orgânica. Destaque-se que a matéria orgânica, por seu caráter agregador, dificulta a erodibilidade do solo.



Figura 14. Ensaio geotécnico com penetrômetro Panda às margens do Ribeirão Sarandi (Ponto 1).

Por sua vez, na Tabela 9, os solos com presença de pedregulho apresentam baixa (pontos 6 e 7) e média erodibilidade do solo (ponto 4). Os demais tipos de solo presentes (pontos 2, 3, e 9) apresentam alta erodibilidade, com alta penetrabilidade durante os ensaios do Panda. Os demais solos com predominância de areia em sua composição, mesmo que possuam erodibilidade do solo média a alta, apresentam maior capacidade de infiltração e, por consequência, menor acúmulo no escoamento de água na superfície e menor erosão laminar.

Os ensaios geotécnicos, tanto os de campo como os de laboratórios, confirmaram a existência de locais situados às margens do ribeirão, cujos solos são classificados como sem coesão e com uma baixíssima resistência à penetração dinâmica. Esses locais estão situados em sopés de vertentes acentuadas e com um alto grau de ocupação antrópica. Essas características, por si sós, tornam esses solos muito propícios aos processos erosivos laminares e diminuem sua capacidade de infiltração. Como esses cursos d'água possuem, graças à sua morfometria e geologia, uma energia considerável no transporte de sedimentos das regiões de maior altitude para o reservatório, existe a possibilidade de que, em alguns trechos, as suas margens opostas venham a se unir devido ao assoreamento ora em curso. Tal fato reduziria o espelho d'água do reservatório na área de estudo e, conseqüentemente, a capacidade da UHE Corumbá IV em produzir energia elétrica.

Os ensaios geotécnicos também confirmaram, nos locais próximos às propriedades agrícolas com cultura mecanizada de soja e de cana-de-açúcar e às margens de estradas que se conectam ao reservatório da UHE Corumbá IV, a existência de erosões laminares classificadas pela pesquisa em pauta como de alta intensidade. Esses locais se situam nas maiores altitudes da bacia hidrográfica do Ribeirão do Sarandi, em que as propriedades agrícolas ali existentes empregam (Figura 2), de forma intensa, o uso de calcário para alcalinização do solo, bem como fertilizantes químicos e defensivos agrícolas que, em seu conjunto, aumentam bastante

a compactabilidade do solo e contribuem para a contaminação dessas bacias e para o transporte de sedimentos lixiviados pela ação da chuva, principalmente através das estradas que conectam essas áreas agrícolas ao reservatório da UHE Corumbá IV, aumentando a erodibilidade desses solos.

6.2.2 Mapa de suscetibilidade à erosão linear

Para a obtenção do mapa de suscetibilidade à erosão linear, assim como foi exposto no item 5.2.2.2 da metodologia aplicada na pesquisa em pauta, realizou-se a classificação das unidades geológicas e pedológicas da região (Figura 3), de acordo com as características do solo e da litologia das rochas. Desse modo, obteve-se o mapa Geopedológico com quatro classes de vulnerabilidade. Na segunda etapa, foi feito um cruzamento matricial entre o mapa geopedológico e a declividade do terreno, obtendo-se, assim, o mapa de suscetibilidade à erosão linear apresentado na Figura 15.

É possível verificar que o terreno, em sua maior parte, é pouco suscetível aos processos de erosão linear; entretanto, nota-se que, na região próxima ao reservatório, há uma maior suscetibilidade a esses processos e a necessidade de implantação de medidas mitigadoras, pois a proximidade ao reservatório favorece o aporte de sedimentos e seu possível assoreamento. A Figura 15 apresenta, além do mapa de suscetibilidade, uma fotografia obtida no trabalho de campo, em que se pode observar a presença de processos erosivos lineares do tipo sulcos nas proximidades do reservatório da UHE Corumbá IV.

Assim como apresentado no mapa de suscetibilidade à erosão linear, grande parte da área de estudo se encontra na categoria de muito baixa perda de solo; entretanto, novamente próximo ao reservatório, nas áreas de declividade elevada, existe um significativo aporte de solos desprendidos, o que pode contribuir para o assoreamento do reservatório, prejudicando a geração de energia elétrica pela UHE Corumbá IV.

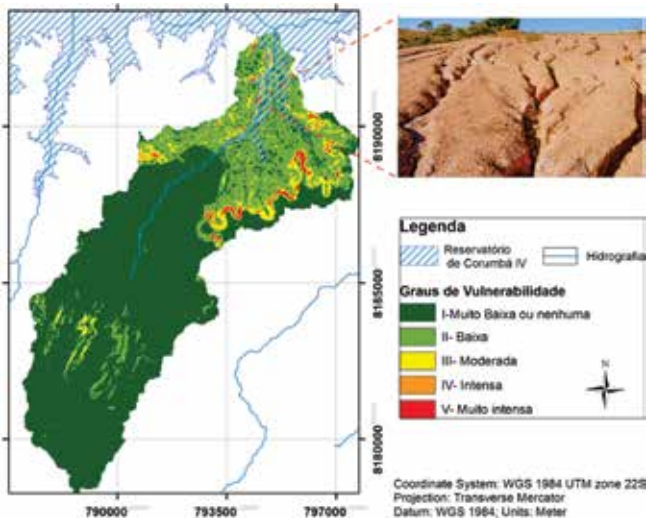


Figura 15. Mapa de suscetibilidade à erosão linear da região de estudo.

Observa-se, na Figura 15, que os contornos das áreas de vulnerabilidade muito intensa, no contato com outras áreas de menor vulnerabilidade, apontam para condicionantes relacionadas à forma do relevo, em que se percebe que as formas convexas se mostram mais vulneráveis que as côncavas. Embora requerendo estudos específicos mais detalhados, essa constatação vai ao encontro das observações feitas por Jesus (2013) e Camapum de Carvalho et al. (2015), pois, em termos de erosão superficial, a maior desidratação do solo de superfície nos formatos convexos pode neles gerar maior erodibilidade, ao passo que, nos formatos côncavos em que o nível freático, se presente, torna-se mais elevado e o solo mais úmido, amplia-se o risco de rupturas das encostas, desencadeando-se processos erosivos mais concentrados e profundos.

Para finalizar, com relação aos mapas que contribuem para a vulnerabilidade ambiental, foram ainda confeccionados adicionalmente um mapa de suscetibilidade ao risco de inundação e um de suscetibilidade às ações antrópicas.

6.2.3 Mapas de suscetibilidades à inundação e às ações antrópicas

Os mapas de suscetibilidades à inundação e às ações antrópicas foram obtidos, respectivamente, pela MDT/SRTM e pelo mapa de uso e cobertura do solo do ano de 2015. Desse modo, foram confeccionados os dois últimos mapas de suscetibilidades integrantes ao processo de geração de vulnerabilidade ambiental, que estão apresentados na Figura 16.

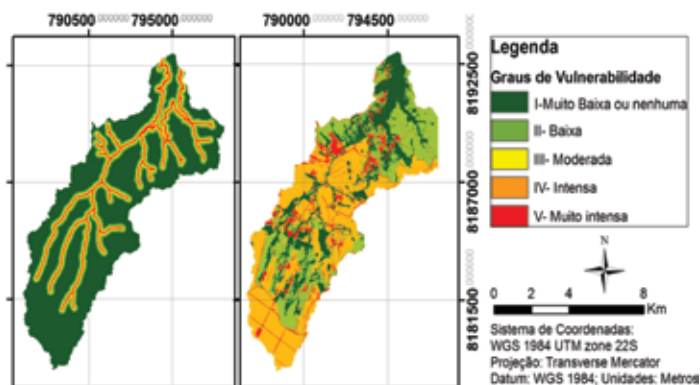


Figura 16. Mapa de suscetibilidade à inundação (à esquerda) e mapa de suscetibilidade às ações antrópicas (à direita).

6.2.4 Obtenção do mapa de vulnerabilidade ambiental

Conforme explicitado no item 5.2.2, de posse dos mapas de suscetibilidades necessários para obtenção do mapa de vulnerabilidade ambiental da área de estudo, foi aplicado o método da AHP, em que o critério utilizado inicialmente nos julgamentos em cada comparação baseou-se principalmente na qualidade e precisão dos mapas de suscetibilidades de entrada. Desse modo, obteve-se a Eq. (5), juntamente com a Razão de Consistência (RC) no valor de

0.055, que está abaixo do limiar superior de aceitação, que é de 0.1. Assim, tem-se, nos julgamentos realizados, uma coerência lógica e consistente.

$$VA = 0.586(\text{suscetibilidade às ações antrópicas}) + 0.232(\text{suscetibilidade a erosão la min ar}) + 0.128(\text{suscetibilidade a erosão linear}) + 0.054(\text{suscetibilidade a inundações}) \quad (5)$$

Aplicando-se a Eq. (5) por meio do algoritmo de álgebra de mapas na ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS, obtém-se o mapa de vulnerabilidade ambiental do ano de 2015, apresentado na Figura 17.

À vista do que foi verificado no mapa de vulnerabilidade ambiental de 2015, constata-se que existem maiores concentrações de áreas vulneráveis próximas ao reservatório e, portanto, escolheu-se essa área para que fosse realizado o voo do VANT/UnB para coleta de dados com maior resolução espacial, a serem utilizados na modelagem ambiental para elaboração do cenário prospectivo do uso do solo para o ano de 2019. Esse procedimento tenciona subsidiar a correta gestão da bacia hidrográfica do Ribeirão Sarandi, por meio da implantação de medidas mitigadoras que visem restringir os impactos erosivos no entorno do reservatório da UHE Corumbá IV.

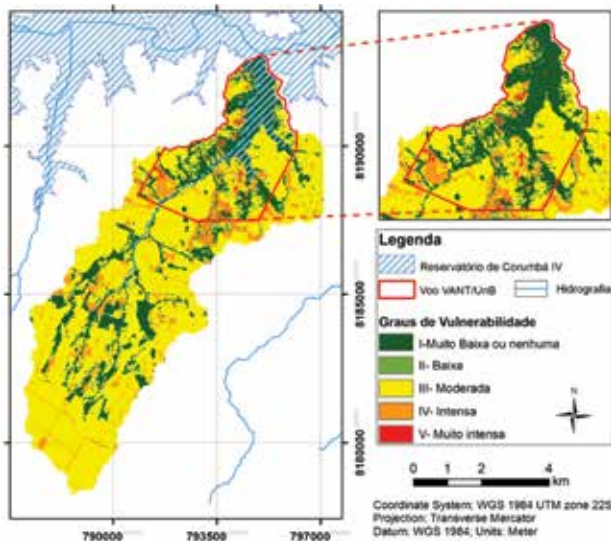


Figura 17. Mapa de vulnerabilidade ambiental do ano de 2015.

6.3 Dinâmica ambiental: cenário prospectivo do mapa de uso e ocupação do solo

No processo da modelagem ambiental da área de estudo, conforme explicitado, foram utilizados os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 2007, 2011 e 2015 – sendo que o ano de 2015 entrou apenas na fase de revalidação – e os mapas ditos intermediários - de declividade, de distância para a malha viária e de distância até a rede de drenagem, obtidos a partir do ortomosaico produzido com o VANT/UnB, e o mapa de tendência fundiária, obtido a partir de fotointerpretação e trabalho de campo.

Para a realização de uma modelagem ambiental mais precisa, a partir dos mapas de uso e cobertura do solo, agrupou-se a classe temática de agricultura e pastagem, obtendo-se, assim, cinco classes. Essa redução de classes temáticas é fundamental para que a modelagem da dinâmica de ocupação antrópica aumente significativamente o sucesso e a similaridade da modelagem e a realidade do terreno na área de estudo. A junção se deu também em função de que o estudo se volta para um panorama prospectivo e, no setor rural, a prática agrícola e de pecuária comumente se revezam nas áreas usadas, além de não raro, após a colheita, o gado ser alimentado com o que sobrou na área (vide Figura 2b).

Para a área escolhida, obtiveram-se, como parâmetros ideais, os valores para *AC patcher* como 0.1 e 0.2 hectares (ha) para a área e variância, respectivamente, e para o *AC expander*, fragmentos de 0.5 e 1.0 (ha) para a área e variância, respectivamente, e para isometria, adotou-se 1.5 para ambos os operadores. Esses valores foram adotados após uma série de testes seguindo o processo de calibração. A Tabela 10 apresenta os índices de similaridade entre o mapa de uso do solo simulado e o obtido para o ano de 2011, na fase de calibração dos autômatos celulares.

Tabela 10. Índices de similaridades máximas entre os mapas de uso do solo simulado e real para o ano de 2011 e 2015 (revalidação), em função da resolução pelo método de decaimento constante.

Windows Sizes	Resolução Espacial – mapa de estudo (m)	Índices de Similaridades mínimas	
		2011 (validação)	2015 (revalidação)
1 x 1	2	0,3445	0,2965
3 x 3	6	0,4143	0,3565
5 x 5	10	0,4549	0,3915
7 x 7	14	0,4909	0,4225
9 x 9	18	0,5244	0,4513
11 x 11	22	0,5561	0,4786
13 x 13	26	0,5854	0,5038
15 x 15	30	0,6127	0,5273
17 x 17	34	0,6383	0,5493
19 x 19	38	0,6627	0,5703
21 X 21	42	0,6844	0,5890

Os valores calibrados apresentados na Tabela 10 forneceram um valor de similaridade superior aos valores de revalidação. Mas, esse resultado é decorrente do problema de se trabalhar com meses diferentes. No caso do ano de 2011, apresentou-se uma similaridade melhor, que deveria ter se confirmado na revalidação, entretanto, o ideal seria trabalhar com uma imagem do ano de 2015, mais próxima do mês de setembro, pois assim o modelo apresentaria o comportamento real do período de seca, observado com os mapas de uso do solo dos anos de 2007 e 2011.

Diante do que foi apresentado, observa-se que, com uma resolução igual ou superior a 18 metros, o modelo já foi validado (limite de corte de 50%). Como esse valor é questionável em algumas literaturas, neste capítulo, propõe-se a colocação da revalidação como uma maneira de mostrar que o modelo está se comportando adequadamente. Pelas razões referidas

anteriormente, o processo de revalidação não foi efetivo, mas se observam as altas similaridades do modelo com resoluções inferiores, já suficientes para aplicações práticas de planejamento territorial e de bacias de contribuição de reservatórios. Dessa maneira, adotou-se uma resolução de 30 metros, na qual o modelo foi validado, apresentando uma similaridade de mais de 60%.

A Figura 18 apresenta a comparação visual dos mapas de uso e cobertura do solo, real e simulada, para os anos de 2011 e 2015.

Apesar dos problemas relatados, os mapas executados pelo Dinamica EGO ficaram bem similares aos mapas reais. Importante observar que, no ano de 2015, há uma menor área classificada como mata galeria/cerrado, devido, principalmente, ao fato de o modelo estar se baseando no histórico de período de seca calibrado entre os anos de 2007 e 2011.

Observa-se também que, apesar da colocação do mapa de situação fundiária e dos demais mapas intermediários que compõem o núcleo *cube raster* do Dinamica EGO, o processo de modelagem é complexo e existe uma série de outros fatores que poderiam ser considerados na modelagem ambiental, como questões políticas e socioeconômicas; todavia, percebe-se a coerência das simulações do Dinamica EGO para os anos de 2011 e 2015.

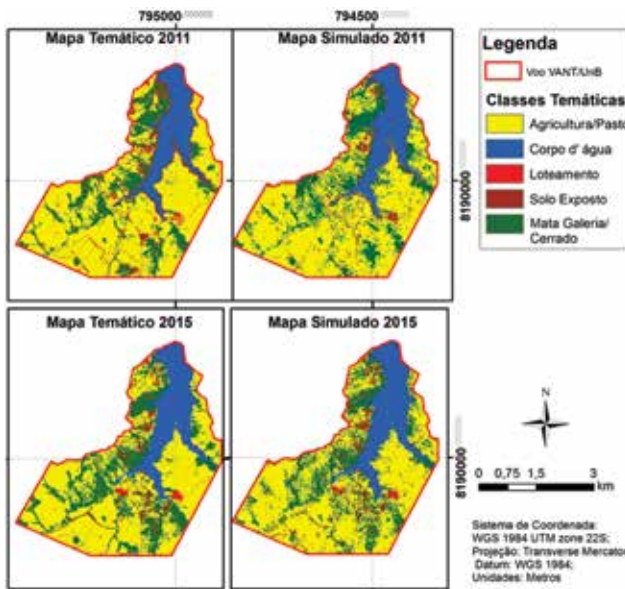


Figura 18. Comparação visual dos mapas real e simulado de uso e cobertura do solo para os anos de 2011 e 2015.

A modelagem da dinâmica ambiental da região com alta vulnerabilidade ambiental para o ano de 2019 encontra-se representada na Figura 19, cujos valores das áreas das classes temáticas de uso e cobertura do solo da área mais vulnerável estão apresentados na Tabela 11.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 11, pode-se observar que as áreas de loteamento se manterão estáveis, mas a vegetação nativa (mata galeria e cerrado) tende a se reduzir, assim como as áreas de solo exposto tendem a aumentarem; ambas as mudanças observadas proporcionam a intensificação dos processos erosivos.

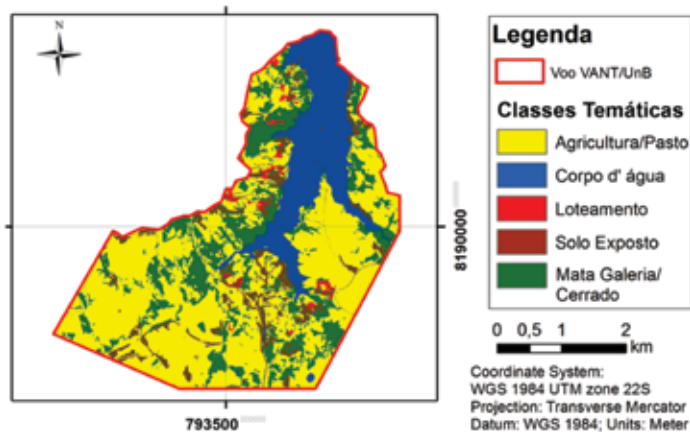


Figura 19. Mapa prospectivo de uso e cobertura do solo para o ano de 2019.

Tabela 11. Valores das áreas das classes de uso e cobertura do solo da área mais vulnerável.

Classes Temáticas	Área em Km ²		
	Temático 2011	Temático 2015	Simulação 2019
Agricultura/ Pastagem	9,31	8,44	8,42
Corpo d' água	2,34	2,75	2,74
Loteamento	0,12	0,23	0,25
Solo exposto	1,35	0,92	1,23
Mata Galeria/ Cerrado	3,00	3,78	3,48
Área Total	16,12	16,12	16,12

No que tange aos valores das classes temáticas de mata galeria e cerrado apresentados na Tabela 11, que sofreram um possível aumento no ano de 2015, permanece válida a afirmação de que a diferença dos valores de radiância da vegetação captada pelo sensores remotos, devido às imagens terem sido obtidas em estações climáticas distintas, podem acarretar que, no processo de classificação temática, essas classes apresentem valores de áreas superiores, o que não configura uma possível regeneração desse tipo de vegetação. Conforme já citado, o que se observou durante os trabalhos de campo foi que as áreas de pastagem e de agricultura mecanizada avançam sobre as áreas de vegetação nativa, o que é confirmado na simulação feita para o ano de 2019.

7 Considerações finais

As técnicas de processamento de imagens utilizadas possibilitaram aumentar a resolução das imagens *RapidEye* na fusão com as imagens georreferenciadas do *Google Earth*, além de melhorar a qualidade das imagens, permitindo uma classificação temática mais aprimorada. Além do mais, foram eficazes na confecção do mapa de vulnerabilidade ambiental, juntamente com os demais mapas de suscetibilidade utilizados.

Cada um dos mapas de suscetibilidade integrantes da vulnerabilidade ambiental é importante para a percepção das fragilidades naturais e das provocadas pelo uso antrópico na região de estudo. Os resultados obtidos com ensaios geotécnicos em campo e em laboratório deram sustentabilidade ao parâmetro de erodibilidade da EUPS, cuja aplicação permitiu a detecção das áreas mais propensas à perda de solo por processos laminares. O método qualitativo de geoindicadores possibilitou a verificação das áreas mais vulneráveis a processos erosivos lineares da região, que foram observados com idas a campo. Além disso, a verificação dos mapas de suscetibilidade à inundação e às ações antrópicas permitiu a composição do mapa de vulnerabilidade final da região.

O mapa de vulnerabilidade ambiental de 2015 demonstrou a fragilidade ambiental moderada em quase toda a microbacia do Ribeirão Sarandi, decorrente, sobretudo, da elevada quantidade de áreas agrícolas e de pastagem. As áreas mais críticas se encontram próximas ao reservatório, dentro de sua área de proteção permanente, e são marcadas pela presença de loteamentos que intensificaram o processo de desmatamento da vegetação nativa (mata de galeria e cerrado).

A observação feita quanto à importância da forma do relevo no grau de vulnerabilidade da área estudada aponta para a necessidade de se considerar a geomorfologia nas avaliações prospectivas e fáticas.

Os resultados obtidos com a modelagem ambiental por meio de cenário prospectivo do uso e cobertura do solo para o ano de 2019, para a área com maior vulnerabilidade da bacia hidrográfica do Ribeirão Sarandi, permitem subsidiar a implantação de medidas mitigadoras que possam vir a reduzir os impactos ambientais decorrentes dos processos erosivos no entorno do reservatório da UHE Corumbá IV.

Os resultados obtidos com a modelagem ambiental possuem aplicação não somente em reservatórios, mas também em várias outras questões que envolvam o planejamento urbano e territorial, perpassando os aspectos apenas erosivos. Isso demonstra o potencial de aplicação da metodologia e a necessidade de que quem a interprete possua experiência para verificar possíveis deficiências das modelagens. Afinal, como já dito anteriormente, o modelo deve ser levado em conta como referência de tendência de comportamento dos processos de ocupação e uso do solo, pois existem vários outros processos que norteiam essa dinâmica homem-meio ambiente, além das incertezas do próprio modelo e da qualidade cartográfica dos dados de entrada na plataforma do Dinamica EGO.

Ressalte-se que a precisão da modelagem da dinâmica ambiental, principalmente na fase de validação do modelo, deveu-se à qualidade dos dados obtidos com VANT/UnB, que, em virtude da sua alta resolução espacial, contribuíram para uma melhor qualidade na simulação do cenário prospectivo do uso e cobertura do solo para o ano de 2019.

Recomenda-se que se utilizem mapas de alta resolução espacial e imagens de satélite com meses de aquisição semelhantes, de maneira a se evitar problemas de revalidação, como fora relatado, e melhorar a qualidade da simulação futura do mapa de uso e cobertura do solo.

Observa-se que a metodologia empregada também pode ser replicada para outras bacias hidrográficas de contribuição de reservatórios em todo o País para, dessa forma, servir como subsídio aos planos dos comitês de bacia. Além disso, é uma importante ferramenta para as hidrelétricas conseguirem estimar as alterações que ocorrerão fora do reservatório, mas que venham afetar diretamente a geração de energia elétrica, acarretando prejuízos não só de ordem

econômica, mas também de ordem social e ambiental. A importância da metodologia é prever qual a tendência de expansão e retração dos diversos usos do solo da região e, dessa maneira, conseguir evitar danos que custariam potencialmente mais se comparados a custos preventivos.

Referências

ALMEIDA, C.M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento**: simulação de mudanças de uso do solo em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2003. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos. 2003.

ALMEIDA, W. S.; SOUZA, N. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Produção de carta geotécnica preliminar da capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica de Corumbá IV (GO). In: CAMAPUM DE CARVALHO, J. ; GITIRANA JUNIOR.,G. de F. N.; CARVALHO, E. T. L.. (Org.). **Tópicos sobre infiltração**: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. 1ed. Brasília: Universidade de Brasília, v. 4, p. 581-606. 2012.

ALMEIDA, W. S., SANTOS, S.L., CHRISTAKOU, E. D., JUNIOR, E. E. A. S., C.P.L. SILVA. Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) high spatial resolution data to produce digital terrain model and visible spectral imagery. In: **South-Eastern European Journal of earth observation and geomatics**, ISSN 2241-1224. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, Greece. 2014. v. 3, p. 239-243.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres. 3. ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.

BRASIL. **Lei n. 12.651, de 25 de Maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm> Acesso em: 05 de junho. 2016.

BURROUGH, P. **Dynamic modelling and geocomputation**. A Primer. P. Longley; M. Batty and R McDonnel; John Wiley & Sons. London, U.K., 1998. 290p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., REZENDE, L.R. CARDOSO, F.B.F., LUCENA, L.C.F.L., GUIMARÃES, R.C.; VALENCIA, Y.G. Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. **Transportation geotechnics**, v. 5: pp. 3–19. 2015.

CAMPAGNOLI F. **A aplicação do assoreamento na definição de geoindicadores ambientais em áreas urbanas**: exemplo na Bacia do Alto Tietê, SP. 2002. 195 p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica - USP. São Paulo. 2002. 195p.

DANTAS, A. A. N.; MENDES, T. A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Influência da adição de calcário na estabilidade de solos tropicais. In: **XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**. 2014. 5 p.

FANG, J. H. Fuzzy logic and geology. **Geotimes - news and trends in geoscience**, v. 42, p. 23-26. 1997

JESUS, A.S. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares: estudo de caso da cidade de Anápolis - GO**. 2013. 340 fl. Tese de Doutorado G.T.D. – 087/2013, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília. 2013.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. **Erosividade da chuva**: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, Campinas, 51(2): pp. 189-196. 1992.

MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. **Revista do departamento de geografia** – USP, p. 57-79. 2012.

MOORE, I.; BURCH, G. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. In: **Soil science society of America Journal**. p- 1294-1298. 1886.

NOVAES, A. G. **Modelos em Planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

ROSS, J.L.S. (1994). Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do departamento de geografia**. n. 8, p. 63-73. 1994.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. McGraw-Hill, New York. 1980. 287 p.

SILVA, T. O.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; LANI, J. L.; OLIVEIRA, T. M. Sistemas de classificações geotécnicas de solos: estudo de caso aplicado à rodovia VCS 346. **Revista de solos**. Viçosa - MG, v. 34, n. 2, p. 313-321 2010.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. **Modelagem de dinâmica ambiental com Dinâmica EGO**. Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte 2009, 116p.

SOARES-FILHO, B.S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: ALBERNAZ, A. L.; SILVA, J. M. C. D.; VALERIANO, D. (Org.). **Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais**. Belém: Editora Museu Paraense Emílio Goeldi. 1 ed., v.1, p. 100- 116. 2003. TAGLIANI, C. R. A. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um Sistema Geográfico de Informação. **Revista fatorGIS**. 2003, 8 p.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977, 91 p.

VALE JUNIOR, J. F; BARROS, L. S.; SOUSA, M. I. L.; UCHOA, S. C. P. Erodibilidade e suscetibilidade à erosão dos solos de cerrado com plantio de *Acacia mangium* em Roraima. **Revista Agro@ambiente on-line**. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Roraima. Boa Vista, RR, v. 3, n. 1, p. 1- 8. 2009.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C. 1978, 58p.

CAPÍTULO 15

Mapeamento de cobertura do solo em bordas de reservatório e processos erosivos associados

Diego Tarley Ferreira Nascimento
Patrícia de Araújo Romão
Maurício Martines Sales
Fillipe de Paula Almeida

Palavras-chave: Cobertura do solo. Processos Erosivos. Erosão. Borda. Reservatório.

1 Introdução

A apropriação e a transformação da natureza pelo homem tiveram início com a fixação das civilizações nômades e o começo da atividade agrícola predatória, em que o homem começou a produzir e a estocar o excedente para comercialização. Ao ocupar, intervir e modificar o meio para extrair os recursos necessários à produção de bens para seu consumo e proveito, o homem transforma a “primeira natureza” em uma “segunda natureza” (SANTOS, 1996), representada pela mudança na cobertura do solo.

Apesar de o homem ser relativamente recente na história geológica dos aproximadamente 4 bilhões de anos do planeta, haja vista ter aparecido apenas na época do Pleistoceno (entre 130 e 200 mil anos atrás), a intensa expansão demográfica nos últimos 200 anos, condicionada por avanços das técnicas agrícolas, industriais e medicinais, ocasionou uma intensa alteração da cobertura do solo. Isso porque, para prover as necessidades dos pouco mais de 7 bilhões de habitantes, tem-se apropriado de forma intensa e cada vez mais dinâmica do solo e dos recursos naturais disponíveis.

Nesse contexto, convém destacar que os mapeamentos de cobertura do solo fornecem o panorama das mudanças na paisagem pela ação antrópica, apresentando a correlação entre o meio físico (natural) e o socioeconômico (antrópico), por meio da forma com que o homem se apropria dos elementos e dos recursos naturais dispostos na superfície terrestre. Os mapeamentos de cobertura correspondem a um importante insumo ao planejamento, zoneamento, manejo e ordenamento ambiental e/ou econômico, seja em escala local, regional ou global, ou ainda compreendendo as esferas municipal, estadual ou nacional, por fornecer informações a respeito das potencialidades dos recursos naturais e das restrições ou da incongruência de seu uso.

Sendo assim, o presente capítulo pretende apresentar uma revisão teórica acerca dos mapeamentos de cobertura do solo, de modo a apresentar um panorama dos principais mapeamentos elaborados internacional e nacionalmente, indicando a metodologia utilizada e os tipos de dados primários e secundários usualmente empregados. Ainda pretende-

-se apresentar a aplicação desse mapeamento para as bordas de reservatórios de usinas hidrelétricas, sugerindo uma proposta metodológica integrada com vistas ao estudo de processos erosivos.

2 Mapeamentos de cobertura do solo

2.1 Definições e escopo

Inicialmente, cabe salientar a diferença entre os termos uso e cobertura do solo, muitas vezes empregados indiscriminadamente ou como se fossem sinônimos. Contudo, o primeiro (uso) diz respeito à atividade desenvolvida em determinada localidade, enquanto o segundo (cobertura) se refere ao seu revestimento (ARAÚJO FILHO; MENESES; SANO, 2007). Por exemplo: áreas florestadas que, embora sejam um só tipo sob o ponto de vista de cobertura, podem ter diferentes usos: lazer, exploração de madeira, Unidade de Conservação etc. Ainda, a designação de terra em vez de solo pretende deixar em evidência o sentido de terra arável, ou agriculturável (MONTEIRO, 2008). Assim, ao se adotar um sistema de classificação de uso, de cobertura ou de uso e cobertura do solo/terra, deve-se levar em conta o nível de detalhamento passível de ser realizado e a finalidade do mapeamento.

Assim, os mapeamentos de cobertura do solo são propostas de sistemas de classificação das diferentes coberturas que revestem o solo, tendo como intuito maior sistematizar, sintetizar, simplificar, condensar e comunicar a diversidade de tipos de cobertura do solo em dado recorte espacial (localidade) e temporal (ano de referência). O processo de classificação inclui a distribuição ou o arranjo sistemático de objetos ou elementos do mundo real em classes ou categorias, de acordo com critérios estabelecidos e com suas afinidades ou características comuns. Assim, os sistemas de classificação de cobertura do solo podem ser compreendidos como um conjunto de normas e critérios lógicos para definição de como os diferentes tipos de cobertura do solo são arranjados e agrupados, respeitando-se o nível de detalhamento pretendido e os tipos de dados que serão empregados.

2.2 Metodologias e tipos de dados empregados

Existem várias metodologias referentes aos sistemas de classificação de cobertura do solo, essencialmente no que diz respeito ao arranjo e à denominação das classes temáticas de mapeamento, como também aos tipos de dados utilizados e à escala de detalhamento empregada (ANDERSON et al., 1976; EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 1995; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013).

A forma de disposição e distribuição das classes pode ser hierárquica ou não. O sistema de classificação hierárquico é aquele que apresenta classes em níveis superiores mais generalizados, sendo detalhadas em níveis inferiores por meio de subclasses que podem, inclusive, substituir as classes de primeiro nível. O sistema de classificação sem estrutura hierárquica apresenta classes estruturadas isoladamente, baseando-se em diferentes critérios e detalhamentos para a definição de classes dispostas num mesmo nível – vide Figura 1.

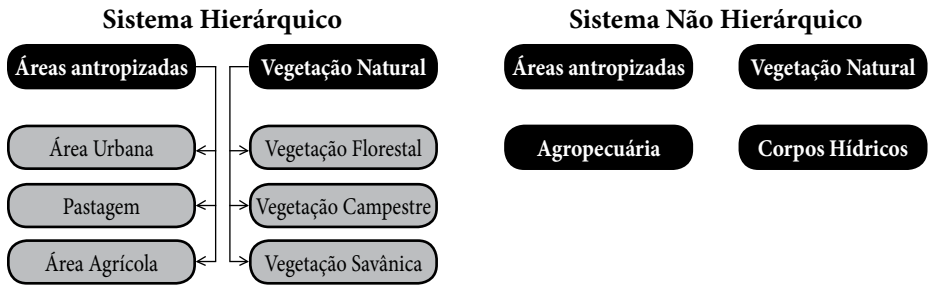


Figura 1. Diferença entre sistema de classificação hierárquico e não hierárquico. Elaboração: próprios autores.

A denominação das classes temáticas de cobertura do solo pode ser feita *a priori*, em que são determinadas classes abstratas sem conhecer a realidade do que existe na área a ser aplicada, ou *a posteriori*, em que são feitas averiguações em campo anteriormente à classificação com vistas a identificar quais classes ali existem (DI GREGORIO; JANSEN, 2000).

Desde os primeiros sistemas de classificação de cobertura desenvolvidos tem sido utilizada a tecnologia do sensoriamento remoto, com o emprego de fotografias aéreas e até de imagens de satélites, as quais têm fornecido importante insumo para esse tipo de mapeamento. O sensoriamento remoto possibilita o registro de distantes áreas e longas extensões da superfície do solo sem que haja contato físico, isto é, a partir de plataformas aéreas (fotografias aéreas) e espaciais (imagens orbitais). Além disso, as imagens de satélite permitem o acompanhamento da evolução e da dinâmica existente na superfície, considerando o período de retorno numa mesma localidade, isto é, a partir da resolução temporal das imagens que podem variar em minutos, dias ou meses.

A imagem de satélite compreende o registro de radiação eletromagnética (REM) advinda principalmente do sol, interagindo desde a atmosfera com os objetos e elementos que compõem a superfície terrestre. Nesse processo uma parte dessa radiação é transmitida, outra parte, absorvida, e a outra, refletida. A interação da REM com a superfície terrestre pode ser registrada pelos sensores a bordo de plataformas aéreas e espaciais. A interação com esses objetos e elementos será diferente, conforme sua composição, proporcional à intensidade da radiação refletida, captada pelo sensor e transformada em valores digitais.

Um dos mais simples métodos de identificação e classificação da cobertura do solo por meio de imagens de satélite baseia-se no processo de considerar determinado grupo de valores digitais (de intensidade de radiação eletromagnética) como pertencente a uma classe específica.

Uma importante característica dos sensores a bordo das plataformas e, por conseguinte, das imagens de satélite registradas por eles, diz respeito à resolução espacial, que representa a capacidade de distinguir e reconhecer os objetos e os elementos da superfície por meio das imagens. Conforme a resolução espacial dos sensores, imagens com alta, média e baixa resolução espacial podem ser registradas, correspondentes, portanto, à precisão e ao detalhamento das informações, proporcionais às escalas de mapeamento.

As escalas estabelecidas pelos sistemas de classificação no mapeamento do uso e cobertura do solo podem ser em nível exploratório (< que 1:1.000.000), de reconheci-

to (1:1.000.000 a 1:250.000), de semidetalhe (1:250.000 a 1:25.000) e de detalhe (maior que 1:25.000). Geralmente o nível exploratório e o de reconhecimento atendem às escalas mundial e nacional de mapeamento, respectivamente, o de semidetalhe abrange a escala estadual e regional, enquanto o de detalhe contempla as escalas municipais e locais.

Considerando a relação entre o padrão de exatidão cartográfica em imagens de satélite e os valores de resolução espacial nominal das mesmas (também denominado de IFOV) (BOGGIONE et al., 2009), para mapeamentos de detalhe (grande escala) deve-se fazer uso de imagens de satélite com resolução espacial menor que 10 metros, tendo como principais possibilidades os satélites Geoeye, Worldview, Quickbird, Ikonos, Spot, RapidEye e ALOS. O nível de semidetalhe (média escala) pode ser atendido empregando-se imagens com resolução espacial entre 10 e 120 metros, abarcando uma gama de possibilidades de sensores e de satélites, dentre os quais se destacam o Landsat e o CBERS. Por sua vez, para o nível exploratório e o de reconhecimento (pequena escala) sugere-se o uso de imagens de satélite com resolução espacial entre 120 metros e 1 ou 2 quilômetros, tendo como principal fonte as imagens do sensor MODIS, a bordo dos satélites AQUA e TERRA.

Di Gregorio e Jansen (2000) destacam que o sistema de classificação deve ser concebido de forma padronizada, ampla e consistente; com o emprego de classes e de nomenclaturas que abarquem a diversidade dos tipos de cobertura do solo existente e forneçam uma descrição clara e sistemática das classes; com o uso de diferentes escalas e em distintos níveis de detalhe; e com a capacidade de correlação a um sistema de referência, para que seja comparável e de modo a suprir as necessidades de usuários diversos. Anderson et al. (1976) sugerem ainda que os sistemas de classificação devem, pelo menos, permitir a identificação das categorias ou classes em terminologias explícitas, cabendo ao mapeamento proposto “a tarefa de agregá-las em níveis mais generalizados ou subdividi-las em novos níveis, de acordo com seus objetivos” (ARAÚJO FILHO; MENESES; SANO, 2007, p. 172).

Com base nesses pressupostos metodológicos, uma série de metodologias foi desenvolvida, tais quais as de referência internacional e nacional – a serem apresentadas no próximo tópico – ou outras adaptadas a objetivos específicos ou a dados empregados, conforme apresentado por Sano et al. (2007) para o bioma Cerrado.

2.3 Sistemas de classificação de referência internacional e nacional

Conforme apontado por Monteiro (2008) e Prado (2009), a primeira referência internacional de mapeamentos de cobertura do solo foi autoria da Comissão Mista para Informação e Classificação do Uso da Terra, iniciada em 1971 para o mapeamento dos Estados Unidos. Por meio da colaboração do Departamento do Interior, da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (Nasa) e do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América, além da participação da Associação de Geógrafos Americanos e da União Geográfica Internacional, foi desenvolvido um sistema hierárquico de classificação do uso da terra e do revestimento do solo por dados de sensoriamento remoto (ANDERSON et al., 1976). Essa proposta atende às escalas nacional, interestadual ou estadual em seus níveis I e II, sendo as classes apresentadas pelo Tabela 1.

Tabela 1. Níveis I e II do sistema de classificação proposto por Anderson et al. (1976).

NÍVEL I	NÍVEL II
1. Terra urbana ou construída	1.1 Residencial
	1.2 Comercial e serviços
	1.3 Industrial
	1.4 Transportes, comunicações e utilidades
	1.5 Complexos industriais e comerciais
	1.6 Terra urbana ou construída mista
	1.7 Outro tipo de terra urbana ou construída
2. Terra agrícola	2.1 Terra de cultivo e pastagem
	2.2 Pomares, bosques, vinhedos, viveiros e áreas de horticultura ornamental
	2.3 Atividades de alimentação confinada
	2.4 Outro tipo de terra agrícola
3. Pastagem	3.1 Pastagem herbácea
	3.2 Pastagem com arbusto e carrasco
	3.3 Pastagem mista
4. Terra de floresta	4.1 Terra de floresta decídua
	4.2 Terra de floresta sempre verde
	4.3 Terra de floresta mista
5. Água	5.1 Cursos d'água e canais
	5.2 Lagos
	5.3 Reservatórios
	5.4 Baías e estuários
6. Terra úmida	6.1 Terra úmida florestada
	6.2 Terra úmida não florestada
7. Terra árida	7.1 Planícies salgadas secas
	7.2 Praias
	7.3 Outras áreas de areia além de praias
	7.4 Rocha exposta
	7.5 Minas a céu aberto, pedreiras e minas de cascalho
	7.6 Áreas de transição
	7.7 Terra árida mista
8. Tundra	8.1 Tundra de arbusto e macega
	8.2 Tundra herbácea
	8.3 Tundra de solo nu
	8.4 Tundra úmida
	8.5 Tundra mista
9. Neve ou gelo perene	9.1 Campos de neve perene
	9.2 Geleiras

Conforme a necessidade em se atender às escalas regionais ou locais, os níveis I e II podem ser detalhados para os níveis III e IV, correspondentes a especificações e extensões lógicas das classes anteriores, conforme visto para o caso da classe “1.1 Residencial”, detalhada para os níveis III e IV no Tabela 2, a seguir.

Tabela 2. Detalhamento da classe 1.1 Residencial para os níveis III e IV.

1.1.1 Residencial Unifamiliar	1.1.1.1 Casa, casa-barco, cabana, tenda
	1.1.1.2 Casa motorizada (trailer)
1.1.2 Residencial Multifamiliar	1.1.2.1 Duplex
	1.1.2.2 Triplex
	1.1.2.3 Prédios
	1.1.2.4 Parque de casas motorizadas (trailers)

Fonte: Anderson et al. (1976).

Outra importante referência internacional foi o desenvolvimento do *Coordination of Information on the Environment (Corine) – Land Cover*, criado pela Comissão Europeia e por aqueles responsáveis pela compilação de informações ambientais e pela produção de um mapeamento temático de cobertura do solo de toda a Europa em 1990, o qual foi atualizado para os anos de 2000, 2006 e 2012. Nesse sistema, foram propostos três níveis de mapeamento, o primeiro referente às classes generalizadas, o segundo indicado para atender às escalas de 1:1.000.000 até 1:500.000 e o terceiro sugerido para mapeamentos em escala de 1:100.000 – Tabela 3. A proposta ainda permite o detalhamento do terceiro nível para um quarto, podendo ser aplicado a escalas locais.

Tabela 3. Níveis I, II e III do sistema de classificação *Corine*.

NÍVEL I	NÍVEL II	NÍVEL III
1. Superfícies Artificiais	1.1 Estruturas urbanas	1.1.1 Estruturas urbanas contínuas
		1.1.2 Estruturas urbanas descontínuas
	1.2 Unidades industriais, comerciais e de transporte	1.2.1 Unidades industriais ou comerciais
		1.2.2 Rodovias e ferrovias e feições associadas
		1.2.3 Áreas portuárias
		1.2.4 Aeroportos
	1.3 Locais de minas, de depósitos e de construção	1.3.1 Locais de extração mineral
		1.3.2 Locais de depósitos de lixo
		1.3.3 Locais de construção
	1.4 Áreas vegetadas artificiais e não agrícolas	1.4.1 Áreas verdes urbanas
		1.4.2 Instalações para esporte e lazer

NÍVEL I	NÍVEL II	NÍVEL III
2. Áreas agrícolas	2.1 Terras aráveis	2.1.1 Terras aráveis não irrigadas
		2.1.2 Terras permanentemente irrigadas
		2.1.3 Campos de arroz
	2.2 Culturas permanentes	2.2.1 Vinhedos
		2.2.2 Árvores frutíferas e plantações de fruto silvestre
		2.2.3 Bosques de oliveiras
	2.3 Pastagens	2.3.1 Pastagens
	2.4 Áreas agrícolas heterogêneas	2.4.1 Culturas anuais associadas com culturas permanentes
		2.4.2 Padrões de cultivo complexo
		2.4.3 Terras ocupadas principalmente por agricultura, com áreas significativas de vegetação natural
		2.4.4 Áreas agroflorestais
	3. Florestas e áreas seminaturais	3.1 Florestas
3.1.2 Florestas de coníferas		
3.1.3 Florestas mistas		
3.2 Associações de vegetação herbácea/arbustiva		3.2.1 Campos naturais
		3.2.2 Urzais e charnecas
		3.2.3 Vegetação mediterrânea de <i>Sclerophyllous</i>
		3.2.4 Transição arbusto/bosque
3.3 Espaços abertos com pouca ou nenhuma vegetação		3.3.1 Praias, dunas e areais
		3.3.2 Afloramentos rochosos
		3.3.3 Áreas com vegetação esparsa
		3.3.4 Áreas queimadas
	3.3.5 Geleiras e neves perenes	
4. Áreas úmidas	4.1 Áreas úmidas interiores	4.1.1 Pântanos interiores
		4.1.2 Turfeiras
	4.2 Áreas úmidas litorâneas	4.2.1 Pântanos salinos
		4.2.2 Salinas
		4.2.3 Planícies intermarés
	5. Corpos d'água	5.1 Águas interiores
5.1.2 Corpos d'água		
5.2 Águas marinhas		5.2.1 Lagunas costeiras
		5.2.2 Estuários
		5.2.3 Mares e oceanos

Com o intuito de classificar os tipos de uso e cobertura do solo, analisar os impactos e definir indicadores de qualidade ambiental, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apresentou, em 1999, um sistema de classificação de uso e cobertura da terra, denominado *Manual técnico de uso da terra*. Em sua primeira edição, o sistema de classificação do IBGE considerava apenas o uso do solo. Com a incorporação das bases e dos pressupostos estabelecidos pela experiência de Anderson et al. (1976) e pelo projeto Corine, o IBGE lançou, em 2006, uma segunda edição, incorporando as classes de cobertura do solo. Nessa nova proposta foi empregada a hierarquia de três níveis, sugerindo o nível I para as principais classes de cobertura em nível global, o nível II a ser implementado em escala regional (1:250.000) e o nível III que exige a incorporação de dados auxiliares para chegar à escala local (1:100.000). No ano de 2013 foi lançada a nova edição do *Manual*, com alterações apenas em relação às características das classes e nomenclaturas, com apresentação de mais detalhes para cada classe.

Tabela 4. Níveis I, II e III do sistema de classificação do IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013).

Nível I (classe)	Nível II (subclasse)	Nível III (unidades)
1. Áreas Antrópicas Não Agrícolas	1.1 Áreas Urbanizadas	1.1.1 Vilas
		1.1.2 Cidades
		1.1.3 Complexos industriais
		1.1.4 Áreas urbano-industriais
		1.1.5 Outras áreas urbanizadas
	1.2 Áreas de Mineração	1.2.1 Minerais metálicos
		1.2.2 Minerais não metálicos
2. Áreas Antrópicas Agrícolas	2.1 Culturas Temporárias	2.1.1 Graníferas e cerealíferas
		2.1.2 Bulbos, raízes e tubérculos
		2.1.3 Hortícolas e floríferas
		2.1.4 Espécies temporárias produtoras de fibras
		2.1.5 Oleaginosas temporárias
		2.1.6 Frutíferas temporárias
		2.1.7 Cana-de-açúcar
		2.1.8 Fumo
		2.1.9 Cultivos temporários diversificados
		2.1.10 Outros cultivos temporários (abóbora, trevo forrageiro etc.)
	2.2 Culturas Permanentes	2.2.1 Frutíferas permanentes
		2.2.2 Frutos secos permanentes
		2.2.3 Espécies permanentes produtoras de fibras
		2.2.4 Oleaginosas permanentes
2.2.5 Cultivos permanentes diversificados		
2.2.6 Outros cultivos permanentes		

Nível I (classe)	Nível II (subclasse)	Nível III (unidades)
2. Áreas Antrópicas Agrícolas	2.3 Pastagens	2.3.1 Pecuária de animais de grande porte
		2.3.2 Pecuária de animais de médio porte
		2.3.3 Pecuária de animais de pequeno porte
	2.4 Silvicultura	2.4.1 Reflorestamento
		2.4.2 Cultivo agroflorestal
	2.5 Uso não Identificado	2.5.1 Uso não identificado
	3. Áreas de Vegetação Natural	3.1 Área Florestal
3.1.2 Unidades de conservação de uso sustentável em área florestal		
3.1.3 Terra indígena em área florestal		
3.1.4 Outras áreas protegidas em área florestal		
3.1.5 Área militar em área florestal		
3.1.6 Extrativismo vegetal em área florestal		
3.1.7 Extrativismo animal em área florestal		
3.1.8 Uso não identificado em área florestal		
4. Água	4.2 Águas Costeiras	4.2.7 Receptor de efluentes em corpo d'água costeiro
		4.2.8 Geração de energia em corpo d'água costeiro
		4.2.9 Transporte em corpo d'água costeiro
		4.2.10 Lazer e desporto em corpo d'água costeiro
		4.2.11 Pesca extrativa artesanal em corpo d'água costeiro
		4.2.12 Pesca extrativa industrial em corpo d'água costeiro
		4.2.13 Aquicultura em corpo d'água costeiro
		4.2.14 Uso não identificado em corpo d'água costeiro
5. Outras Áreas	5.1 Áreas Descobertas	5.1.1 Unidade de conservação de proteção integral em área descoberta
		5.1.2 Unidade de conservação de uso sustentável em área descoberta
		5.1.3 Terra indígena em área descoberta
		5.1.4 Outras áreas protegidas em área descoberta
		5.1.5 Áreas militares em área descoberta
		5.1.6 Extrativismo animal em área descoberta
		5.1.7 Uso não identificado em área descoberta
		5.1.8 Uso diversificado em área descoberta
		5.1.9 Pecuária de animais de médio porte em área descoberta
		5.1.10 Pecuária de animais de pequeno porte em área descoberta

Considerando os escopos, as metodologias e os sistemas de classificação de cobertura do solo de referência internacional e nacional, na sequência é apresentada uma proposta para o mapeamento para o caso de bordas de reservatórios de usinas hidrelétricas.

3 Mapeamento da cobertura do solo para o caso de bordas de reservatórios

3.1 Procedimentos metodológicos para proposta de mapeamento integrado da cobertura do solo em bordas de reservatórios

Apresenta-se, neste item, uma proposta para o mapeamento da cobertura do solo em bordas de reservatórios. Como já é de praxis nesses mapeamentos, propõe-se como primeira etapa o emprego de imagens de satélite de sensoriamento remoto. Na referida proposta, foram utilizadas imagens referentes ao satélite alemão RapidEye, com resolução espacial de 5 metros e realizadas no ano de 2012.

No ano de 2013 o Ministério do Meio Ambiente (MMA) fez a aquisição de imagens do RapidEye referentes a todo o território nacional, para elaboração do Cadastro Ambiental Rural (CAR). A partir de 2014, tais imagens se tornaram acessíveis para órgãos públicos federais, estaduais e municipais e universidades públicas. No caso específico do presente trabalho, as imagens foram adquiridas via Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento, vinculado à Universidade Federal de Goiás (Lapig/UFG).

Como exemplos para a proposta de mapeamento da cobertura para o caso de bordas de reservatórios foram utilizados trechos das usinas hidrelétricas (UHE) de Batalha, de Itumbiara e de Furnas. A primeira e a segunda UHE localizam-se no extremo sudeste e sul de Goiás, respectivamente, na divisa com o estado de Minas Gerais, ao passo que a terceira se situa na porção sudoeste do estado de Minas Gerais – Figura 2.



Figura 2. Localização dos reservatórios de usinas hidrelétricas em estudo.
Elaboração: próprios autores.

Para facilitar o processamento digital das imagens e possibilitar uma melhor representação dos produtos cartográficos, foi utilizada apenas uma cena do satélite RapidEye, que faz contato com cada um dos reservatórios.

Sendo disponibilizadas já georreferenciadas, as imagens foram inseridas no Sistema de Informações Geográficas, especificamente no *software* ArcGIS versão 10.1. O primeiro tratamento digital consistiu na junção das bandas para a composição colorida – sendo utilizada a composição RGB-432, conforme sugerido por Silva (2015) como ideal para discriminar os diferentes tipos de cobertura do solo a partir das imagens do RapidEye.

Em seguida, por intermédio do *software* Spring versão 5.4, foram realizadas a segmentação e a classificação supervisionada das imagens de satélite, em que foram extraídas amostras para cada classe temática de cobertura do solo e aplicado o classificador Battacharya.

A definição das classes temáticas de cobertura do solo foi embasada, inicialmente, na revisão dos sistemas de classificação de referência internacional (ANDERSON et al., 1976; EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 1995) e nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013), sendo estruturada de forma hierárquica e *a posteriori*, haja vista terem sido realizadas, anteriormente, algumas visitas de campo para reconhecimento das coberturas existentes na região. Em um segundo momento, a definição foi pautada na especificidade do entorno dos reservatórios de usinas hidrelétricas, com a especificidade das coberturas que geralmente existem nessas localidades e de quais tendem a proteger, ou não, as bordas dos reservatórios contra a deflagração de processos erosivos. Dessa forma, foram empregadas as classes apresentadas na Figura 3.



Figura 3. Classes temáticas de cobertura do solo empregadas.

Elaboração: próprios autores.

A classificação da cobertura do solo por meio do tratamento de imagens de satélite teve término com a exportação do arquivo vetorial (.shp) para o *software* ArcGIS 10.1, pelo qual foram feitas edições e correção da classificação supervisionada – por vezes se pautando na comparação com imagens de maior resolução espacial disponibilizada pelo *software* Google Earth.

Além das imagens de satélite, de forma complementar, foram utilizados arquivos vetoriais provenientes de bases planimétricas cartográficas disponíveis em formato digital em escala de semidetalhe (1:100.000 a 1:250.000), a saber: de unidades de conservação; de drenagens, inseridas na classe de corpos hídricos; de malha viária; de cidades, vilas, povoados e outras localidades urbanizadas, inseridos na classe de áreas urbanizadas e; de áreas de agricultura irrigada por pivôs centrais, inseridas na classe de culturas agrícolas).

Da mesma forma, para dar indícios de quais culturas agrícolas são cultivadas nas proximidades da área em estudo, os dados de áreas plantadas em lavouras temporárias foram visualizados em cartogramas interativos por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática (Sidra/IBGE).

3.2 Exemplos do mapeamento da cobertura do solo realizado para bordas de reservatórios

Na cena selecionada para estudo de caso do reservatório de Batalha, há predomínio de cobertura natural (53,7%) com relação à antropizada (46,2%). Porém, no caso de todo o reservatório da UHE de Batalha, o predomínio passa a ser de coberturas antrópicas (55,9%) sobre as coberturas naturais. Isso indica que a cena amostrada reflete uma região com maior preservação de cobertura vegetal natural.

Dentre as coberturas naturais, o destaque reside na vegetação campestre e savânica, haja vista a proporção de 32,9% e sua distribuição por praticamente toda a área em apreço. A vegetação florestal representa apenas 6,9%, estando presente apenas em alguns fragmentos geralmente juntos à borda do reservatório, ao passo que os corpos hídricos correspondem a 13,9% - Tabela 5 e Figura 4.

Tabela 5. Quantificação da área (km²) e proporção (%) das classes de cobertura do solo do trecho do reservatório da UHE de Batalha.

Classe	Área (km ²)	Proporção (%)
Área urbanizada	0,0	0,0
Cultura agrícola	255,3	41,7
Pastagem	26,2	4,3
Silvicultura	1,4	0,2
Vegetação florestal	42,3	6,9
Vegetação campestre e savânica	201,3	32,9
Corpo hídrico	85,3	13,9
TOTAL	612	100,0

Elaboração: quantificado em SIG.

Das coberturas antrópicas, a maior proporção é para a agricultura, com 41,7% do total, ocupando vastas áreas por toda a região, inclusive sendo notada por longas extensões da borda do reservatório. Conforme apresentado pelo Sidra/IBGE, na região há grande presença de culturas temporárias de soja, milho, feijão, batata-inglesa, trigo, sorgo, sendo que, em várias localidades, tais culturas são produzidas com uso de irrigação por pivô central. As áreas ocupadas por pastagem e silvicultura são pouco significativas, não ultrapassando 4,3% e 0,2%, respectivamente, e se encontrando, na maior parte, distantes da borda do reservatório.

Vale destacar que, no trecho em destaque para o reservatório de Batalha, não foi identificada a classe de área urbanizada, o que pode ser explicado pelo fato de o reservatório da UHE

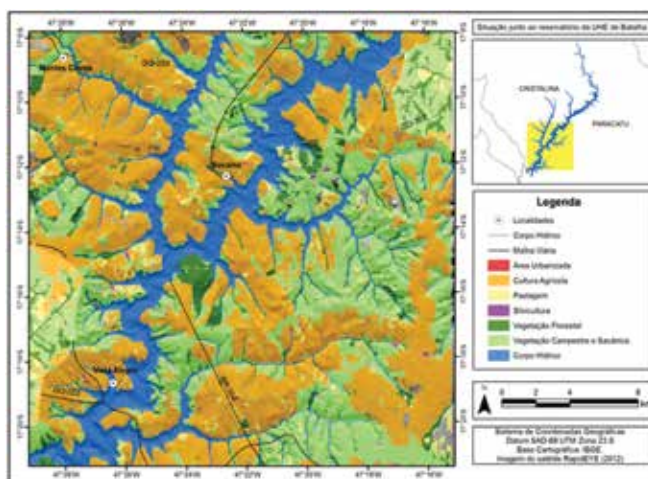


Figura 4. Mapa de cobertura do solo de um trecho do reservatório da UHE de Batalha. Elaboração: próprios autores.

de Batalha ser bastante recente, não havido, até o ano de registro das imagens de satélite utilizadas para o mapeamento (2012), a ocupação efetiva das bordas do reservatório nesse trecho, ou ter havido apenas em pequenas dimensões, não identificadas pela escala de mapeamento.

A cena apresentada como recorte amostral para a UHE de Batalha condiz com o predomínio, em todo o entorno do reservatório, de agricultura, dentre as coberturas antrópicas, e de vegetação campestre e savânica, dentre as coberturas naturais, conforme ilustrado pela Figura 5.



Figura 5. Área revestida por vegetação campestre no entorno do reservatório da UHE de batalha. Fonte: Tania Mariela Matamoros Sevilla (2014)

No caso do recorte para a UHE de Itumbiara, há também o predomínio de cobertura natural (51,4%) com relação à antropizada (48,5%), o que não é verificado quando considerado todo o reservatório, em que há o predomínio da cobertura antrópica (56,5%) em relação à natural (43,5%).

Referente às coberturas naturais, a maior proporção é de corpos hídricos (35%), haja vista a considerável largura do reservatório da UHE de Itumbiara, podendo alcançar segmentos de até 18 quilômetros – Tabela 6 e Figura 6.

Tabela 6. Quantificação da área (km²) e proporção (%) das classes de cobertura do solo do trecho do reservatório da UHE de Itumbiara.

Classe	Área (km ²)	Proporção (%)
Área urbanizada	2,4	0,4
Cultura agrícola	234,9	37,6
Pastagem	63,2	10,1
Silvicultura	2,5	0,4
Vegetação florestal	74,5	11,9
Vegetação campestre e savânica	28,4	4,5
Corpo hídrico	218,6	35,0
TOTAL	624,5	100,0

Elaboração: quantificado em SIG.

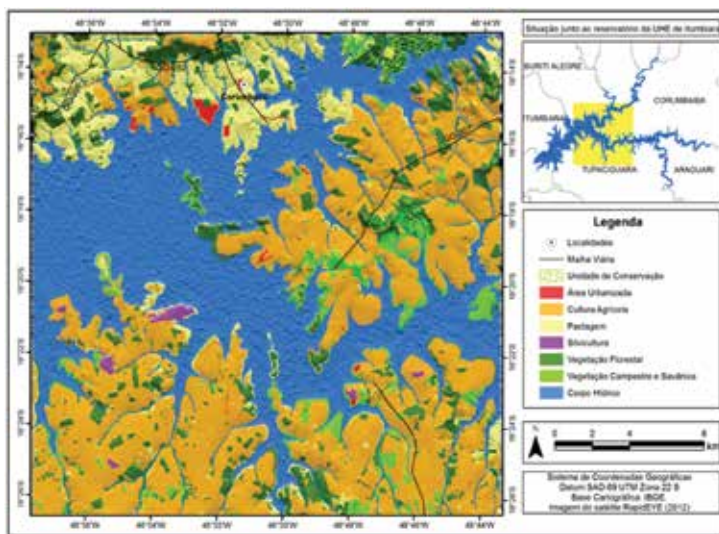


Figura 6. Mapa de cobertura do solo de um trecho do reservatório da UHE de Itumbiara. Elaboração: próprios autores.

Com relação às coberturas vegetais, as fitofisionomias florestais chegam a representar 11,9% da área mapeada. Convém destacar que a região compreende um trecho do bioma da Mata Atlântica encravado no bioma Cerrado. Inclusive uma porção da vegetação florestal situada no extremo nordeste da área mapeada compreende a unidade de conservação do Parque Estadual da Mata Atlântica. A vegetação campestre e savânica representa apenas 4,5% da área, sendo verificada em pequenos fragmentos próximos à borda do reservatório.

A agricultura tem grande presença no entorno representativo do reservatório da UHE de Itumbiara, representando 37,6% da área, ao margear uma grande extensão da borda do reservatório, enquanto a pastagem representa apenas 10,1% da região mapeada, sendo vista principalmente a noroeste, numa extensa área que parte da borda do reservatório. Porém, para o caso de todo o reservatório da UHE de Itumbiara, a cobertura antrópica predominante é a pastagem e, em segundo lugar, a agricultura.

Por sua vez, apesar da proporção de apenas 0,4%, vale destacar a presença de áreas urbanizadas nas bordas do reservatório de Itumbiara, principalmente próximas a Corumbazu, ao norte da região.

Da mesma forma que para as demais UHE, o trecho selecionado para o mapeamento de cobertura do solo no reservatório de Furnas também apresenta predomínio da cobertura natural (57,8%) com relação à antropizada (42,2%). Contudo, considerando todo o entorno do reservatório da UHE de Furnas, há inversão, sendo que a cobertura antrópica (61,4%) predomina perante a natural (38,7%).

Percebe-se uma distribuição relativamente equilibrada entre as classes de cobertura natural, haja vista a proporção de 15,2% para vegetação florestal, 20,8% para vegetação campestre e savânica e 21,8% para o corpo hídrico do reservatório – Tabela 7 e Figura 7.

Tabela 7. Quantificação da área (km²) e proporção (%) das classes de cobertura do solo do trecho do reservatório da UHE de Furnas.

Classe	Área (km ²)	Proporção (%)
Área urbanizada	4,8	0,8
Cultura agrícola	139,9	22,5
Pastagem	111,9	18,0
Silvicultura	5,6	0,9
Vegetação florestal	94,5	15,2
Vegetação campestre e savânica	128,9	20,8
Corpo hídrico	135,4	21,8
TOTAL	621,1	100

Elaboração: quantificado em SIG.

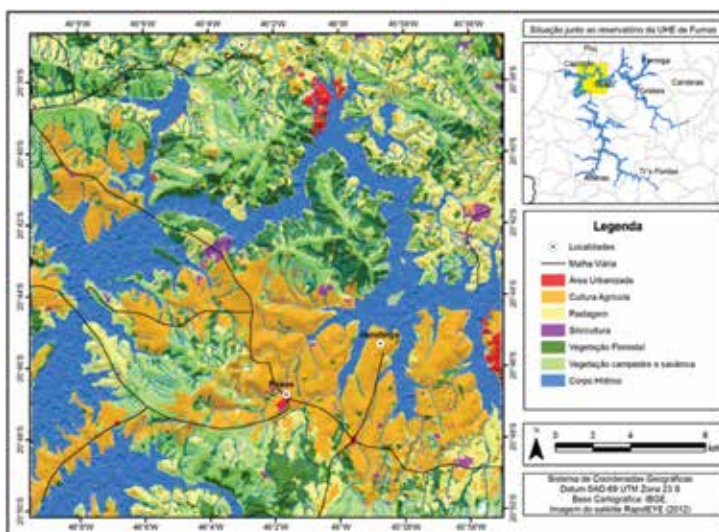


Figura 7. Mapa de cobertura do solo de um trecho do reservatório da UHE de Furnas. Elaboração: próprios autores.

Vale destacar a presença significativa de vegetação florestal no entorno da borda do reservatório na porção central da área e de vegetação campestre nas margens do reservatório ao norte e sul do trecho mapeado.

Com relação às coberturas antrópicas, é possível verificar o predomínio da agricultura (22,5%), presente ao longo de uma vasta área na porção centro-sul do trecho mapeado, inclusive compreendendo um longo trecho da borda do reservatório a sudeste. Segundo dados do Sidra/IBGE, o cultivo de milho é bastante presente na região, conforme evidenciado pela Figura 8 a seguir.



Figura 8. Cultivo de milho no entorno do reservatório de Furnas.

Fonte: Diego Tarley Ferreira Nascimento (2015).

Ainda merece destaque a área ocupada por pastagens (18%), representando a maior proporção entre as três UHE analisadas. Da mesma forma que no caso de Itumbiara, há baixa proporção areal de áreas urbanizadas nas bordas do reservatório da UHE de Furnas, com destaque para uma pequena mancha de ocupação a norte, próximo à Capitólio, e a leste do trecho mapeado.

4 Processos erosivos associados à cobertura do solo em bordas de reservatórios

A apropriação do terreno nas margens do reservatório de Batalha destaca-se principalmente pela agricultura. Como o reservatório é relativamente novo, como já citado, as feições observadas referem-se aos períodos anteriores ao enchimento do mesmo. As ocorrências das feições associaram-se aos diversos tipos de cobertura.

Nas proximidades do reservatório, em visitas de reconhecimento, observaram-se diversas causas, dentre elas, dois pontos em que a causa se associava à existência de estradas de terra, vicinais; um ponto em que a área de empréstimo foi abandonada, deflagrando no local um processo de ravinamento; dois locais cujas feições de voçorocamento tiveram sua deflagração e evolução associadas ao rompimento do dique do vertedouro de represas secundárias – Figura 9; além de outras cinco feições analisadas por Matamoros Sevilla (2016), nas quais, em uma delas, o processo parece ter-se estabilizado por causa do crescimento da vegetação natural, e, em quatro delas, o processo, que parecia existir antes da construção do reservatório, ainda não se encontra estabilizado, e cujo uso relaciona-se à agricultura em três deles, com somente uma das feições associadas ao uso por pastagens.



Figura 9. Voçoroca desenvolvida devido ao mau dimensionamento do vertedouro de uma barragem de propriedade particular próxima ao reservatório da UHE de Batalha.

Fonte: Maurício Martines Sales (2013).

No que se refere à largura/extensão dos reservatórios das UHE, o efeito de ondas foi observado na intensificação de processos erosivos hídricos e principalmente na deflagração de movimentos de massa nas bordas imediatas do reservatório, o que foi constatado principalmente no reservatório de Itumbiara, por sua largura e extensão, e no reservatório de Furnas, cuja extensão também é expressiva – Figura 10. Em ambos, o material inconsolidado suscetível também se constituiu em um condicionante da deflagração e intensificação desses processos. A forma das encostas, com declividades relativamente altas, desprovidas de vegetação natural, também contribuiu para a deflagração e intensificação da ocorrência de movimentos de massa.



Figura 10. Erosão ocasionada pelo choque das ondas do reservatório de Furnas.

Fonte: Diego Tarley Ferreira Nascimento (2015).

A conservação do solo nas margens de um reservatório está diretamente associada à sua extensão. Em grandes reservatórios, a imensa extensão do perímetro desse corpo d'água torna a tarefa de conservação da cobertura do solo quase impossível. Dessa forma, a cobertura dos solos lindeiros ao reservatório fica exposta às ações antrópicas e naturais, que podem favorecer o aparecimento de processos erosivos.

Em pequenos reservatórios, o processo de implantação dos mesmos vem quase sempre associado à limpeza de suas margens. Se a retirada da vegetação natural não vier acompanhada da reposição de cobertura apropriada ao solo, o surgimento de ravinas e voçorocas torna-se bastante provável, dado o afluxo natural das águas que migram em direção ao reservatório.

Nos grandes reservatórios, como os de UHEs, o problema é ainda mais complexo. Normalmente não se faz a limpeza completa do contorno dos reservatórios, deixando-se sempre alguma forma de cobertura. Entretanto, a operação desses reservatórios traz problemas específicos, tais como:

- Instabilização das bordas por saturação (movimento de massa);
- Ação de ondas nas bordas;
- Rebaixamento temporário do reservatório;
- Ações antrópicas.

Os dois primeiros tópicos foram abordados e bem ilustrados em outros capítulos deste livro, e a seguir serão exemplificados os dois últimos itens.

4.1 Rebaixamento temporário do reservatório

A variabilidade do volume anual das chuvas e a operação interligada das UHEs brasileiras resultam na necessidade de geração de energia que, em alguns anos, consome um volume maior do que o aporte daquele ano, o que provoca o rebaixamento dos reservatórios. Esse rebaixamento deixará exposto o solo ao longo do perímetro do reservatório, uma vez que a vegetação que existia antes do primeiro enchimento não resiste à presença de água.

As Figuras 11 e 12 ilustram a borda dos reservatórios de Itumbiara e de Furnas em ano de cota baixa do reservatório. Dependendo do número de meses em que essa faixa de solo fica exposta, apenas uma vegetação rasteira pode ressurgir, mas não recompondo a cobertura preexistente do solo. Descidas naturais de águas pluviais resultantes do entalhe da topografia da região podem dar início a processos erosivos que devem ser monitorados. Nessa região de solo desprotegido, a presença da criação de gado pode acentuar significativamente o processo erosivo pelo pisoteamento do solo úmido.



Figura 11. Vista da margem exposta na UHE de Itumbiara, com sinais de erosão em descida d'água.
Fonte: Diego Tarley Ferreira Nascimento (2015).



Figura 12. Margem exposta após rebaixamento da UHE de Furnas, com sinais de início de ravinamento. Fonte: Maurício Martines Sales (2015).

4.2 Ocupação das margens de reservatório

A formação de um novo lago ou reservatório cria um cenário bonito e atraente para o ser humano. Novas atividades, como pesca, recreação, esporte etc., surgem como atrações do novo reservatório, e acabam sempre resultando na ocupação de áreas próximas a ele. Se essa ocupação não for feita adequadamente poderá se tornar como mais um vetor de indução de processos erosivos.

A ocupação das áreas lindeiras aos reservatórios altera a cobertura dos solos da região. A abertura de estradas de acesso, impermeabilização do solo e lançamento inadequado são alguns dos principais fatores que resultam no acúmulo de águas de chuva que passam a caminhar em direção ao reservatório com maior energia e podem resultar em ravinas e voçorocas.

Apresenta-se, a seguir, um exemplo de um condomínio particular de casas de veraneio construídas às margens do reservatório de Itumbiara. Foram abertas e asfaltadas ruas na direção do desnível topográfico e que contava com a coleta de água pluvial. Entretanto, o volume coletado foi lançado em direção ao lago sem nenhuma estrutura de dissipação de energia e acabou resultando no aparecimento de uma ravina. A Figura 13 mostra a pavimentação e coleta da água pluvial, a Figura 14A o lançamento sem nenhum controle da água coletada e a Figura 14B o estrago causado por esse lançamento.



Figura 13. Ocupação em condomínio próximo ao reservatório da UHE de Itumbiara. Fonte: Diego Tarley Ferreira Nascimento (2014).



Figura 14. Lançamento das águas pluviais (A); erosão causada pelo mesmo (B).
Fonte: Maurício Martines Sales (2014).

Note que o fluxo de água escavou o material sedimentar que havia no fundo do lago (material mais granular na parte direita da foto) e já está erodindo o solo natural do local. A Figura 15 apresenta a mancha contínua resultante dos sedimentos transportados para o lago, mesmo em dias sem chuva.



Figura 15. Mancha com sedimentos carregados para o reservatório de UHE Itumbiara.
Fonte: Maurício Martines Sales (2014).

Logo, é possível destacar a importância de ações de controle e prevenção, das quais algumas já foram iniciadas, como o emprego de entrocamento de pedras (Figura 16A) dispostas ao longo de uma erosão a fim de barrar o processo de erosão laminar e a implantação de colchão reno (Figura 16B) para barrar o avanço de erosão devido ao mau dimensionamento do vertedouro de uma barragem de propriedade particular próxima ao reservatório de Batalha; e a proteção da vertente com manta geossintética e capim-vetiver (Figura 17A) e colchão reno (Figura 17B), junto ao entorno do reservatório de Furnas.



Figura 16. Entrocamento de pedras (A) e colchão reno (B) no entorno da UHE de Batalha.
Fonte: Maurício Martines Sales (2013).



Figura 17. Proteção de vertente com geossintético e capim-vetiver (A) e com colchão de reno (B) na borda do reservatório de Furnas.

Fonte: Diego Tarley Ferreira Nascimento (2015).

5 Considerações finais

O mapeamento e a análise da cobertura do solo nas bordas dos reservatórios precisam ser realizados perante a influência que o reservatório infere à ocupação e à apropriação dessa região. Se, por um lado, as áreas agrícolas e pastoris se fazem presentes conforme a fertilidade dos solos, a adequação da topografia e a disponibilidade de recursos hídricos, o reservatório de água implementado para geração de energia elétrica acarreta um considerável potencial turístico para fins de pesca e outras atividades esportivas, tais quais as que façam uso de embarcações motorizadas (lanchas, *jet ski*, canoas etc.) e não motorizadas (caiaques, canoas etc.).

Contudo, há pouca ocupação urbana no entorno dos reservatórios, devido ao predomínio de acessos viários não pavimentados e pouco fornecimento de serviços de infraestrutura – geralmente havendo apenas energia elétrica. A exceção fica por conta de vilas e povoados ou de cidades preexistentes, além de propriedades rurais geralmente utilizadas para passeios aos fins de semana e feriados.

O que se nota nas cenas retratadas no presente capítulo como recorte amostral das UHEs de Batalha, Itumbiara e Furnas é que (ainda) há o predomínio da cobertura vegetal natural com relação às coberturas antrópicas. Contudo, ao se considerar o entorno dos reservatórios como um todo, o cenário é o inverso, havendo predomínio da cobertura antrópica sobre as naturais, principalmente para o caso do reservatório de Furnas, em que o antropismo é de 61,4% em comparação com a presença de cobertura vegetal natural em apenas 38,7% de sua área.

Ao final deste capítulo, vale ressaltar que a cobertura do solo referente à presença de cobertura vegetal natural ou antrópica consiste em um dos condicionantes dos processos erosivos hídricos relacionados ao potencial erosivo, considerando que o terreno possui determinada suscetibilidade aos processos erosivos, a qual pode ser intensificada, de acordo com a interferência antrópica (SALOMÃO; CANIL; RODRIGUES, 2012).

Referências

- ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T.; WITMER, R. E. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *Geological Survey Professional Paper*, n. 964. Washington: USGS, 1976.
- ARAÚJO FILHO, M. da C.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Sistema de classificação de uso e cobertura da terra com base na análise de imagens de satélite. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 59, v. 2, p. 171-181, ago. 2007.
- BOGGIONE, G. de A.; SILVA, M. V. A. da.; CARVALHO JÚNIOR, N. R. de.; TELES, T. L.; NAZARENO, N. R. X. de. Definição da escala em imagens de sensoriamento remoto: uma abordagem alternativa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., Natal. *Anais...* Natal: INPE, 2009. p. 1739-1746.
- DI GREGORIO, A.; JANSEN, L. J. M. *Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual for Software*. Rome: FAO, 2000. 157 p.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. *Corine land cover*. Brussels: EEA, 1995. Disponível em: < <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>>. Acesso em: 13 jan. 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico de uso da terra. 3. ed. *Manuais Técnicos em Geociências*, Rio de Janeiro, IBGE, n. 7, 2013.
- MATAMOROS SEVILLA, T. M. *Estudo de processos erosivos: análise geotécnica de áreas degradadas no entorno do reservatório de Batalha GO/MG*. 2016. 134 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- MONTEIRO, C. L. S. *Proposta de classificação do uso e da cobertura da terra e sua representação cartográfica na escala 1:10.000*. 2008. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- PRADO, F. de A. *Sistema hierárquico de classificação para mapeamento da cobertura da terra nas escalas regional e urbana*. 2009. 168 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2009.
- SALOMÃO, F. X.; CANIL, K.; RODRIGUES, S. P. Exemplo de aplicação da geologia de engenharia no controle preventivo e corretivo dos processos erosivos. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 2, n. 2, 2012.
- SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. *Mapeamento de cobertura vegetal do Bioma Cerrado: estratégias e resultados*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007.
- SANTOS, M. *A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção*. São Paulo: Hucitec, 1996.
- SILVA, L. da R. Análise das imagens do satélite RapidEye para discriminação de classes de cobertura vegetal do Cerrado. 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

CAPÍTULO 16

Erosão continental, costeira e de bordas de reservatórios

Olavo Francisco dos Santos Jr.
Oswaldo de Freitas Neto
José Camapum de Carvalho
Maurício Martines Sales
Luis Edmundo Prado de Campos
Ada Cristina Scudelari
Ricardo Nascimento Flores Severo

Palavras-chave: Movimentos de massas. Erosão pluvial. Erosão costeira. Erosão em reservatórios.

1 Introdução

A modelagem do relevo terrestre está associada a processos endógenos e exógenos. Os processos endógenos estão relacionados a fenômenos derivados da geodinâmica interna da Terra, tais como fenômenos magmáticos, metamórficos e tectônicos, que podem provocar a elevação, o arqueamento ou depressões em regiões da crosta. Os processos exógenos se referem a fenômenos que atuam na superfície ou próximos dela.

Os processos exógenos estão diretamente ligados aos processos erosivos que atuam na superfície dando forma ao relevo. Segundo Camapum de Carvalho et al. (2006), as erosões podem ser classificadas de acordo com o fator deflagrador em quatro grandes grupos: hídrica, quando o fator ativo é a água; eólica, provocada pelos ventos; glacial, que tem como agente a ação de geleiras; e organogênica, associada a organismos, tais como plantas e animais.

Este capítulo trata da erosão hídrica, a qual pode ser resultante de processos continentais e marinhos. Nos processos continentais estão incluídas as erosões pluviais (provocadas pela água de chuva), os movimentos gravitacionais de massas em encostas, as erosões fluviais (provocadas por cursos de água) e as erosões de margens de reservatórios. As ações marinhas resultam na erosão das bordas dos continentes, denominada de erosão costeira. Tanto nas erosões continentais quanto nas costeiras ainda se insere como mecanismo erosivo ou deflagrador de processos erosivos os fluxos de água no interior dos maciços, que podem atuar segundo dois mecanismos distintos: gerando o fenômeno de erosão interna conhecido como tubificação ou *piping* e dando origem, por meio do carreamento de compostos químicos solubilizados ou de partículas finas, ao fenômeno da eluviação ou esqueletização do maciço. Esse último mecanismo, além de constituir-se em si num processo erosivo, contribui para a instabilização de taludes naturais e de corte, propiciando o surgimento de ravinas e voçorocas.

A erosão hídrica atinge com graves consequências socioambientais e econômicas áreas continentais, cursos d'água e orlas de reservatórios e marítimas. Ela pode integrar um proces-

so natural de modelagem do relevo continental, de alteração da linha de costa marítima, de alteração da área inundada do reservatório e de modificação dos cursos fluviais, sendo que neste capítulo se enfatizará aquelas de origem antrópica, seja por ação direta, seja por ação indireta do homem.

O capítulo busca discutir alguns dos principais fatores responsáveis pelo surgimento e evolução de erosões provenientes de ação hídrica em áreas continentais, em cursos d'água, em bordas de reservatórios e em áreas costeiras, de modo a aperfeiçoar a utilização de conhecimentos e experiências geradas nesses cenários.

2 Erosão hídrica: ocorrências e impactos gerados

Em áreas rurais, embora ocorra grande incidência de erosões dos tipos ravina e voçoroca, a erosão laminar merece destaque por estabelecer o processo de desertificação, ampliando o custo de produção e reduzindo drasticamente a vida útil de áreas agricultáveis. A Figura 1 ilustra erosões concentradas no bordo de uma área de cultivo, apesar de a faixa de preservação margear a área de plantio. Constata-se na área a presença de antigas feições de processos erosivos. Junto a áreas urbanas as erosões pioram a qualidade de vida, colocam em risco a população e geram grandes prejuízos econômicos, como ilustra a Figura 2.

Nos cursos d'água os principais impactos ambientais ligados à erosão são o assoreamento por sedimentos erodidos a montante e a erosão de margem, ocasionada seja pelo excessivo volume de água captado pelo leito em consequência de alterações hidrológicas por impermeabilizações em áreas urbanas e alterações de cobertura em áreas rurais, seja pelo modo e condições como se dá o lançamento concentrado dos sistemas de drenagem. Também a qualidade da água pode intervir no processo erosivo.

Os sedimentos que assoreiam os cursos d'água são, quando provenientes do meio rural, oriundos do uso de técnicas de manejo inapropriadas e da falta de preservação da vegetação natural de margem.

Quando gerados em meio urbano, os sedimentos são fruto da falta de planejamento na ocupação e uso do solo. A erosão, por sua vez, está quase sempre associada a lançamentos inapropriados de sistemas de drenagem que podem ser mal localizados, mal concebidos e ainda lançarem volume de água maior do que aquele que o leito natural pode suportar (Figura 3).



Figura 1. Estado de Goiás, próximo à Rodovia GO-118. (Foto: José Camapum de Carvalho)..



Figura 2. Erosão em Planaltina de Goiás. (Foto: José Camapum de Carvalho).

A erosão fluvial pode ainda ser oriunda de intervenções antrópicas que propiciam mudança nas condições de fluxo natural. A Figura 4 ilustra a ocorrência de erosão na margem do Rio Araguaia.

Os reservatórios passam por dois tipos de fatores desencadeadores de processos erosivos: a falta de proteção das margens com lançamentos de água e uso inapropriado do solo, e a deflagração de processos erosivos devido às novas condições ambientais a que são submetidos os solos circunvizinhos, instabilizando encostas e possibilitando gerar erosões.



Figura 3. Erosão no Riacho Fundo, Distrito Federal. (Foto: José Camapum de Carvalho).



Figura 4. Erosão na margem direita do Rio Araguaia. (Foto: José Camapum de Carvalho).

No caso dos reservatórios, além das ondas formadas naturalmente por efeito do vento, ainda podem atuar no processo evolutivo das erosões as ondas provenientes de embarcações. A Figura 5 ilustra uma erosão de margem no reservatório de Itumbiara.

As erosões costeiras podem ser deflagradas por alterações nas características hidrodinâmicas do fluxo (ondas e correntes) devido a obras costeiras (como cais, portos, espigões, molhes, aterros hidráulicos), pela elevação do nível médio do mar ou, ainda, por alterações na composição química e na temperatura das águas marinhas. Também no caso dessas erosões deve-se ainda considerar como elemento desencadeador ou propiciador de sua evolução o movimento de embarcações. Em áreas costeiras é preciso atentar igualmente para a ocorrência de processos essencialmente continentais, como erosão e movimentos de massas, não só por atingirem o ambiente natural, como também por comprometerem o potencial turístico e a qualidade de vida das pessoas que habitam a região. A Figura 6 ilustra uma erosão costeira em Morro de São Paulo, Bahia.



Figura 5. Erosão na margem do reservatório de Itumbiara. (Foto: Maurício Martines Sales).



Figura 6. Erosão em Morro de São Paulo, Bahia. (Foto: José Camapum de Carvalho).

As imagens mostradas nas Figuras 1 a 6 apresentam erosões visualmente diferentes. Não se pode, contudo, afirmar que elas foram necessariamente provocadas e estão evoluindo

a partir de fatores distintos. A seguir busca-se então discutir alguns dos principais fatores responsáveis pelo surgimento e evolução de erosões provenientes de ação hídrica em áreas continentais, em cursos d'água, em bordos de reservatórios e em áreas costeiras, de modo a aperfeiçoar a utilização de conhecimentos e experiências geradas nesses cenários.

3 Erosão hídrica – estrutura conceitual

3.1 Fatores *disponentes e predisponentes*

Admite-se aqui uma estrutura conceitual, segundo a qual todo processo erosivo hídrico, seja continental ou marinho, resulta de um desequilíbrio de energia entre a energia erosiva (erosividade) e aquela resistente à erosão (erodibilidade) (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2014). Na condição em que a energia erosiva é inferior à resistente, não ocorre erosão. Caso contrário, o processo erosivo será deflagrado.

Essas energias (erosiva e resistente) são condicionadas por fatores disponentes e predisponentes. Os fatores disponentes correspondem internamente à própria existência do maciço e externamente à presença da água e à atuação do clima, embora a água possa ser vista também como fator disponente interno quando parte integrante do maciço, por exemplo, ao compor a estrutura de um mineral.

Os fatores predisponentes podem ser divididos em duas categorias, os intrínsecos e os extrínsecos. Os intrínsecos são aqueles que integram o ambiente natural, e os extrínsecos, por sua vez, são aqueles que estão sendo ou foram introduzidos no sistema. Os fatores predisponentes intrínsecos e extrínsecos podem se situar interna e externamente aos maciços.

Os fatores predisponentes intrínsecos e internos ao maciço são aqueles relacionados a características como composição químico-mineralógica, geologia estrutural no caso de rochas e saprólitos e estrutura no caso de solos saprolíticos e solos intemperizados, hidrogeologia, variações naturais do nível freático e da qualidade da água, morfologia do terreno (inclinação e comprimento do talude e forma do relevo) e cobertura natural do maciço.

Os fatores predisponentes intrínsecos e externos ao maciço são aqueles relacionados a características como clima, presença contínua ou repetitiva de fluxo ou ondas, velocidade do umedecimento do solo, possibilitando ou não a saída do ar, velocidade, direção, duração e umidade dos ventos, período e orientação da insolação, umidade relativa, intensidade e gradiente térmico.

São exemplos de fatores predisponentes extrínsecos e internos ao maciço o fluxo oriundo de bacias de infiltração e a alteração da qualidade da água subterrânea por meio do uso agrícola do solo ou da implantação de lagoas de estabilização, fossas e sumidouros. No primeiro exemplo ocorre uma ação mecânica da água capaz de gerar o fenômeno da erosão interna, e no segundo a ação seria predominantemente química, podendo gerar o fenômeno da eluviação ou esqueletização do maciço ou ainda contribuir para o surgimento e evolução da erosão interna.

São exemplos de fatores predisponentes extrínsecos e externos ao maciço os relacionados ao uso e à ocupação do espaço, à construção de obras fluviais, marítimas e portuárias, alterando as características das correntes e os relativos às alterações climáticas suscetíveis de

proporcionar mudanças na interação maciço-atmosfera e no volume e nas características das precipitações. Exemplificam alterações no uso e na ocupação do espaço as impermeabilizações em ambiente continental, gerando a ampliação do fluxo em área externa à impermeabilizada, e o lançamento de emissários em cursos d'água, em reservatórios e em oceanos, mudando as propriedades químicas e temperatura da água, além dos efeitos da energia oriunda do próprio lançamento.

Os fatores disponentes e predisponentes se fazem ou podem fazer-se presentes no desencadeamento e na evolução das erosões continentais (pluviais, fluviais e de reservatórios) e marinhas (costeiras).

3.2 Desencadeamento de processos erosivos

Os fatores disponentes e predisponentes geralmente conduzem em longo prazo ao desencadeamento de erosões naturais conhecidas como erosões geológicas. A Figura 1 mostra feições desse tipo de erosão que ocorreu em época pretérita.

A existência desses fatores aponta, no entanto, para a possibilidade de desencadeamento de processos erosivos como consequência direta ou indireta de ações antrópicas, conforme exemplificado na própria Figura 1, daí serem comumente intituladas erosões antrópicas. Neste item são discutidas as causas das erosões antrópicas.

Quando o surgimento da erosão se deve a ações antrópicas indiretas, não raro se considera sua ocorrência como natural. Por exemplo, o aumento das precipitações em função do aumento da temperatura ocasionado pela ocupação e uso inadequado do espaço urbano, conforme mostrado por Luiz (2012) para a cidade de Goiânia, pode ocasionar o surgimento de erosões. Mas essas erosões, apesar de ocorrerem devido ao aumento das precipitações, que é um fenômeno da natureza, devem ser vistas como de origem antrópica.

A erosão pluvial se dá nas formas laminar, de sulcos, ravinas e voçorocas, sendo que as ravinas e voçorocas podem assumir forma linear ou de anfiteatro e são quase sempre condicionadas pela presença de manto de intemperismo e/ou pela geologia estrutural. Mortari (1994) mostrou ser o modelo encaixado das ravinas e voçorocas do Distrito Federal condicionado pela geologia estrutural. Já Lima (1999) comprovou que a forma de anfiteatro presente em erosões de Manaus era igualmente condicionada pela geologia estrutural local.

A erosão laminar se deve ao fluxo difuso e aquelas em forma de sulco, ravina ou voçoroca são originadas por sua concentração, destacando-se que, no caso das voçorocas e mais raramente no caso de ravinas, atuam concentrações de fluxo interno e externo ao maciço. Nas ravinas, esses fluxos concentrados se originam quase sempre da implantação de bacias de retenção e infiltração a montante de erosões preexistentes ou próximo a vertentes naturais e cortes. Destaca-se ainda que os processos de ravinamento e voçorocamento podem ter origem em rupturas de taludes ou na simples exploração de jazidas junto às vertentes naturais, como ilustra a imagem da Figura 7, cuja erosão se originou em uma antiga jazida utilizada na construção da Rodovia BR-060.

Em ambiente continental, o maciço pode ser naturalmente predisponente à ocorrência de erosão laminar; no entanto, essa predisponência quase sempre tem origem antrópica. Tanto na área rural como na urbana a técnica de manejo inapropriada é quase sempre a principal



Figura 7. Erosão gerada em área de empréstimo junto à BR-060. Foto: 21 ago. 2016. (Foto: José Camapum de Carvalho).

responsável pela ocorrência desse tipo de erosão. Na área rural assumem importância o uso de insumos agrícolas instabilizadores da estrutura do solo e o próprio modo como o solo é preparado para o cultivo. Na área urbana tem-se a remoção indiscriminada da cobertura vegetal. A ocupação do espaço urbano deveria se dar de forma planejada e progressiva para se evitar esse tipo de impacto ambiental. A erosão laminar pode ainda ocorrer de forma antrópica nos leitos dos cursos d'água em consequência, por exemplo, da alteração das propriedades da água.

A erosão laminar também pode ocorrer na orla marítima e de reservatórios, agora provocada pela atuação das ondas e do uso e ocupação de modo inapropriado dos solos das margens. Nesse caso, simples alterações de temperatura e qualidade do fluido podem propiciar o desencadeamento do processo. Também podem atuar no desencadeamento dessas erosões alterações nas características das correntes de água. Na orla marítima, esse tipo de erosão pode conduzir ao desaparecimento de praias, comprometendo o potencial turístico e a qualidade de vida dos habitantes da área.

O que gera a erosão laminar é a ruptura do equilíbrio entre a energia resistente e a erosiva devido à atuação da força trativa da água. O salpico gerado pelo impacto das gotas de chuva na superfície do maciço não protegido é um mecanismo auxiliar na ocorrência da erosão laminar, pois auxilia no desprendimento das partículas. Outro mecanismo diz respeito ao surgimento de pressão positiva na fase ar presente no solo, sendo esta função da sucção/capilaridade inicial e da própria intensidade e duração da chuva que interfere no modo como se dá a inundação e saturação do solo. Essa pressão positiva na fase ar gerada pela infiltração da água da chuva sob efeito da sucção termina auxiliando no processo de desagregação e desprendimento das partículas de solo.

Os sulcos, ravinas e voçorocas se devem ao fluxo concentrado da água, sendo os sulcos incisões de pequeno porte. As ravinas e voçorocas geralmente recebem essas designações respectivamente em função de a erosão atingir ou não o lençol freático, não se associando assim diretamente ao tamanho da erosão (comprimento, largura e profundidade). Portanto, essas erosões, sulcos, ravinas e voçorocas, quando continentais, ocorrem em consequência da concentração do fluxo superficial da água, sendo o processo, no caso das voçorocas, auxiliado pelo fluxo subterrâneo.

Na orla dos reservatórios e na orla marinha, esses tipos de erosão tendem a assumir a condição de voçoroca, pois na maioria dos casos ocorre a saturação do maciço na área afetada pela erosão a partir do contato com a lâmina d'água (Figura 8). No entanto, a situação de ravina pode prevalecer em grande parte da erosão, como mostra a Figura 9.

Nos cursos d'água as erosões são comumente deflagradas pelo lançamento inapropriado de sistemas de drenagem, por alterações na qualidade da água, pelo aumento da vazão e por intervenções no curso d'água natural.



Figura 8. Erosão de margem de reservatório.
(Foto: Maurício Martines Sales).



Figura 9. Erosão de margem do reservatório.
(Foto: Maurício Martines Sales).

No caso dos reservatórios, a deflagração das erosões pode se dar no momento do seu enchimento devido à redução da resistência do material que compõe o maciço em contato com a lâmina d'água, assim como devido à redução das tensões efetivas na zona saturada. As rupturas dos taludes, deflagradoras da erosão, quase sempre não são imediatas, pois requerem a infiltração da água e estão ligadas ao enchimento do reservatório, que se dá de forma progressiva. Após o enchimento do reservatório, o processo erosivo é passível de continuar, em função não só do avanço da frente de saturação do maciço, como também do efeito das ondas. Após entrar em regime de funcionamento, esvaziamentos do reservatório também podem ser indutores de processos erosivos, sendo que os rápidos podem gerar condições de fluxo instabilizadoras dos taludes. No caso de esvaziamento lento, os ciclos de esvaziamento-enchimento podem conduzir à eluviação ou esqueletização do maciço. Essas são erosões dependentes diretamente do reservatório, mas podem ainda ocorrer erosões provocadas pelo uso do solo no entorno do reservatório.

4 Processos continentais

4.1 Erosão laminar, sulcos, ravinas e voçorocas

Geralmente considera-se que a erosão hídrica atua em dois domínios: o superficial e o interno. O superficial é geralmente atribuído ao desequilíbrio de energia entre a energia erosiva (erosividade) e a resistente à erosão (erodibilidade). No caso da erosão pluvial, a energia erosiva é afetada, dentre outros fatores, pela espessura e velocidade da lâmina d'água, além de características e propriedades da água, inclusive temperatura e volume de sedimentos em suspensão, cobertura do solo e declividade e comprimento da superfície de escoamento. Já a energia resistente será dependente de fatores como composição químico-mineralógica do solo, estado estrutural do solo, gradiente térmico no perfil e sucção.

No domínio interno, a erosão também ocorre em função do desequilíbrio entre a energia erosiva e a resistente. No entanto, deve-se aqui ter uma percepção mais ampla do fenômeno, pois além do simples arraste de partículas, faz-se necessário atentar também para a possibilidade de dissolução de compostos químicos ou alteração de forças pelo aporte químico.

A erosão interna pode se dar de modo concentrado ou difuso. Para que a erosão interna ocorra, faz-se necessário que a matriz grossa não seja filtro da fina ou que parte dos constituintes do maciço seja solubilizada e carregada.

Na ocorrência concentrada, fisicamente o gradiente hidráulico é a energia erosiva causadora da erosão interna, e a resistência estrutural do solo constitui a energia resistente. Quimicamente, elementos e compostos químicos conduzidos pela água podem intervir nas forças de atração e de repulsão entre partículas, possibilitando o arraste daquelas mais finas que se desprendem. Nessa forma de erosão concentrada, são formadas tubificações no maciço que passam a constituir caminhos preferenciais para a água e tendem a se ampliar em diâmetro e comprimento e avançar para o interior do maciço ao longo do tempo. O mais comum é que essa forma de erosão interna ocorra abaixo do nível freático em consequência do seu rebaixamento junto ao leito da erosão, aumentando o gradiente hidráulico, embora também possa ocorrer, conforme já colocado, a partir de bacias de retenção e infiltração localizadas a montante.

Quando a erosão interna se dá por dissolução de compostos químicos, o mais comum é que o processo erosivo ocorra de modo difuso, dando origem ao fenômeno da eluviação ou esqueletização do maciço, conforme mostrado por Lima (2003) ao estudar erosões continentais do Distrito Federal. Esse tipo de degradação estrutural do maciço pode se dar tanto em meio saturado como em meio não saturado. Qualquer que seja a forma como ocorre a erosão interna, ela geralmente atua favorecendo a evolução do processo erosivo externo por meio da instabilização do maciço.

Além desses mecanismos externos e internos que atuam desencadeando e ajudando na evolução das erosões, cabe ainda enfatizar a importância do solapamento da base dos taludes em terrenos naturais ou já submetidos à erosão.

Por si só, o solapamento é um tipo de erosão a partir da superfície de escoamento no caso de cursos d'água e no interior de ravinas e voçorocas, ou tem origem no impacto de ondas em orlas de reservatórios e marítimas. Ele ocorre de modo concentrado e amplia o risco de ruptura do talude, merecendo o destaque dado aqui. Santos (1997) realçou sua importância ao estudar erosões continentais em Goiânia.

4.2 *Movimentos de massas em encostas*

Os movimentos gravitacionais de massas que ocorrem em encostas também se constituem em processos continentais. Diferem dos processos erosivos por se tratarem de movimentos coletivos de solo ou rocha, ou seja, a massa se desloca como um todo, enquanto na erosão propriamente dita as partículas do solo sofrem o destacamento e o transporte de maneira individual, embora possa abranger um grande volume. Convém destacar que, em casos como o das voçorocas, a própria evolução do processo erosivo se dá pela ocorrência de movimentos de massas nos taludes laterais e que os movimentos gravitacionais de massa podem desencadear processos erosivos em consequência do solo exposto e/ou da formação de canais preferenciais de fluxo.

Há várias formas de se classificar os movimentos de massas e, em função disso, vários sistemas de classificação foram propostos. Um dos mais difundidos e utilizados sistemas de

classificação de movimentos de massas em encostas foi proposto por Varnes em 1958. Posteriormente, Varnes (1978) introduziu algumas modificações na forma inicial, porém manteve a mesma estrutura. O critério principal usado na classificação é o tipo de movimento e, de forma secundária, o tipo de material envolvido. Uma nova atualização desse sistema foi feita recentemente por Hungr et al. (2014).

De acordo com Varnes (1978), os movimentos são classificados em cinco grupos: quedas, tombamentos, deslizamentos, ruptura por espraiamento lateral progressivo e escoamento. Quando o movimento envolver mais de um tipo mencionado anteriormente, Varnes (1978) classifica o movimento como complexo. Os materiais envolvidos no movimento são divididos em três classes: rocha, solo e detritos (misturas de solo e blocos de rochas). Ampliando o conceito de movimento de massa em encostas para abranger locais de deposição de resíduos sólidos urbanos e resíduos de mineração, poder-se-á pensar em uma quarta classe, a dos resíduos, servindo como exemplo a recente ruptura ocorrida no município de Santos, estado de São Paulo. Na atualização proposta por Hugn et al. (2014), aos tipos básicos de movimentos foi acrescido mais um: deformação em taludes. Propuseram também a substituição do termo “complexo” para os movimentos que envolvam mais de um tipo, pela explicitação dos movimentos que de fato ocorreram, por exemplo, deslizamento-escoamento.

No Brasil, tem sido largamente empregado o sistema proposto por Guidicini e Nieble (1984), o qual é baseado no sistema proposto por Freire em 1965. Os movimentos são divididos em três grupos: escoamentos, escorregamentos e subsidências. Esses grupos são subdivididos em sete grupos fundamentais, permitindo a diferenciação de 32 tipos de movimentos.

De maneira geral, os tipos de movimentos básicos são: quedas, tombamentos, deslizamentos e escoamentos. Apresentam-se a seguir a descrição desses tipos básicos.

i) Quedas e tombamentos

O movimento classificado como queda consiste na separação de uma determinada porção de material da encosta, seguida de queda livre e acúmulo no pé da encosta. O depósito formado pode atingir vários metros de espessura, dependendo da morfologia da área de acúmulo. Por outro lado, a morfologia da encosta condiciona a distância percorrida pelo material em movimento. Em algumas situações os blocos podem atingir longas distâncias. A maioria das quedas se desenvolve a partir de superfícies de descontinuidades no maciço, as quais podem ser de origem tectônica ou sedimentar. Uma fratura no interior de um maciço rochoso pode dar início, após uma fase inicial de expansão lateral, a uma queda de bloco. Nesses casos, a pressão exercida pela água que preenche as fraturas pode contribuir bastante para a ocorrência da instabilização.

Os tombamentos consistem na rotação de uma massa ou de vários blocos em torno de um ponto. Atuam no sentido da instabilização, da força da gravidade e das pressões dos fluidos que preenchem as descontinuidades.

ii) Deslizamentos

Os deslizamentos se caracterizam pela formação de uma superfície de ruptura bem definida, onde há uma concentração de deformações cisalhantes. Os deslizamentos podem ser rotacionais ou translacionais, dependendo da forma da superfície de deslizamento, su-

perfície esta geralmente condicionada pela estrutura do material do maciço e/ou declividade do talude.

Nos deslizamentos rotacionais, uma parte do material que forma o talude desliza como um todo ao longo de uma superfície de ruptura bem definida que apresenta forma côncava. Geralmente são profundos e ocorrem principalmente em solos argilosos homogêneos com comportamento isotrópico. Em argilas moles, a superfície de ruptura é muito próxima daquela de um arco de círculo.

Quando o material não é uniforme e/ou apresenta comportamento anisotrópico, a superfície de ruptura raramente é circular, uma vez que sua forma é afetada por planos de estratificação, juntas, falhas e outras descontinuidades ou estruturas geológicas. Uma superfície de ruptura não circular provoca distorção na massa em movimento.

Os deslizamentos translacionais ocorrem ao longo de planos de estratificação, falhas, fraturas ou contatos geológicos que se apresentam aproximadamente paralelos à superfície do talude ou com inclinação em direção a ele. Nessas condições, o movimento da massa que desliza é essencialmente de translação.

Em grande parte dos casos, os deslizamentos translacionais ocorrem devido a elevadas poropressões ao longo da superfície de ruptura. No entanto, eles podem também ser oriundos de degradação do maciço em planos preferenciais de ruptura ou ocorrerem devido a atuações de diferentes formas de energia, tais como: vibração, sobrecarga, cortes e alterações no estado de tensões, caso que converge com as rupturas devidas ao aumento das pressões neutras, pois caso essa seja isotrópica e o valor de k_a e/ou k_o do solo venha a ser diferente de 1, a alteração na pressão neutra afeta o estado de tensões no sentido da ocorrência da ruptura.

Existe uma diferença fundamental no que diz respeito ao sistema de forças atuantes, entre rupturas rotacionais e translacionais. Nos deslizamentos rotacionais, o sistema de forças que inicia a instabilização diminui de intensidade com o aumento das deformações. Isso se verifica em função do tombamento da parte posterior da massa que desliza, na direção oposta ao movimento. No caso dos deslizamentos translacionais, o sistema de forças que provoca o movimento permanece constante. Nesse caso, o movimento cessa quando a massa que se desloca encontra um obstáculo ou ocorre alteração na interação entre a face resistente e a que desliza.

iii) Escoamentos

Nos escoamentos, o material em movimento sofre intensa fragmentação durante o processo de instabilização. Assim, passa a se comportar como um fluido viscoso. A velocidade desse tipo de movimento pode variar desde lenta até muito rápida. Dependendo do material envolvido no movimento, os escoamentos podem ser subdivididos em escoamentos ou corridas de solo ou detritos e escoamento ou corridas de lama.

Nas corridas de detritos, o material apresenta granulometria grossa. Esse tipo de movimento ocorre em geral associado a precipitações pluviométricas de forte intensidade, que provocam o escoamento superficial de grande quantidade de água.

Os depósitos de encostas do tipo tálus – colúvio de pequena espessura, localizados nos leitos de talwegues de regiões montanhosas, constituem-se nos materiais mais suscetíveis aos escoamentos do tipo corrida de detritos. Normalmente, esses depósitos são formados pelo acúmulo de materiais (detritos) de instabilizações ocorridas a montante, nas partes mais ele-

vadas das encostas. Durante chuvas de elevada intensidade, a água satura o depósito, provocando a elevação das poropressões com conseqüente diminuição da resistência. A associação desse processo com as ações da força de percolação e do poder erosivo superficial (no caso de altas declividades) pode deflagrar o escoamento do depósito.

Os escoamentos de detrito de grande intensidade, em algumas classificações, recebem a denominação de avalanche de detritos. Frequentemente ocorrem em regiões montanhosas com encostas íngremes, envolvendo materiais mais grossos, podendo englobar até blocos de rocha. Nessas condições o movimento pode atingir distâncias consideráveis.

Os movimentos lentos, muitas vezes denominados de rastejos (*creep*), incluem-se nos movimentos classificados como escoamentos. Nesse caso, a massa de solo se comporta como um fluido de elevada viscosidade e, em função disso, os movimentos são muito lentos.

Em quase todas as encostas verifica-se a ocorrência de *creep*. Terzaghi (1950) distinguiu dois tipos de *creep* em taludes: o sazonal e o contínuo. O *creep* sazonal é causado pela variação de teor de umidade e temperatura no solo, ou rocha, nas suas camadas superficiais. A profundidade atingida por esses movimentos é da mesma ordem de grandeza da profundidade onde ocorrem variações sazonais de umidade e temperatura no solo.

O *creep* contínuo é causado pela ação de forças gravitacionais e ocorre abaixo da zona de variação sazonal, atingindo maiores profundidades. De acordo com Terzaghi (1950), o *creep* contínuo pode levar a um aumento progressivo da velocidade até a ruptura propriamente, a depender do estado de tensão na zona de *creep*.

A identificação da ocorrência de *creep* em taludes é feita pela presença de fissuras na superfície do talude, árvores ou postes inclinados, deslocamento horizontal de cercas, dentre outros. É importante essa identificação, pois os movimentos lentos podem eventualmente se transformar em ruptura pela perda da resistência do material. Assim, os movimentos de *creep* podem ser interpretados como um indício de que o talude caminha para outro tipo de movimento como, por exemplo, para um deslizamento.

As corridas de lama ocorrem em materiais finos siltosos ou argilosos, e sua análise pode ser associada ao limite de liquidez do solo, pois no momento da ruptura do maciço o material flui. Daí, em áreas com ocorrência desse tipo de ruptura, é importante a realização de análise comparativa entre o índice de vazios do solo em estado natural e o índice de vazios correspondente ao limite de liquidez do solo. No caso de materiais para os quais no estado natural o índice de vazios supera o do limite de liquidez, ocorrendo ruptura do maciço por excesso de umidade, geralmente ocorre corrida de lama (GONZÁLEZ, 2005).

5 Erosão costeira

5.1 Aspectos conceituais

A zona costeira compreende uma área de interface entre o mar e o continente. Trata-se de uma região onde há intensas ações que implicam troca de energia. O limite entre o continente e o mar forma a linha de costa. No mar atuam processos dinâmicos representados pelas ondas, correntes e variações de marés. Tais processos provocam a todo instante em uma determinada seção transversal à linha de costa a retirada e o aporte de sedimentos. Essa linha

de costa pode permanecer em equilíbrio dinâmico se o balanço entre a retirada e o aporte de sedimentos for nulo. Se, por um lado, o aporte de sedimento for maior que a retirada, haverá o que se denomina de acreção da praia. Por outro lado, se o balanço sedimentológico for negativo, ou seja, o volume de sedimentos retirados for maior que o volume depositado, ocorrerá a erosão costeira com o conseqüente recuo da linha de costa.

A erosão costeira pode ser resultante também da elevação no nível médio do mar, provocada pelas mudanças climáticas que vêm ocorrendo no planeta. Entretanto, várias ações antrópicas têm acelerado os processos erosivos costeiros por interferirem na dinâmica do transporte de sedimentos na zona costeira ou mesmo nas correntes marinhas. Obras de engenharia que blindam a superfície da linha de costa, molhes e espigões que interferem nas correntes marinhas e conseqüentemente no transporte de sedimentos, assim como obras portuárias são exemplos de intervenções que podem provocar erosão costeira. Convém mencionar que muitas vezes a erosão não ocorre na área de implantação das obras, mas a jusante das mesmas (considerando a direção das correntes que transportam os sedimentos).

Outro exemplo de intervenção antrópica que vem afetando o comportamento da linha de costa diz respeito à implantação de barragens nos cursos d'água. Essas obstruem o fluxo de água e o transporte de sedimentos do continente para a zona costeira. A linha de costa estava em equilíbrio antes da construção da barragem, contando com o aporte de sedimento proveniente do curso d'água. Com a interrupção da alimentação, ocorrerá um balanço negativo e, assim, toda a energia das ondas, correntes e marés incidirá sobre a linha de costa, retirando sedimentos da praia e provocando a erosão. Essa é uma questão que merece maior reflexão, pois, se por um lado, o equilíbrio se dava pela ocorrência indesejável de erosão continental, em especial a de origem antrópica, por outro, hoje a perda desse mesmo equilíbrio se deve ao não menos indesejável assoreamento dos reservatórios.

Outro aspecto que merece maiores análises diz respeito a possíveis alterações nas correntes marinhas geradas pela implantação de plataformas para a exploração de petróleo.

5.2 Mecanismos de recuo da linha de costa em áreas de falésias

Falésias são desníveis abruptos no terreno, formados por processos erosivos costeiros. São feições que estão presentes em vários trechos da costa do Nordeste do Brasil, desde o Ceará até a Bahia, com predominância nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba. As áreas de falésias apresentam elevado potencial turístico em função da possibilidade do seu topo ser usado como mirante. Assim, há forte pressão de uso com vistas à implantação de hotéis, restaurantes e outros equipamentos turísticos na sua parte superior. Por outro lado, existe a preocupação com o recuo da falésia em função de processos erosivos costeiros, assim como a possibilidade de ocorrências de processos continentais (erosão e movimentos de massas), devido, inclusive, à própria degradação do maciço em consequência de sua ocupação.

As falésias podem ser classificadas em vivas (ativas) ou mortas (inativas ou recuadas). As falésias vivas são aquelas que sofrem a ação direta das águas do mar que atacam através de ondas e correntes a sua base. Nas falésias mortas, a base do talude é protegida da ação direta do mar, seja pela presença de blocos de rocha, seja pela existência de uma faixa de praia.

As regiões costeiras formadas por falésias estão submetidas a processos de recuo em função da possibilidade de ocorrência de processos marinhos e outros de origem continental. Como processo marinho destaca-se a ação de ondas e correntes que provocam desagregação e retirada do material da falésia, formando uma incisão na sua base (Figura 10). As falésias também estão submetidas aos processos continentais, podendo sofrer erosão pluvial (Figura 11) ou movimentos de massas, conforme mostrado na Figura 12.

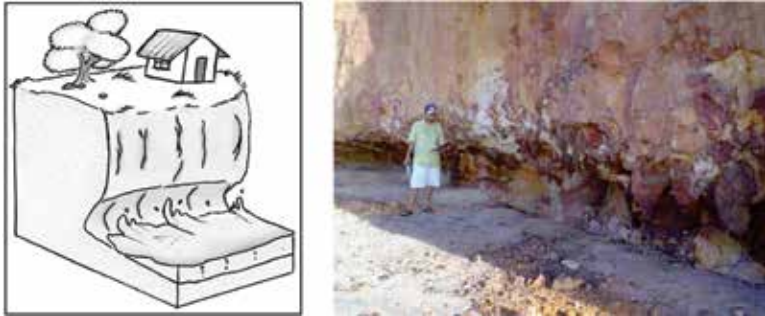


Figura 10. Erosão basal em falésias provocada pela ação do mar (BRAGA, 2005).

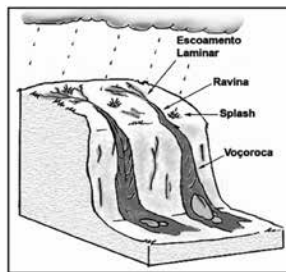


Figura 11. Erosão pluvial em falésias (BRAGA, 2005).

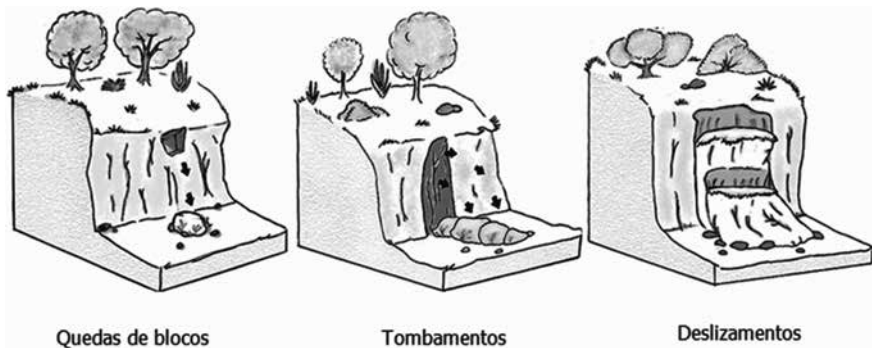


Figura 12. Movimentos de massas em falésias (BRAGA, 2005).

As falésias do litoral leste do Rio Grande do Norte vêm sendo estudadas com vistas à compreensão dos mecanismos de recuo e avaliação das condições de estabilidade em vários segmentos da costa: Silva (2003), Braga (2005), Severo (2005), Nascimento (2009), Severo (2011), Souza Júnior (2013) e Ribeiro (2015).

De acordo com Santos Júnior et al. (2008), os mecanismos de recuo de falésias observados no litoral do Rio Grande do Norte podem ser esquematicamente representados conforme mostra a Figura 13. Nessa região foram observados três perfis típicos nas falésias: o primeiro é vertical, o segundo é vertical em sua metade inferior e com inclinação variando de 40° a 60° na parte superior e o terceiro apresenta inclinação média entre 40° a 60° ao longo de toda a altura da falésia. A cada perfil estão associados alguns tipos específicos de processos.

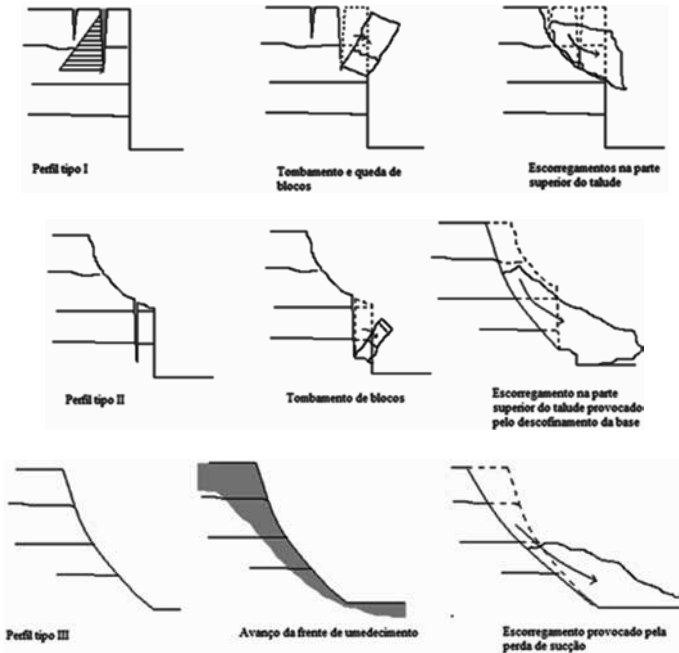


Figura 13. Perfis típicos de falésias observados no litoral leste do RN (SANTOS JR. et al., 2008).

No perfil tipo 1, onde o talude da falésia é vertical, observa-se com frequência a ocorrência de quedas e tombamentos de blocos e deslizamentos na parte superior. Esses tipos de movimentos estão associados à presença de fendas de tração na parte superior da falésia. A situação se torna mais crítica quando as fissuras são preenchidas por água na estação chuvosa, as quais exercem um empuxo hidrostático, empurrando o bloco para fora do talude.

No caso do perfil tipo 2, os movimentos que podem ocorrer são: tombamento de blocos da parte inferior e deslizamento de toda a encosta pelo desconfinamento da base. Este último reflete a busca do equilíbrio do talude após a ocorrência do tombamento do bloco na parte inferior.

Os movimentos que ocorrem em falésias que possuem o perfil tipo 3 estão associados à infiltração de água de chuva. Durante eventos de chuva a água infiltra no terreno, provocando a diminuição da sucção com conseqüente perda de resistência. O avanço da frente de umedecimento pode levar à ocorrência de deslizamentos que abrangem toda a altura do talude com a profundidade condicionada pela zona de umedecimento. Convém observar que as falésias de menor inclinação são mais suscetíveis a esse mecanismo que aquelas mais íngremes, devido à maior exposição da face do talude à ação da infiltração da água.

Destaca-se que essa declividade também afeta no mesmo sentido os fluxos de umidade provenientes do maciço.

O efeito da influência da incisão na base de falésias provocada pela ação das ondas foi estudado por Silva et al. (2016). A Figura 14 mostra o efeito da incisão basal na distribuição de tensões em uma falésia com 90° de inclinação. No início do processo (Figura 14a), ainda sem incisão no pé do talude, as tensões máximas de compressão estão situadas na base da falésia (elevação 0 m), cujos valores estão entre 500 kPa e 550 kPa. À medida que a incisão avança na base da falésia, percebe-se uma mudança no estado de tensões na região adjacente à erosão, conforme mostrado nas Figuras 14b, 14c e 14d. As tensões tendem a se concentrar adjacentes à incisão basal, quando surgiram tensões de compressão na base da ordem de 2.300 kPa. Vale destacar que foram observados esforços de tração no solo situado na região superior à incisão (Figuras 14d e 14e). Como os solos apresentam baixa resistência à tração, esses valores de esforços resultam, apesar do aumento das tensões de compressão, na ruptura da falésia. A erosão basal provoca o solapamento e a posterior queda da parte superior.

Destaca-se que os mecanismos descritos atuantes nas falésias podem ser enquadrados no arcabouço conceitual apresentado no item 3, segundo o qual os processos erosivos resultam de um desequilíbrio entre a energia erosiva e a resistente à erosão. O recuo de falésias é proveniente do somatório de processos continentais, representados pela erosão pluvial (laminar, sulcos, ravinas e voçorocas) e pelos movimentos de massas, associados aos processos marinhos, representados pela erosão costeira (solapamento da base da falésia), ou ainda pelas rupturas do maciço devido a sua fragilização em consequência do uso e ocupação.

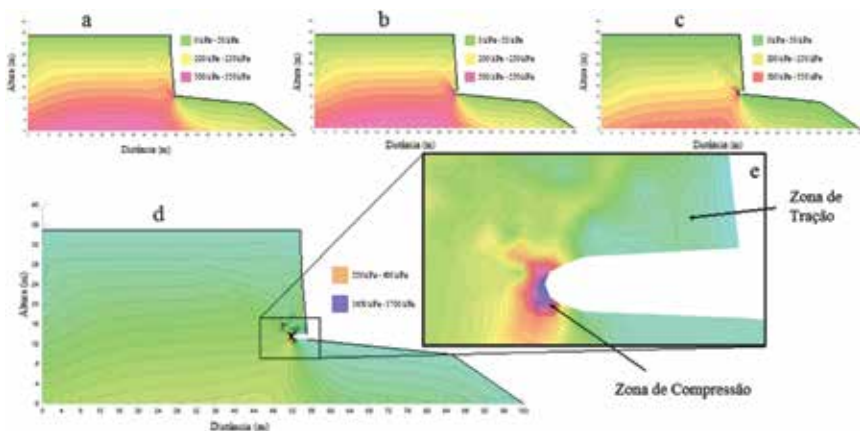


Figura 14. Distribuição de tensões em uma falésia com inclinação de 90° com o avanço da incisão basal. (a) Falésia sem erosão basal; (b) 1m de incisão; (c) 2m de incisão; (d) 3m de incisão; (e) Detalhe da distribuição de tensões com 3m de incisão, mostrando as zonas de tração e compressão (SILVA et al., 2016).

Tanto no caso dos processos continentais como no dos marinhos, a energia resistente a erosão consiste nos elementos geomecânicos que formam a encosta (composição química e mineralógica, estratigrafia, sistemas de fraturas, sucção, dentre outros). Já a energia erosiva dos processos continentais é a mesma apresentada no item referente aos taludes continentais. Em relação aos processos marinhos, a energia erosiva é fornecida pela ação das ondas, correntes e variações das marés.

6 Erosão em bordas de reservatórios

A implantação de qualquer obra de engenharia promove desequilíbrio e modificações no meio geotécnico. No caso de obras de grande porte, como é o caso de muitas barragens e reservatórios, as interferências repousam não somente nas características da obra propriamente dita, mas também da sua interferência nas áreas e obras adjacentes, uma vez que, por exemplo, promovem a alteração da posição do lençol freático e, conseqüentemente, das condições geotécnicas do subsolo.

Em se tratando da influência da posição do lençol freático em obras adjacentes às barragens, Rodrigues (2007) destaca as conseqüências da ascensão do mesmo devido à construção da Usina Hidrelétrica de Três Irmãos, no estado de São Paulo. Nesse caso, o autor discute os aspectos relacionados aos mecanismos de colapso proporcionados pelo umedecimento do solo devido à ascensão do lençol freático, fato este que ocasionou diversas patologias em edificações das cidades localizadas a montante da respectiva barragem. Os problemas de subsidências podem ocorrer ainda devido a alterações climáticas oriundas da presença do reservatório, tais como nível de precipitação e umidade relativa do ar. Com isso altera-se a interação solo-atmosfera e por conseqüência a sucção presente no solo, que ao ser reduzida pode gerar problemas como subsidências e rupturas de taludes.

Ainda na perspectiva do reposicionamento definitivo do lençol freático devido à execução de alguma obra de engenharia, vale destacar que o rebaixamento do lençol freático, mesmo em longo prazo, pode ocasionar diversos problemas. Nesse caso, pode-se citar como exemplo a necessidade do reforço das fundações de diversas edificações próximas ao Rio Pinheiros, em São Paulo, as quais apresentaram patologias devido ao apodrecimento das estacas de madeira, que serviam como fundação dessas edificações.

Em se tratando da temática principal deste capítulo, pode-se discutir a respeito das conseqüências da ascensão e do rebaixamento do nível d'água represado na dinâmica das águas subsuperficiais adjacentes ao reservatório e da sua influência na estabilidade dos taludes dos maciços que o contornam.

A Figura 15 apresenta a evolução da posição do lençol freático antes e após o enchimento de um reservatório, tanto na condição temporal de curto prazo, denominado como nível d'água transitório, quanto em longo prazo, quando o tempo tende ao infinito. Não raro surge um nível d'água temporário superior ao de equilíbrio devido à atuação da sucção/capilaridade inicialmente atuante no maciço.

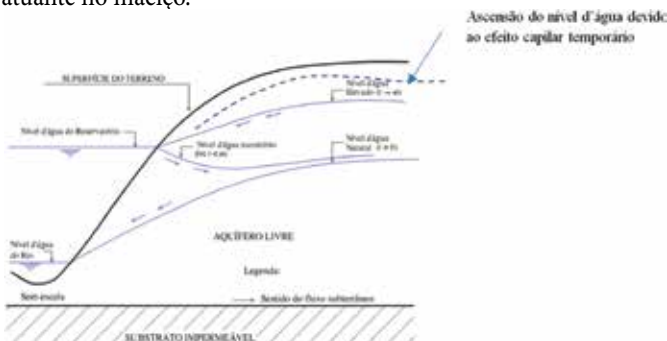


Figura 15. Esquema da variação da posição do lençol freático durante o enchimento do reservatório (adaptado de RODRIGUES, 2007).

A fim de apresentar maiores detalhes a respeito das condições de fluxo d'água no subsolo, tanto na fase de enchimento de um reservatório, a curto e a longo prazo, quanto em um potencial rebaixamento rápido do nível d'água de um reservatório, são apresentadas as Figuras 16, 17, 18, 19, 20 e 21. Estas foram complementadas com análises da estabilidade dos taludes das bordas do respectivo reservatório para cada uma das condições de fluxo analisadas (Figuras 22 a 27). Vale destacar que essas análises tratam de uma situação hipotética; no entanto, refletem qualitativamente o comportamento esperado dos taludes marginais de reservatórios no que diz respeito ao fluxo de água e a sua estabilidade.

Na Figura 16 são apresentados os vetores de fluxo em uma encosta natural, promovidos pelo fluxo a partir do aquífero natural, o qual propicia o abastecimento do rio. Nas Figuras 17 e 18 são apresentados o sentido do fluxo no 1º e 2º estágios do enchimento do reservatório. Na Figura 17, observa-se que o lençol freático no maciço de solo encontra-se praticamente à mesma cota do nível d'água no reservatório. Dessa forma, o sentido dos vetores de fluxo sugere que há fluxo tanto no sentido do reservatório para o maciço de solo, quanto do maciço de solo para o reservatório, o que configura uma tendência de equilíbrio. Ao se observar a Figura 18, quando o nível de água do reservatório apresenta-se em cota mais elevada do que o nível d'água observado dentro do maciço de solo, fica explícito através dos vetores de fluxo que o sentido de fluxo é exclusivamente do reservatório para o maciço de solo. Na Figura 19, onde se pode observar o 3º estágio de enchimento do reservatório, pode-se observar que este atingiu o seu nível máximo; entretanto, a curto prazo, pode-se observar que ainda há fluxo no sentido do reservatório para o maciço de solo, o qual será contínuo até que o sistema atinja o equilíbrio. Na Figura 20, sugerindo uma condição temporal que tende ao infinito, e supondo que, por exemplo, devido à recarga do lençol freático dentro do maciço de solo e à ocorrência de eventos chuvosos, o nível do lençol freático ascenda, proporcionando a inversão do sentido de fluxo, agora do lençol freático dentro do maciço de terra para o reservatório. Por fim, na Figura 21, foi realizada uma análise para simular um eventual rebaixamento rápido do nível d'água no reservatório. Nesse caso foi possível observar que a elevada energia da água na face do talude poderia promover a ocorrência de fenômenos erosivos como o *piping*, proporcionando a desestabilização do talude.

Com o objetivo de avaliar as condições de estabilidade em cada condição de fluxo supracitadas, foram realizadas análises de estabilidade dos taludes nas bordas de um reservatório. Nessas análises foi possível observar a influência significativa do nível d'água do reservatório e da posição do lençol freático dentro do maciço de terra, na estabilidade dos taludes. Nessas foi possível observar que, quanto mais elevado o nível d'água no reservatório, maior o fator de segurança observado no mesmo, uma vez que a pressão de água na parede do maciço de terra se contrapõe ao sentido de instabilização do talude. A longo prazo, com o tempo tendendo ao infinito, devido à recarga do lençol freático, o seu nível ascende às cotas mais elevadas que o nível d'água do reservatório (Figura 26), proporcionando a redução do fator de segurança registrado. A condição mais crítica foi observada na simulação do rebaixamento rápido do nível d'água no reservatório, quando o fator de segurança obtido foi próximo à unidade, o que configura um talude marginalmente estável, na iminência da ruptura (Figura 27). Os valores de fator de segurança obtidos para cada uma das análises estão apresentados na Figura 28.

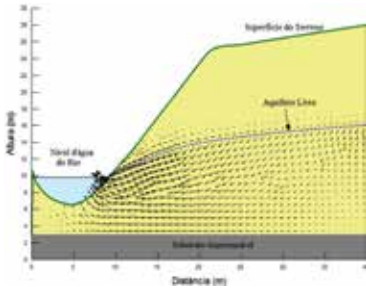


Figura 16. Condições de fluxo para o aquífero livre e o nível do rio em condições originais.

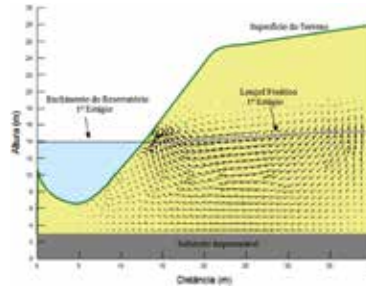


Figura 17. Condições de fluxo no 1º estágio de enchimento ocorrido em um tempo T_1 .

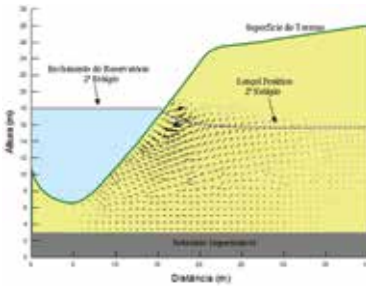


Figura 18. Condições de fluxo no 2º estágio de enchimento ocorrido em um tempo T_2 .

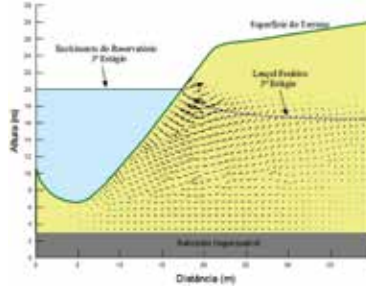


Figura 19. Condições de fluxo no 3º estágio de enchimento ocorrido em um tempo T_3 .

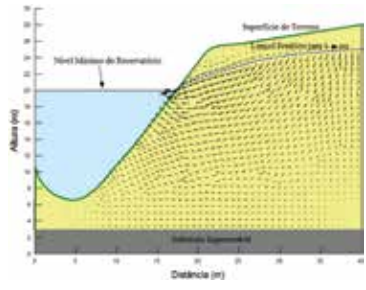


Figura 20. Condições de fluxo em um tempo que tende ao infinito após o enchimento do reservatório.

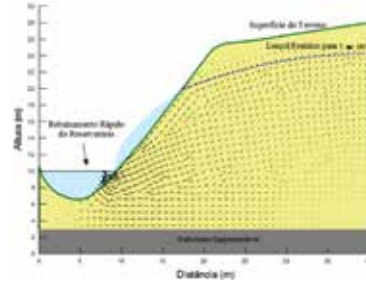


Figura 21. Condições de fluxo durante ou ao final do rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório após o regime de fluxo já estabelecido.

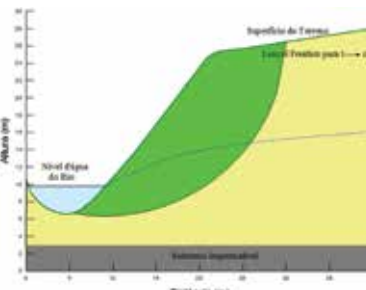


Figura 22. Estabilidade do talude com o aquífero livre e o nível do rio em condições originais.

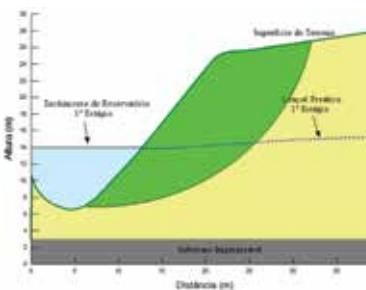


Figura 23. Estabilidade do talude durante o 1º estágio de enchimento ocorrido em um tempo T_1 .

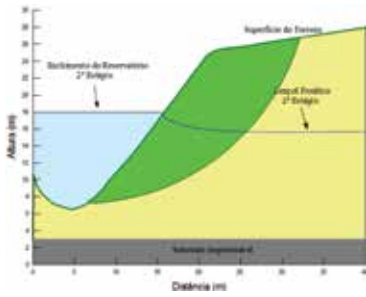


Figura 24. Estabilidade do talude durante o 2º estágio de enchimento ocorrido em um tempo T_2 .

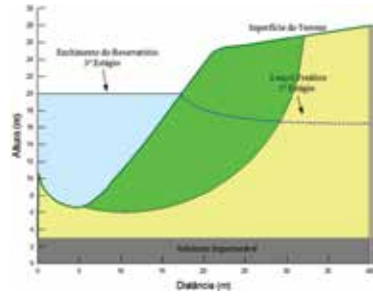


Figura 25. Estabilidade do talude durante o 3º estágio de enchimento ocorrido em um tempo T_3 .

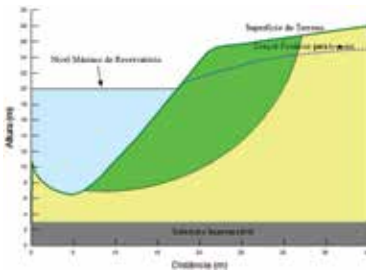


Figura 26. Estabilidade do talude durante em um tempo que tende ao infinito após o enchimento do reservatório.

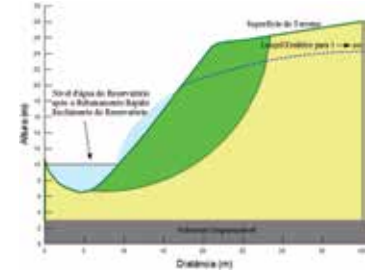


Figura 27. Estabilidade do talude durante o rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório após o regime de fluxo já estabelecido.

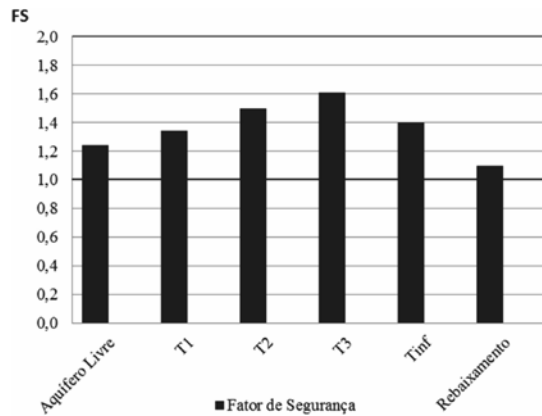


Figura 28. Fator de segurança em cada condição até o rebaixamento rápido do lençol freático.

Essas análises apenas ilustram determinadas hipóteses de variações de fluxos em função do enchimento do reservatório, considerando-se a zona saturada e análises de estabilidades de taludes e uma configuração bidimensional do problema. Recomenda-se ampliar as análises ao se considerar o impacto das variações de sucção na zona não saturada, assim como análises tridimensionais em maciços com morfologia não plana. Será também interessante avaliar o problema para balanços hídricos característicos de regiões com maior aridez, onde ocorre uma situação de déficit de infiltração em relação à evaporação e evapotranspiração.

Além dos aspectos apresentados relativos aos efeitos da elevação do nível de água no reservatório sobre a estabilidade, chama-se atenção para o fato de que as margens de reservatórios, assim como as margens de rios, sofrem processos similares aos descritos relativamente ao recuo de falésias. A ação de ondas geradas pelos ventos ou por embarcações pode provocar a incisão e posterior solapamento das margens. O mesmo pode ocorrer em margens de rios, com a diferença que, nesse caso, a incisão normalmente é provocada pelas correntes que erodem o pé dos taludes.

7 Mecanismos de evolução das erosões com origem hídrica

Uma vez deflagradas as erosões continentais, fluviais, de orlas de reservatórios e costeiras, os fatores responsáveis pelos mecanismos de evolução que nelas atuam são muitas vezes os mesmos, cabendo salientar que fatores comuns em determinadas situações aos quatro tipos de erosão não se aplicam indistintamente a todas elas e, quando se aplicam, isso geralmente não se dá com a mesma intensidade.

Por exemplo, com o surgimento de erosões como as mostradas nas Figuras 4 (erosão fluvial), 5 (erosão em bordo de reservatório) e 6 (erosão costeira), o maciço passa a apresentar condições de drenagem superficial e interna distintas das inicialmente existentes devido à nova morfologia e cobertura do maciço. Tais condições de drenagem terminam passando por alterações, na medida em que a erosão se amplia. Lima (2003) mostrou que as condições de drenagem influenciam de modo marcante no processo de intemperização do maciço em curto prazo.

Esse exemplo, em que se comparam as três figuras, é interessante por mostrar semelhanças e distinções em erosões que surgem em contato com a lâmina d'água. No paralelo que se faz a seguir não se levam em conta condições intrínsecas ao maciço, tal como os materiais que os compõem.

Na Figura 6, o impacto frontal das ondas gera solapamento na base do talude e facilita o avanço da erosão por meio de instabilizações do talude. Já na Figura 4, além de ondas oriundas do movimento de embarcações, o solapamento se dá principalmente devido ao fluxo da água do rio paralelo ao talude, igualmente contribuindo para sua instabilização. Nessa comparação já aparecem duas distinções marcantes: a forma como a energia da água atua no processo de solapamento e as propriedades químicas da água nos dois ambientes.

Observa-se que, embora as formas de energia da água atuante por meio de ondas nos casos das Figuras 5 (orla de reservatório) e 6 (orla marítima) serem semelhantes, as propriedades químicas da água são distintas. Portanto, o solapamento é, nesses três casos, um fator semelhante como agente desencadeador de instabilizações dos taludes das erosões; no entanto, o meio pode lhes conferir dinâmicas distintas. Em outras situações, por exemplo, de bordas de reservatórios e de falésias, o meio pode ser semelhante, contudo, os materiais que compõem dos maciços podem ser distintos, apresentando diferentes níveis de sensibilidade aos meios semelhantes.

As rupturas de taludes durante o processo evolutivo das erosões também podem ocorrer devido às intemperizações que se processam nos maciços em curto e médio prazos. Nesse caso faz-se necessário considerar agentes internos e externos de intemperização, por exemplo, internamente, características dos materiais dos maciços e condições de drenagem e, externa-

mente, direção e intensidade dos ventos predominantes, condição de insolação e características da atmosfera. Além da questão da intemperização, alterações nas condições de interação solo-atmosfera por interferirem diretamente na sucção/capilaridade atuante na parte não saturada do maciço podem ser um acelerador de processos erosivos, facilitando a ruptura de taludes com o umedecimento e a erosão superficial com a secagem.

Tem-se ainda que a remoção da cobertura vegetal do maciço, assim como a alteração de sua morfologia, influencia no processo evolutivo da erosão ao alterar as condições de atuação de fatores como vento, insolação e fluxos de umidade, pois intervêm na interação solo-atmosfera e, portanto, na drenagem em meio não saturado.

8 Considerações finais

As encostas continentais, as costeiras, as margens de rios e de reservatórios estão submetidas a processos que podem alterar a sua forma e que fazem parte da evolução do relevo. Os processos continentais foram classificados como processos erosivos ou movimentos gravitacionais de massas. Os processos erosivos foram subdivididos em erosão laminar, sulcos, ravina e voçorocas, enquanto os movimentos de massas em quedas, tombamentos, deslizamentos e escoamentos ou corridas de detrito e de lama.

Os processos que ocorrem nas margens fluviais, nas bordas de reservatórios, nas zonas costeiras marinhas resultam no recuo da linha que separa a parte terrestre da aquática. Um componente marcante nesse processo é a ação das ondas e correntes que provocam a retirada do solo da base e o solapamento do talude. Entretanto, todos os outros processos (erosões e movimentos de massas) podem ocorrer nas encostas dessas margens.

Foi proposto que, seja de que natureza for o processo (continental, marinho, fluvial ou de margem de reservatório), as instabilizações resultam de um desequilíbrio de energia. Assim, no estudo dos processos faz-se necessário considerar as energias que contribuem para a estabilidade do sistema e aquelas que são susceptíveis de afetarem-na.

9 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à Capes e à Eletrobras Furnas pelo apoio que vêm dando aos estudos sobre erosões.

Referências

BRAGA, K. G. *Uso de checklist na identificação de processos erosivos costeiros*. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2005.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. Processos erosivos. In: _____ CAMAPUM DE CARVALHO, J. SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. *Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro*. Brasília: Finatec, 2006. p. 39-91.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SANTOS JR., O.F.; MAROT, D.D.; CAMPOS, L. E. Um paralelo quanto aos mecanismos de surgimento e evolução de erosões continentais, fluviais, de bordo de reservatório e costeiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., Goiânia. *Anais...* Goiânia: Cobramseg, 2014.

GONZÁLEZ, Y. V. *Influencia de la meteorización en las propiedades y comportamiento de dos perfiles de alteración originados de rocas metamórficas*. 2005. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2005.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1984. 194 f.

HUNGR, O.; LEROUÉIL, S.; PICARELLI, L. *The Varnes classification of landslide types, an update*. *Landslides* (2014) 11:167–194. DOI 10.1007/s10346-013-0436-y.

LIMA, M. C. *Contribuição estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus*. 1999. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

_____. *Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas*. 2003. 336 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

LUIZ, G. C. *Relação solo/atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – município de Goiânia/GO*. 2012. 271 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MORTARI, D. *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Distrito Federal*. 1994. 200 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 1994.

NASCIMENTO, K. C. *Análise dos processos erosivos na linha de costa na Praia de Pirangi do Norte – Parnamirim/RN*. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2009.

RIBEIRO, J. R. C. *Análise paramétrica da estabilidade de falésias e estudo de caso da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul/RN*. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2015.

RODRIGUES, R. A. *Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático*. 2007. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

SANTOS, R. M. M. *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia*. 1997. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 1997.

SANTOS JR, O. F.; SEVERO, R. N. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARAL, R. F. Processo de instabilização em falésias: estudo de um caso no Nordeste do Brasil. *Revista Luso-Brasileira de Geotecnia*, SPG, ABMS, ABGE. n. 114, p. 71-90, 2008.

SEVERO, R. N. F. *Análise da estabilidade de falésias estre Tibau do Sul e Pipa – RN*. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2005.

_____. *Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul - RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente*. 2011. 277 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2011.

SILVA, B. M. F.; FREITAS NETO, O.; SANTOS JR., O. F.; SEVERO, R. N. F.; BARBOSA, N. M. Influência da incisão basal na estabilidade de falésias no litoral do RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Cobramseg, 2016.

SILVA, W. S. *Estudo da dinâmica superficial e geotécnico das falésias do município de Tibau do Sul – litoral oriental do RN*. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2003.

SOUZA JR., C. *Análise da estabilidade de falésias na zona costeira de Baía Formosa/RN*. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2013.

TERZAGHI, K. Mechanisms of Landslides. *The Geological Society of America – Engineering Geology*, Berkeley Volume, p. 83-123, 1950.

VARNES, D. J. Slopes Movements Types and Processes. *Landslides – Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report n. 176, p. 11-33, 1978.

CAPÍTULO 17

Erosão hídrica em solos cultivados

Renata Santos Momoli
José Camapum de Carvalho
Miguel Cooper

Palavras-chave: Qualidade do solo. Qualidade da água. Produção de sedimentos. Impacto. Assoreamento.

1 Introdução

Em regiões de clima tropical, a erosão hídrica pode assumir grandes proporções em áreas rurais cultivadas, frequentemente decorrente do uso e principalmente do manejo não conservacionista, com graves consequências para a produção agropecuária, devido à perda de solo cultivável, e para os recursos hídricos, devido ao assoreamento de cursos d'água e reservatórios. A erosão do solo atinge 50% das áreas degradadas na América do Sul, totalizando 1,17 milhões de km² (LAL, 2001). As erosões em meio rural vão desde erosão laminar à linear, como voçorocas de grande porte, passando por sulcos e ravinas.

Aspectos intrínsecos aos solos como atributos físicos, químicos e mineralógicos, em diversas combinações, contribuem para aumentar ou diminuir sua suscetibilidade à erosão, ou seja, a erodibilidade do solo. A associação de fatores como profundidade, textura, estrutura, composição mineral e orgânica interfere na permeabilidade do solo, conferindo maior ou menor resistência à desagregação. Esses fatores condicionam a agregação do solo, que responde pela aglutinação de partículas unitárias em agregados maiores, aumentando o tamanho dos poros correspondentes e facilitando a percolação de fluidos.

A magnitude de impactos da erosão hídrica é fortemente influenciada pela presença de cobertura vegetal, que protege o solo contra impactos da chuva e aumenta sua resistência e resiliência contra a perda da camada superficial durante eventos erosivos. A cobertura do solo é responsável pela redução da energia cinética da precipitação e do escoamento superficial, em virtude da interceptação das gotas de chuva pelas folhagens e da enxurrada, pelos caules e raízes, os quais aumentam a rugosidade da superfície. A remoção da cobertura vegetal original pelo desmatamento e o manejo inadequado dos campos cultivados acarreta graves prejuízos econômicos e ambientais, pois favorece a instalação de feições erosivas.

Solos cultivados apresentam alterações na sua estrutura original, pois as operações de preparo para plantio, bem como o arranquio de plantas invasoras provocam quebra de torrões e rompimento dos agregados. Posteriormente, a passagem de máquinas e implementos

durante as operações de pulverização e colheita promove a compactação, podendo levar a um maior selamento da superfície.

Tais alterações provocam redução na porosidade e, conseqüentemente, menor permeabilidade à infiltração da água e retardo no movimento da água no solo. Uma vez que a infiltração é prejudicada, o escoamento superficial – ou enxurrada – é intensificado. Assim, as condições associadas de solos cultivados compactados sob condições de precipitação e declividade intensas facilitam a remoção e o transporte de grandes volumes de solo arrastados pela enxurrada durante o processo erosivo. Cabe destacar que, se a redução da porosidade reduz os canais de fluxo presentes no solo, diminuindo a permeabilidade, ela também tende a aumentar a sucção/capilaridade, puxando com mais energia a água para o interior do maciço, contribuindo para um aumento na pressão positiva na fase ar e facilitando o desprendimento de partículas.

2 Problemática da erosão no mundo

A produção de alimentos para a população humana é amplamente dependente do recurso natural “Solo”, e a sobrevivência da nossa espécie exige a sua utilização racional, pois é considerado não renovável na escala humana de existência. Com o aumento populacional mundial e igualmente na demanda por alimentos, estima-se que em torno de 70 milhões de km² sofreram alteração acelerada do uso do solo (FAO, 2015). Desse total, 20 milhões de km² encontram-se sujeitos à degradação, afetados por impactos como erosão, poluição e desertificação, sendo 29,7% em terras cultivadas, 34,8% em pastagens permanentes e 35,5% em florestas (ELD, 2015; OLDEMAN *et al.*, 1991; LAL, 2001). A depreciação da qualidade do solo se inicia a partir da remoção de florestas, conforme proposto no modelo da Espiral da Degradação (LAL, 2012) (Figura 1).



Figura 1. Espiral da Degradação (Modificado de LAL, 2012).

O desmatamento alcançou a taxa de 13 milhões ha.ano⁻¹ entre os anos de 2000 e 2010, principalmente na América do Sul e na África, regiões onde a expansão agrícola continua (FAO, 2015). Espera-se que, nos próximos 10 anos, ainda perdure, no Brasil, a expansão agrícola voltada ao atendimento do aumento na demanda interna e externa por alimentos, biocombustíveis e fibras (MERTEN; MINELLA, 2013). A erosão do solo atinge 50% das áreas degradadas na América do Sul, totalizando 1,17 milhões de km² (LAL, 2001).

A degradação de terras é definida como a perda do clímax da cobertura vegetal não antropizada, devido a sua substituição por vegetação secundária, causando retrorregressão ou retrocesso. Essa constatação significa a transformação de um fenômeno originalmente mais complexo e em equilíbrio natural em uma forma de atividade biológica mais simples, resultando na degeneração, abiotrofia e mudança de estado. É comumente induzido por ações antrópicas como, por exemplo, desmatamento, queimadas, superpastoreio e tratos agrícolas, que podem levar à erosão acelerada. Além disso, causa perda da qualidade dos horizontes do solo por promover perda da sua estabilidade natural, principalmente, devido à supressão de matéria orgânica e de nutrientes do solo e à alteração ou mesmo extermínio da vida nele presente. A degradação consiste em um fenômeno que potencializa a erosividade das chuvas, em consequência do aumento do impacto das gotas e ventos sobre o solo exposto ou pouco/mal recoberto, o que se agrava durante eventos extremos associados, com frequência, às mudanças climáticas e que, em grande parte, se associam também ao uso e ocupação do solo em escala regional. Ao promover impacto adverso no solo, consequentemente haverá impacto também nos serviços ecossistêmicos (LAL, 2012).

A magnitude de impactos da erosão hídrica é fortemente influenciada pela presença de cobertura vegetal, que protege o solo contra impactos da chuva e aumenta sua resistência e resiliência contra a perda da camada superficial durante eventos erosivos. O dossel de folhagens intercepta as gotas de chuva, provocando desaceleração na energia cinética da precipitação, enquanto os caules e raízes aumentam a rugosidade da superfície, provocando desaceleração na velocidade da enxurrada.

A erosão hídrica do solo é também favorecida por certas formas de relevo, graus de declive, desnível topográfico, extensão da encosta (comprimento de rampa), classes de solo, entre outros fatores ambientais (BERTONI; LOMBARDI, 1998).

Em países de clima tropical, o fenômeno erosivo é também ampliado pelo regime de precipitação, com ocorrência de chuvas torrenciais e formação de espessas lâminas de água de escoamento com maior potencial erosivo.

A perda de solo significa diminuição de sua profundidade, devido à remoção de seus componentes. É um fenômeno natural, mas pode ser intensificado pela erosão acelerada. A taxa de perda de solo no mundo oscila entre 0,5-350 Mg.ha.ano⁻¹, sendo que 35% é atribuído ao superpastoreio; 30%, ao desmatamento, e 28%, ao cultivo excessivo (BLANCO; LAL, 2008). No Brasil, a perda de solo foi estimada em 0,9 a 26,6 Mg.ha.ano⁻¹ para o Estado de São Paulo; 20 Mg.ha.ano⁻¹ para o Estado do Paraná e 1 a 8,9 Mg.ha.ano⁻¹ para o Estado de Santa Catarina (TELLES *et al.*, 2011). Avaliações realizadas na região Centro-Oeste do Brasil apontaram a ocorrência de até 3,159 Mg.ha.ano⁻¹ de perda de solo em solos de áreas submetidas a incêndios na bacia do Rio Taquari, DF (VASCONCELOS *et al.*, 2016).

Além de comprometer a longevidade da produção agrícola, a perda de solo gera prejuízos orçados em 45,5 bilhões de dólares/ano⁻¹ na União Europeia e em 44 bilhões dólares/ano⁻¹ nos EUA. No Brasil, os prejuízos foram estimados em US\$ 4,2 bilhões, sendo US\$ 2,9 bilhões em prejuízos dentro da propriedade e US\$ 1,3 bilhão fora desta (EMBRAPA, 2012). Para os Estados do PR e SP, o custo da erosão foi calculado em 242 milhões de dólares/ano⁻¹ e em 212 milhões de dólares/ano⁻¹, respectivamente (TELLES *et al.*, 2011). No cerrado piauiense, os custos de reposição de perda de solo foram de até R\$ 22,40/ha, considerando a safra de soja de 2007/2008 (DANTAS; MONTEIRO, 2010).

Os valores são calculados considerando-se a perda de investimentos em adubos, corretivos e sementes, perda de substrato para plantio, gastos com operações mecânicas de reafeiçoamento da superfície, assoreamento de corpos hídricos, dragagem e redução da vida útil de reservatórios.

Os níveis de tolerância à perda de solos por erosão variam de um solo a outro e relacionam-se muito às práticas de uso e manejo adotadas (agrossistemas). No geral, a tolerância é definida com um valor de perda que ainda permite a manutenção das funções produtivas do solo e varia no tempo e no espaço (VERHEIJEN *et al.*, 2009). Há limites de tolerância conhecidos para a grande maioria dos solos cultivados e há vários modelos disponíveis para seu cálculo (BERTOL; ALMEIDA, 2000). Portanto, nesse cenário, quanto menor o nível de tolerância à perda de solo e mais agressiva a técnica de manejo, maior o potencial de assoreamento de cursos d'água e reservatórios, ressaltando-se que Esse último aspecto contribui para a redução de sua vida útil e muitas vezes gera sua contaminação por insumos e defensivos agrícolas.

3 Iniciativas para mitigação da degradação dos solos

Diversas medidas e estratégias vêm sendo adotadas no mundo todo para mitigar a degradação dos solos. O órgão responsável pela segurança alimentar mundial, FAO/ONU (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) preconiza que as funções do solo sejam reconhecidas pela sociedade por meio de esforços conjuntos e políticas públicas.

No Brasil, algumas iniciativas institucionais se encontram em andamento, com vistas a evitar, controlar e reverter a erosão dos solos. São elas: 1) Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas e Conservação de Solos na Agricultura, desenvolvido em parceria com Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); 2) Programa de Recuperação de Áreas Degradadas na Amazônia (PRADAM), executado pelo MAPA e elaborado em parceria com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), com a Organização Mundial para Agricultura e Alimentos (FAO) e com o Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD); 3) Plano ABC de redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) na agricultura; 4) Programa Especial Proteção de Nascentes, parceria entre a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e o Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR).

Encontra-se em tramitação no Congresso, desde 2007, o Projeto de Lei nº 1.301/2001, do Deputado Valdir Collato, que “dispõe sobre o uso e a conservação do solo e da água no meio rural”, e que já recebeu pareceres favoráveis, mas ainda não foi votado em plenário.

4 Origem e evolução da erosão hídrica em solos cultivados

4.1 Conceitos

O solo é um corpo natural tridimensional, trifásico e heterogêneo que ocupa a superfície terrestre. Constitui um sistema aberto, exposto continuamente à troca de massa e energia conhecida como Pedosfera, que tangencia a Hidrosfera, Litosfera, Atmosfera e Biosfera (BRADY; WEIL, 2013). O solo contempla as fases sólida (orgânica e/ou mineral), líquida (solução do solo) e gasosa (vapores do solo) (HILLEL, 1998).

O solo apresenta diversas funções, tais como: produção e reciclagem de biomassa, produção de alimentos, habitat para micro, meso e macrofauna e raízes, filtro contra poluição, regulação de armazenamento hídrico e inundações, estoque de carbono, armazenamento e reciclagem de resíduos orgânicos e substrato para instalação de edificações e malha viária (LAL, 2012).

A qualidade do solo consiste na sua capacidade de desempenhar as variadas funções e é fortemente influenciada pela presença de cobertura vegetal. É definida como a capacidade do solo em prover o crescimento de plantas, regular e compartimentalizar o fluxo hídrico no ambiente, estocar e mobilizar elementos químicos considerados nutrientes e reter elementos químicos considerados poluentes (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). A qualidade do solo depende de atributos físicos (estrutura, aeração e drenagem interna e retenção hídrica), químicos (pH, teor e composição de matéria orgânica, nutrientes e grau de contaminação) e biológicos (presença, abundância e atividade dos organismos do solo) (RUITER, 2004).

Na estrutura, deve-se incluir, por sua importância nos solos tropicais, a distribuição de poros em função da geralmente elevada presença de agregados. A estrutura do solo é definida pelo arranjo espacial das partículas sólidas; os poros são os espaços vazios complementares (MIEDMA, 1997). Portanto, se o solo possui partículas sólidas de tamanho relativamente grande ou que se encontram com boa agregação, o espaço poroso complementar também será grande, com predomínio de macroporos ($> 50\mu\text{m}$). À medida que predominem partículas de tamanho médio ou agregados menores que os anteriores, predominarão os mesoporos ($0,5$ a $50\mu\text{m}$). Caso o solo apresente apenas partículas sólidas muito pequenas e com baixa agregação, a probabilidade de predominância de microporos ($<0,5\mu\text{m}$) aumenta.

A porosidade do solo depende da organização espacial e da composição das partículas sólidas (BRADY; WEIL, 2013). A presença de partículas muito pequenas e carregadas eletricamente, conhecidas como colóides do solo, tem influência positiva na aglutinação, pois agem como cimentantes, mantendo-as unidas em agregados. Tanto a matéria orgânica quanto os Óxidos de Ferro possuem propriedades coloidais e, sendo abundantes em ambientes tropicais, podem promover boa agregação e consequente alta porosidade. É comum observar a agregação de partículas em macroagregados ($0,03\text{ mm} - 3\text{ mm}$), devido à presença de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo (Figura 2a). A porosidade do solo pode ser avaliada bidimensionalmente, por meio da análise de imagens e cálculos computacionais para estimar a porosidade total (%), o número total de poros e também o tamanho dos poros (COOPER *et al.*, 2010).

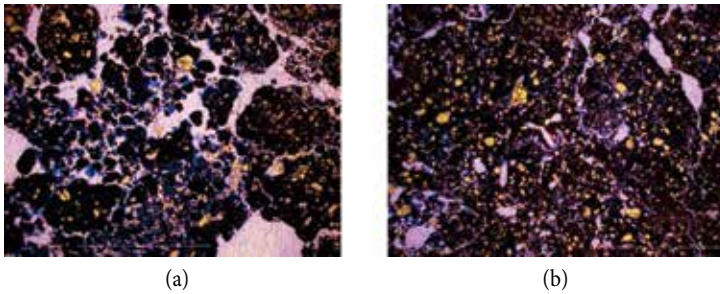


Figura 2. Estrutura de um solo de matriz argilosa (coloração escura) com presença de grãos de quartzo (amarelo) e porosidade associada (lilás), obtida por análise micromorfométrica de imagens (aumento 10x). Solo da superfície (0-10 cm de profundidade) com estrutura grumosa e macroporosidade predominante (a). Solo da subsuperfície (70-80 cm de profundidade) com estrutura em blocos e mesoporosidade predominante (b) (Fotos: Renata S. Momoli e Miguel Cooper).

Em horizontes mais profundos do solo, a agregação está mais relacionada à natureza mineralógica da fração sólida do que com a presença de matéria orgânica, que decresce com a profundidade (MOMOLI *et al.*, 2007). Solos tropicais de natureza oxidica apresentam forte microagregação (agregados <0,03 mm), o que resulta na redução proporcional de macroporos e no aumento de mesoporos (Figura 2b), os quais têm importância relevante, pois são reconhecidos como poros de armazenamento atuando como reserva hídrica para absorção pelas plantas. Microporos também tendem a aumentar exponencialmente à medida que aumenta a agregação do solo. Nesses poros, atuam forças capilares responsáveis pela intensa retenção de água, de forma indisponível às plantas.

Os solos cultivados podem apresentar alta qualidade, desde que os sistemas agrícolas sejam bem planejados e contemplem, além de uma diversidade de espécies de plantas, cobertura protetora para o solo, principalmente durante o período chuvoso e a ausência de revolvimento do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

A degradação do solo compromete e deprecia a sua qualidade, provocando déficits no desempenho de suas funções e depleção de importantes atributos físicos, químicos e biológicos. Solos degradados se encontram em estado de desequilíbrio, pois enfrentam perdas de compostos minerais, orgânicos, porosidade e biodiversidade, resultando em erosão, compactação e esterilidade (EIJACKERS, 2004). O desequilíbrio no sistema pedológico também pode estar relacionado à adição de sais, sedimentos, metais pesados e compostos orgânicos.

A erosão é um processo de perda de solo, de ocorrência natural ou induzida, de acordo com a sua origem: geológica ou antrópica, respectivamente. Os agentes erosivos podem ser chuva, vento, uso, animais, gelo, mar, rios e outros. A erosão acelerada pela ação antrópica propicia expressiva instabilidade no ecossistema, resultando em impactos negativos nas funções e serviços do solo e na transformação/dissecção da paisagem (LAL, 2014) (Figura 3). Dela podem ainda resultar severos processos de contaminação e de assoreamento dos cursos d'água e reservatórios, como sinaliza o autor ao apontar a ocorrência de impactos nos ambientes aquáticos.

A erosão hídrica é causada pelo impacto das gotas de chuva e subsequente escoamento das águas pluviais nos terrenos. Pode derivar de fluxos laminares ou difusos – denominada de erosão laminar – ou concentrados em linhas, como sulcos, ravinas e voçorocas de grandes



Figura 3. Efeitos adversos da erosão acelerada nas funções e serviços ecossistêmicos (Modificado de LAL, 2014).

proporções (MORGAN, 2005). Dependendo da morfologia do terreno e das condições de fluxo de subsuperfície, podem ainda ocorrer processos de erosão interna e de eluviação do maciço, com consequências que podem ser graves.

O processo erosivo provocado pelo movimento da água sobre a superfície se subdivide em três etapas: i) **salpicamento**, quando a energia cinética da gota de chuva impacta e pulveriza o solo; ii) **transporte**, é atuação da água como veículo para deslocar as partículas pulverizadas de um lugar a outro e, iii) **deposição**, é o acúmulo de material transportado em porções rebaixadas do terreno, onde as forças de movimento se equilibram (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1995). A essas etapas pode ser acrescentada uma quarta, que antecede o transporte ou a ele se acopla, referente ao arrancamento das partículas de solo por força do fluxo superficial.

Dependendo das características locais, o solo erodido pode se depositar nas áreas rebaixadas, formando um novo solo, ou assorear lagos, reservatórios e cursos d'água (BLANCO; LAL, 2008) (Figura 4).



Figura 4. Erosão do solo próximo a reservatório hídrico (a). Solo aluvial formado pela deposição de sedimentos erodidos a montante (b). Sedimentos depositados em curso hídrico causando assoreamento do canal (c) (Fotos: Renata S. Momoli).

A presença de solo nos corpos hídricos deprecia a qualidade da água, provocando diversos efeitos negativos ambientais e econômicos: aumenta a turbidez da água e a demanda biológica por oxigênio (DBO), interferindo no metabolismo de organismos aquáticos, e introduz elementos químicos poluentes, tais como metais pesados e compostos orgânicos.

4.2 Processos hidrológicos de Superfície e Subsuperfície

A fase sólida é composta por elementos minerais da Litosfera e elementos orgânicos da Biosfera e, entre as partículas sólidas do solo, formam-se espaços vazios, denominados poros. Os poros são ocupados por água e/ou ar, respectivamente fase líquida e fase gasosa, e representam a interface com a Hidrosfera e a Atmosfera.

A água excedente aos poros do solo se acumula temporariamente sob a forma de rios, lagos, oceanos, reservatórios, água no solo ou no subsolo. Assim, o solo desempenha papel fundamental na regulação hídrica, pois funciona hidrológicamente como um meio poroso carregado eletricamente que absorve, purifica, transporta e libera água (FAO, 2013).

No ciclo hidrológico, a água encontra-se na atmosfera ou a seu caminho, armazenada no solo ou a ele sendo conduzida e fluindo na superfície dos solos e rochas. Portanto, no ciclo da água, faz-se necessário considerar que ela quase sempre se encontra em movimento, seja na atmosfera, no solo ou rocha ou sobre estes. Sua movimentação no solo ou rocha ou em superfície compõe o movimento hidrológico que pode gerar processos erosivos e/ou de eluviação.

Os estudos hidrológicos podem ser compartimentados, considerando-se diferentes graus de compartimentação, indo de bacias hidrográficas a sub-bacias, podendo atingir áreas mais restritas dotadas de particularidades específicas como, por exemplo, as características de superfície: plana, côncava, convexa, etc. De modo natural, a entrada da água nesses compartimentos se dá por meio de precipitação, aí se incluindo a chuva, o orvalho, a neblina, a geada e a neve, ou por meio do fluxo de subsuperfície. Já a saída pode se dar por meio de evaporação, evapotranspiração, movimento gravitacional de geleiras, movimentos de fluxo superficial, infiltração e fluxo de subsuperfície. Nas áreas de cultivo, as formas de entrada e saída da água são suscetíveis de gerar processos erosivos, sendo fundamental, para mitigá-los ou mesmo evitá-los, a adoção de técnicas de manejo apropriadas.

As Figuras 5a e 5b mostram respectivamente, por meio das raízes suspensas do ipê amarelo e da palmeira, que, tanto em áreas destinadas ao plantio como naquelas destinadas à pecuária, os processos erosivos podem se fazer presentes, fundamentalmente em consequência da adoção de técnicas de manejo inapropriadas.

Sendo a hidrologia o ramo da ciência que estuda a distribuição, interação e comportamento da água em relação à crosta terrestre, esta assume papel de grande relevância no estudo dos processos erosivos. A distribuição hidrológica da água depende da forma do relevo em superfície e subsuperfície, das características e do estado do solo ou rocha de superfície, da cobertura do solo e de sua interação com a água e com a atmosfera, o que, em conjunto, define o seu comportamento. O cultivo do solo, quase sempre, afeta intensamente todos esses aspectos, quais sejam, o relevo de superfície, a cobertura do solo, a capacidade de interação solo-água-atmosfera e, ao alterar a infiltrabilidade da água, modifica também o fluxo



Figura 5. Erosão laminar em área agrícola (5a – Sidrolândia, MS, autora: Vanessiele Joana Vital Lima, 2016) e de pecuária (5b – Bonito, MS, foto: José Camapum de Carvalho, 2016).

de subsuperfície. Mas, além disso, o cultivo pode ainda, por meio dos insumos e defensivos agrícolas, afetar o balanço eletroquímico do solo, propiciando a sua degradação estrutural e, por consequência, a própria distribuição hidrológica da água, desencadeando ou acelerando processos erosivos.

Fazem-se necessários, então, estudos e ações preventivas para que se evite ou mitigue os impactos ambientais oriundos da alteração da distribuição hidrológica de superfície e subsuperfície. O cultivo em curvas de nível e terraços, a alternância de culturas, a preservação de faixas de proteção e contenção de sedimentos e o estabelecimento de pequenas bacias de retenção são elementos que, se bem planejados e estudados, podem mitigar a perda de solo provocada pela erosão laminar, como estampado nas Figuras 5a e 5b.

A alteração hidrológica, ao propiciar e ampliar a erosão do solo, tem por consequência o assoreamento de cursos d'água e reservatórios. A Figura 6 ilustra o problema em um pequeno reservatório rural, destinado a satisfazer a demanda de água de animais. Observa-se, nesse caso, que a remoção da mata ciliar aliada à formação de caminhos preferenciais para a água, em razão do pisoteio dos animais, está a gerar erosão na borda do manancial, bem como assoreamento no pequeno reservatório.



Figura 6. Reservatório em área rural de Bonito, MS (Foto: José Camapum de Carvalho, 2016).

4.3 Fatores condicionantes dos Processos erosivos hídricos

A erosão hídrica é condicionada a fatores naturais como clima, topografia, cobertura vegetal e atributos físico-químicos; a interação entre esses fatores determina a magnitude e a taxa de perda de solo. Fatores antrópicos como uso do solo, tipo de cultivo e até mesmo condições socioeconômicas também podem influenciar, promovendo ou reduzindo a ocorrência de processos erosivos, de acordo com o manejo adotado (BLANCO; LAL, 2008). Além dos fatores mencionados, a ocorrência da erosão envolve parâmetros controladores, a erosividade e a erodibilidade. A erosividade consiste no potencial da chuva em desagregar as partículas do solo, e é uma função da energia cinética da gota da chuva ao atingir a superfície do solo. A erodibilidade se refere à suscetibilidade do solo em sofrer desagregação ou simples desprendimento de partículas, e é uma função da textura e estrutura do solo.

4.3.1 Clima

A precipitação é, geralmente, o principal fator climático que interfere na deflagração e continuidade dos processos erosivos. Apesar disso, fatores como umidade, temperatura e velocidade dos ventos também podem influenciar ativamente em menores proporções (BLANCO; LAL, 2008). A presença ou ausência, além do conteúdo de água, seja na forma líquida ou gasosa, contribui para aumentar ou reduzir as forças atrativas de adesão e coesão entre as partículas sólidas do solo. A ocorrência de chuvas e/ou estiagens frequentes e intensas facilita a erosão, pois, além de eventuais processos de fissuramento e deslocamento do solo, a variação do conteúdo ar/água e da pressão interna dentro do poro provoca o rompimento dos elos entre os agregados e muitas vezes dos próprios agregados. Cabe salientar que, para ponderar o peso dos diferentes fatores que influenciam na deflagração e evolução dos processos erosivos, seria muito relevante analisar as energias envolvidas, pois o mecanismo erosivo é fruto do desequilíbrio das energias internas e externas que atuam no solo.

No Estado de Goiás, a precipitação média anual é de 1.532 mm, com chuvas com alta capacidade de causar erosão no solo, cuja erosividade varia entre 8.000 e 10.000 MJ.mm.ha.⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ (SILVA, 2004). A distribuição da precipitação durante o ano apresenta duas estações bem demarcadas, uma estação chuvosa de Outubro a Abril e uma estação seca de Maio a Setembro. Nas áreas dos reservatórios Furnas, a taxa de precipitação durante o período chuvoso é de 1.300 a 1.400 mm para Itumbiara, e de 1.400 a 1.500 mm para Batalha. Durante o período seco, a precipitação cai para 75 a 100 mm na região do reservatório de Itumbiara, e para 100 a 125 mm na região do reservatório de Batalha.

Monitoramento pluviométrico realizado na região sul do Estado de Goiás revelou a ocorrência de eventos de alto potencial erosivo, com valores médios de 13,57 mm/15 minutos e máximos de até 60,71 mm/15 minutos (MOMOLI, 2011).

A ocorrência de chuvas de alta erosividade durante os meses de Novembro e Dezembro, quando os campos agrícolas estão em fase de preparo do solo e semeadura é especialmente crítica. Nesse período, as chuvas atingem o solo desprovido de cobertura vegetal, desprendendo-o facilmente, enquanto o intenso tráfego de máquinas e implementos sobre o solo úmido ou molhado o compacta, reduzindo a permeabilidade à água e a infiltração. Decorre,

em consequência, aumento no volume e velocidade da enxurrada, suscetível de gerar grande perda de solo nas lavouras, provocando intensa degradação, depreciação e desvalorização das terras. Destaca-se que, nas regiões de cerrado, como o manto de intemperismo é geralmente espesso e pobre em nutrientes, requerendo adubação quase sempre, os efeitos da erosão superficial não são percebidos a curto prazo, apesar de ocorrerem como evidenciado nas Figuras (5a e b).

4.3.2 Topografia e morfologia

O fator topográfico possui extrema relevância no processo de erosão hídrica, pois condiciona a direção e velocidade dos fluxos hídricos. A topografia dos terrenos controla o fracionamento da água precipitada em duas parcelas: infiltração e escoamento superficial. A perda de solo ocorre quando a capacidade de transporte do escoamento superficial supera a resistência do solo, o que pode acontecer em qualquer encosta inclinada. Tem-se, então, de um lado, a energia erosiva da água, que escoar superficialmente, e, do outro, a própria resistência do solo ou erodibilidade. Portanto, considerando-se a energia erosiva da água, a magnitude da perda de solo é diretamente proporcional ao aumento da declividade e/ou comprimento da encosta (BLANCO, LAL; 2008). Já a resistência do solo a essa energia erosiva da água depende de fatores intrínsecos como estrutura, textura e composição químico-mineralógica, bem assim do fator extrínseco sucção/capilaridade. A sucção/capilaridade é um fator extrínseco porque depende da umidade, mas é intrínseco enquanto dependente da porosidade, distribuição de poros e composição químico-mineralógica. A forma do relevo e sua orientação em relação ao sol e aos ventos condicionam a umidade presente no maciço. Destaca-se que, em princípio, solos com maior sucção/capilaridade – solos mais ressecados – resistem mais ao processo erosivo; no entanto, por ocasião do recobrimento do solo com uma lâmina d'água e da penetração da água no solo, que a suga com energia proporcional à sucção/capilaridade, ocorrerá, como já indicado, desprendimento de partículas no momento em que a pressão na fase ar ultrapassa a coesão do solo (JESUS, 2013).

Retomando a discussão sobre a influência da declividade na erosividade da água que escoar sobre a superfície do terreno, deve-se considerar a forma dessa superfície, pois o fato de ela ser côncava ou convexa modifica a energia no contato solo-água, ampliando-a ou aliviando-a, respectivamente.

Tem-se ainda que a forma dos terrenos reflete os processos evolutivos de dissecação da paisagem, ocorridos devido à incidência de agentes intempéricos sobre materiais rochosos originais. A resistência dos materiais rochosos frente aos ataques físico-químicos de desintegração ao longo do tempo resulta nas formas que se contemplam atualmente. Na região do entorno do reservatório Furnas, em Minas Gerais, as rochas apresentam alta variabilidade mineral (Ortognaisses granitóides, rochas máficas, ultramáficas e metassedimentares) e estrutural. Faixas de dobramentos originadas por movimentos tectônicos ocorrem associadas aos estáveis afloramentos cratônicos, refletindo na formação de superfícies geomórficas diversas: montanhosa, ondulada, suave ondulada e extensas planícies (Figura 7). Cada uma dessas formas de relevo responderá de modo distinto à erosividade da água, segundo o que se discutiu nos parágrafos anteriores.

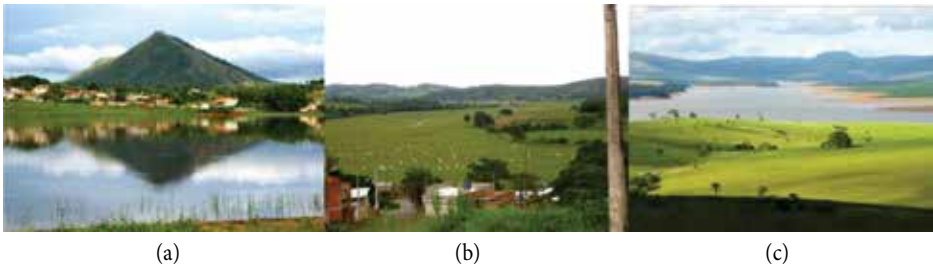


Figura 7. Variabilidade de aspectos topográficos dos terrenos do entorno do reservatório de Furnas, MG. Relevo montanhoso no Município de Campo do Meio (esquerda), planície de inundação em Formiga (centro) e relevo ondulado em Alfenas (direita) (Fotos: Renata S. Momoli).

Os efeitos da topografia na suscetibilidade à erosão dos solos podem ser avaliados utilizando-se ferramentas do Sistema de Informação Geográfica (SIG), no qual, a partir de modelos digitais de elevação, é possível obter informações sobre os desníveis entre os terrenos e mapas de declividade, altitude e curvatura de vertentes (Figura 8), viabilizando, assim, a análise de comprimento de vertentes, de forma de bacias hidrográficas e de cálculo da perda de solo.

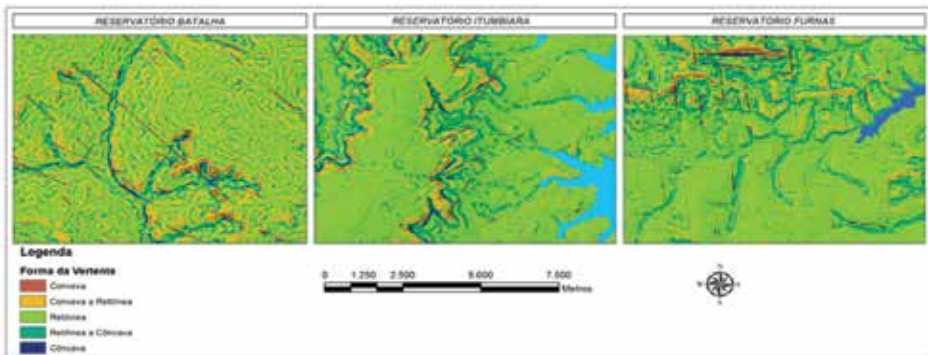


Figura 8. Mapa de Forma de Vertentes da região do entorno do reservatório Furnas, em Minas Gerais, e Batalha e Itumbiara, em Goiás (Mapa: Elizon Nunes).

Os terrenos adjacentes aos reservatórios de Itumbiara e Batalha, Goiás, ocupam tanto as movimentadas faixas de dobramento, quanto superfícies mais estáveis e aplainadas residuais da Plataforma Sulamericana. As áreas mais elevadas e aplainadas, entre 800-1200m, constituem as Coberturas detrítico-lateríticas do Terciário-Quaternário (TQdl), pouco dissecadas e retilíneas, enquanto as áreas rebaixadas são compostas principalmente por rochas metamórficas dos Grupos Araxá e Andrelândia, da Faixa de Dobramentos Brasília, e encontram-se fortemente dissecadas e côncavas.

Comparativamente, os terrenos adjacentes ao reservatório Furnas, MG, apresentam maior suscetibilidade à erosão do que os adjacentes aos reservatórios Itumbiara e Batalha, se considerada apenas a maior dissecção das superfícies. Entretanto, apesar de contar com extensas áreas pouco dissecadas sobre superfícies estáveis, os terrenos adjacentes à Itumbiara e Batalha vêm sofrendo com desmatamento, substituição por matriz agrícola e mecanização desenfreados, exibindo evidências de degradação por erosão hídrica acelerada (Figura 9).



Figura 9. Erosão concentrada na forma de ravina em terrenos elevados e aplainados com fraca dissecação, Município de Buriti Alegre, GO (a). Erosão em ravinas em encosta íngreme, Campos Gerais, MG (Fotos: Renata S. Momoli).

4.3.3 Cobertura vegetal e uso do solo

Reconhecida como elemento essencial na prevenção da erosão, a cobertura vegetal proporciona aumento na resistência do solo à erosão, estabilizando sua estrutura por meio do aumento do conteúdo e da atividade de matéria orgânica (BLANCO; LAL, 2008). A magnitude da proteção dada ao solo pela vegetação depende da arquitetura foliar e radicular de cada espécie de planta, da densidade de indivíduos/área e da idade da planta.

A matéria orgânica presente no solo e proveniente da vegetação melhora tanto as condições químicas quanto físicas do solo. Raízes de diferentes espessuras promovem a aglutinação das partículas de solo e a formação de agregados, demonstrando, assim, que a vida no solo assume caráter transformador ao longo do tempo e tem papel fundamental no equilíbrio ambiental e dele depende (Figura 10), Camapum de Carvalho *et al.* (2015).

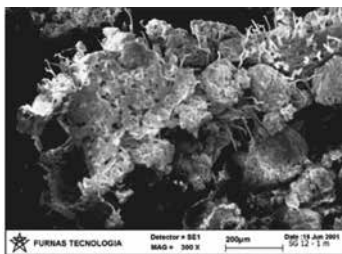


Figura 10. Imagem microscópica de raízes interagindo com os agregados de partículas presentes no solo, coletadas a 1 m de profundidade.

Em áreas cultivadas, a remoção sistemática do dossel da vegetação durante as etapas de cultivo e de colheita expõe o solo ao impacto das gotas de chuva e aos fluxos superficiais. A ocorrência de precipitações intensas durante o início do ciclo das culturas, quando o dossel ainda não oferece proteção suficiente para evitar a desagregação e remoção do solo, favorece a instalação do processo erosivo.

Na região do Cerrado brasileiro, nos Estados de Goiás e Minas Gerais, a cobertura vegetal florestal original, principalmente as fitofisionomias Cerrado e Cerradão, foram severamente alteradas. Fragmentos remanescentes persistem apenas ao longo das grotas e drenagens ou em áreas de solo raso ou encharcado, como nos Campos Rupestres, Matas de Galeria e Veredas (Figura 11).



Figura 11. Cobertura florestal original confinada às grotas, em Alfenas, MG (a). Fitofisionomia Cerrado, em Posse, GO (b) e Campo sujo em Corumbaíba, GO (c) (Fotos: Renata S. Momoli).

Os esparsos fragmentos de vegetação nativa encontram-se envolvidos em matrizes agrícolas, compostas predominantemente por pastagens, soja, milho, algodão, café e eucalipto (Figura 12).

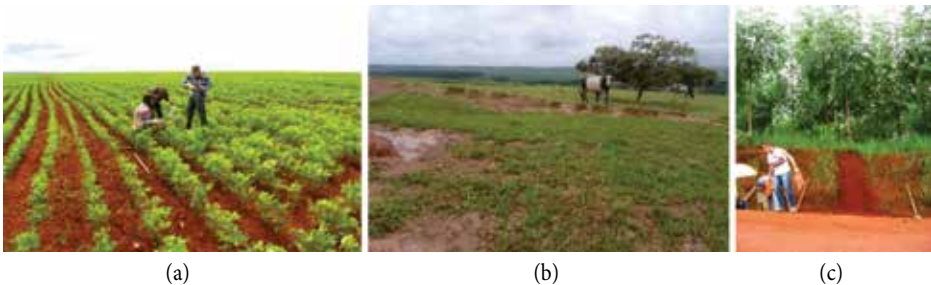


Figura 12. Cobertura vegetal predominantemente composta por plantas cultivadas como soja (a), pastagem (b) e eucalipto (c) (Fotos: Renata S. Momoli).

O uso do solo para cultivo de plantas alimentícias na região de Alfenas, MG, remonta ao início do século XIX. Entre os anos de 1850 e 1890, foram registradas alterações nos cenários econômicos que levaram à expansão do cultivo do café na região (MARTINS, 2013). Muitos destes cultivos ainda perduram até os dias atuais sobre solos férteis do sul de Minas Gerais.

Comumente, os solos menos férteis ou menos profundos se encontram cultivados com gramíneas para pastagem. As pastagens constituem a primeira etapa da conversão da cobertura vegetal original por plantas cultivadas durante os processos de expansão agrícola. Sucodem ao desmatamento e às queimadas e, quando sob sistema de pecuária extensiva, frequentemente encontram-se degradadas, com baixa taxa de cobertura foliar, e erodidas (Figuras 13a e 13b). Em algumas áreas, os caminhos preferenciais para o fluxo da água, gerados pelo pisoteio dos animais, favorecem a ocorrência de processos erosivos lineares. Estudos sobre erosão hídrica, realizados na Alta Bacia do Rio Araguaia, constataram a relação positiva entre a ocorrência de focos erosivos e o uso de solos arenosos para pastagens (CASTRO, 2005).

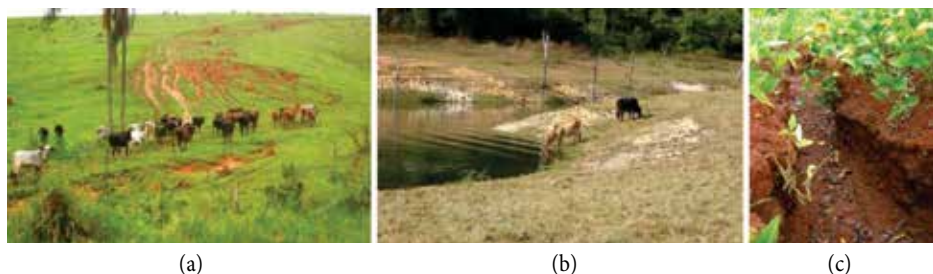


Figura 13. Pastagens degradadas com exposição do solo favorecendo avanço dos processos erosivos lineares (a) e laminares (b). Sulco de erosão em solo argiloso sob cultivo de soja (c) (Fotos: Renata S. Momoli).

Solos sob outros tipos de uso e cultivos podem apresentar evidências de degradação por erosão hídrica. Até mesmo solos argilosos estão submetidos aos processos erosivos em condições de manejo inadequado (Figura 13 c).

As extensas áreas elevadas e aplainadas do Estado de Goiás, com solos profundos e argilosos, vêm sendo convertidas em rentáveis cultivos de soja, milho e algodão desde 1970. Apesar da topografia suave e da textura argilosa que favorece a coesão entre partículas, tais áreas apresentam alta suscetibilidade à instalação dos processos erosivos, haja vista o longo comprimento de rampas presente na região das Coberturas detrítico-lateríticas do Terciário-Quaternário (TQdl). Há que se considerar ainda que, no manto profundamente intemperizado, geralmente as partículas de argila se encontram agregadas, formando grãos dos tamanhos silte e areia fina, ampliando, assim, a erodibilidade do maciço. Por exemplo, um solo argiloso com 55 % de argila e cultivado com soja apresentou-se fortemente erodido, com erosões lineares em sulcos e até mesmo em ravinas com mais de 1,0 m de profundidade. A análise granulométrica com dispersão em água revelou que mais de 90% da fração argila está agregada, sendo que estes agregados se encontram distribuídos justamente nas frações silte e areia fina (MOMOLI; COOPER, 2016), mais facilmente erodíveis (EMBRAPA, 2001).

A presença de relevo aplainado e de solos profundos com boa drenagem permite o desenvolvimento de agricultura fortemente mecanizada (Figura 14), o que quase sempre conduz o solo a situação de maior vulnerabilidade em relação aos processos erosivos.



Figura 14. Amplas superfícies elevadas e aplainadas com agricultura mecanizada de grãos, em Cristalina, GO (Fotos: Renata S. Momoli).

Diversos avanços tecnológicos são adotados para maximizar a produtividade dos campos cultivados, a exemplo de irrigação e aplicação de insumos (corretivos, adubos e defensivos). O Município de Cristalina, GO, concentra a maior área irrigada por pivô central da América Latina, com 50.722 hectares irrigados. Embora se verifique a adoção de técnicas

agrícolas avançadas e investimentos em maquinário e insumos, intervenções para prevenção e controle de processos erosivos, observadas nos campos cultivados da região, foram raras. Procedimentos arcaicos como plantio morro abaixo, excessivas arações e gradagens, ausência de elementos e estruturas que proporcionem cobertura do solo e desaceleração da enxurrada foram frequentemente constatados e associados a feições erosivas diversas.

A instalação de estradas rurais favorece o advento de processos erosivos, visto que a compactação do leito reduz a rugosidade superficial e promove aumento da velocidade da enxurrada. À medida que a velocidade aumenta, aumentam também a turbulência gerada pelo fluxo hídrico e a capacidade de desprendimento e transporte de solo, resultando em erosões lineares marginais ao leito da estrada (Figura 15a).



Figura 15. Erosão linear concentrada no leito de estrada rural em Alterosa, MG (a). Obra hidráulica mal dimensionada, em Buriti Alegre, GO (b). Evidência de perda de solo em fragmento florestal urbano protegido, sob solo argiloso, no Jardim Botânico de Goiânia (c) (Fotos: Renata S. Momoli).

Processos de urbanização no meio rural podem gerar efeitos negativos como a perda de solo resultante da instalação inadequada de tubulações adutoras, canais e barragens capazes de alterar expressivamente a paisagem (Figura 15b). A impermeabilização asfáltica dos solos urbanos pode provocar intensos processos erosivos, mesmo em áreas naturais, como no Jardim Botânico de Goiânia, onde a perda de solo é evidenciada pelas raízes das árvores (Figura 15c).

Também surgem erosões oriundas de lançamentos inadequados das drenagens realizadas nas estradas vicinais, o que pode ser evitado por lançamentos em bacias de retenção (Figura 16).



Figura 16. Município de Bonito, MS. (Foto: José Camapum de Carvalho, 2016).

Essa figura mostra, pela cor de da água drenada da via, que esta se submeteu a erosão superficial, por isso apresenta alto teor de sólidos em suspensão e alta turbidez.

4.3.4 Interação solo-atmosfera

A interação solo-atmosfera condiciona a sucção atuante no solo. Quanto maior a sucção, maior será a energia com que a água penetrará no solo, colocando sob pressão a fase ar. Quando a pressão na fase ar ultrapassa a coesão do solo, as partículas são desprendidas e passam a ser carregadas pelo fluxo superficial. Menores declividades da superfície do terreno e coberturas vegetais mais densas, além de dificultarem o desprendimento das partículas, favorecem a ampliação da taxa de infiltração.

Luiz (2012) mostrou, ao estudar solos do Município de Goiânia, que a energia térmica atuando na superfície do solo depende de sua cobertura e da orientação das vertentes. Essa energia térmica tem grande relevância na interação solo-atmosfera, intervindo diretamente na umidade do solo e em fenômenos hidrológicos como o da evaporação, evapotranspiração e capacidade de infiltração da água da chuva. Por meio de curvas características, essa autora pôde avaliar o potencial de retenção de água no solo em diferentes épocas do ano, evidenciando, assim, a interação solo-atmosfera e como, nessa interação, a água se distribuía nos poros do solo e como o estado hídrico do solo intervinha na infiltração da água da chuva.

O solo sofre variações estacionais de umidade, que, avaliadas para a seção de controle do solo (1,5 m de profundidade), definem o regime hídrico dos solos em: Áquico, no qual o solo se encontra saturado por água o ano todo; Údico, no qual o solo permanece seco por menos de 90 dias; Perúdicico, no qual o solo se mantém sempre úmido, sem stress hídrico; Arídico, no qual o solo se mantém seco por mais de 90 dias; Ústico (intermediário entre Arídico e Údico), no qual o solo se comporta de forma sazonal, apresentando-se seco por mais de 90 dias e úmido além de 90 dias; e Xérico, no qual há solos de locais com clima mediterrânico, ou seja, inverno úmido e frio e verão seco e quente (USDA, 2010).

4.3.5 Atributos intrínsecos dos solos

Os solos se organizam em diversas combinações de atributos mineralógicos, químicos (pH, CTC, presença de bases Ca, Mg, Na, Fe, Al e M.O.) e físicos (profundidade, textura, estrutura, porosidade e distribuição de poros). Tais atributos intrínsecos se interrelacionam de forma a conferir maior ou menor erodibilidade ao solo. A eles, associam-se atributos externos como a água e os compostos químicos que nela estão ou se fazem presentes. Os atributos presentes no solo variam em função da origem e processo de formação do solo. Exemplificando, os solos presentes no Bioma Cerrado se desenvolveram sobre diferentes rochas e materiais depositados, apresentando alta variabilidade de atributos que afetam a permeabilidade como, por exemplo, a profundidade e a presença de pavimento detrítico com presença de seixos rolados (Figura 17a), rochosos (Figura 17b) ou argilosos (Figura 17c).

O clima tropical, caracterizado por volumosas e intensas precipitações associadas a altas temperaturas, provoca intensas transformações nos materiais de origem e em seus minerais primários, denominadas intemperismo. Tais transformações podem ocorrer até em grandes profundidades, acima de 10m, dando condições à formação de solos profundos e constituídos

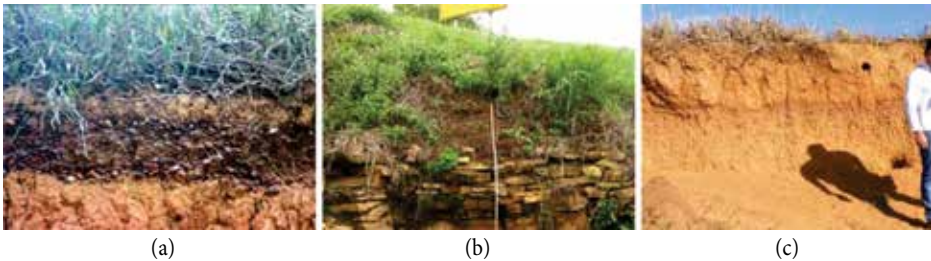


Figura 17. Solo argiloso raso com camada subsuperficial cascalhenta a 10 cm de profundidade (a). Solo orgânico-mineral raso com apenas 40 cm de horizonte desenvolvido sobre rochas quartzíticas do Grupo Araxá (b). Solo profundo com camada argilosa pouco permeável a 60 cm de profundidade recobrendo uma camada de cascalho e argila (c) (Fotos: Renata Momoli).

por minerais secundários como Caulinita, Hematita e Gibsita, derivados dos materiais de origem (Figura 18). Solos desenvolvidos sobre sedimentos podem apresentar profundidades elevadas, mesmo quando originados a partir de minerais resistentes ao intemperismo, como o quartzo.

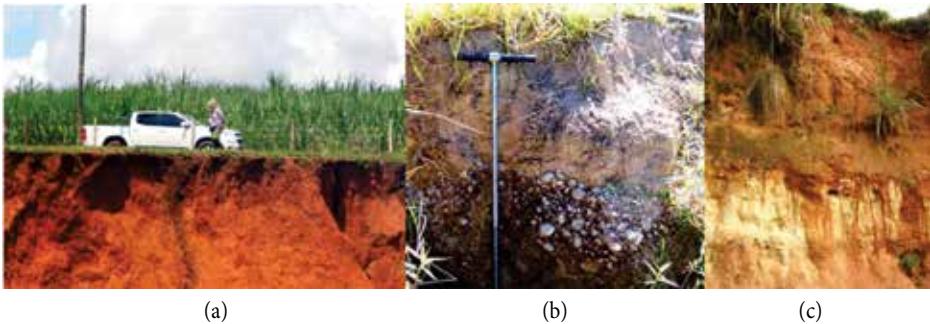


Figura 18. Solo argiloso profundo (> 600 cm) desenvolvido sobre rochas basálticas (a). Solo arenoso com 70 cm de horizonte desenvolvido sobre sedimentos detríticos (b). Solo argiloso profundo (200 cm) desenvolvido sobre laterita (c) (Fotos: Renata S. Momoli).

A estrutura do solo guarda estreita relação com a sua composição químico-mineralógica, com sua distribuição granulométrica e com as transformações pedogenéticas pelas quais passou. A Figura 15 mostra os resultados da análise mineralógica de um perfil de intemperismo tropical. Nela, evidenciou-se o predomínio de Gibsita, como mineral secundário até a profundidade de 4 m, sendo que, abaixo dessa profundidade, observa-se predomínio de Caulinita. A presença desses minerais secundários corrobora a tendência de um profundo perfil de alteração nos solos tropicais, correspondente a pelo menos seis metros de profundidade (Figura 19). Discussão mais ampla sobre a mineralogia dos solos é apresentada por Camapum de Carvalho *et al.* (2015).

O intemperismo provoca as primeiras alterações mineralógicas, sucedidas por alterações estruturais, em que materiais consolidados são convertidos em matéria friável e porosa, já na fase de pedogênese. Sob clima tropical, a taxa de conversão rocha/solo é relativamente rápida, e acontece via mecanismo de rearranjo das partículas minerais transformadas. Durante esse processo, alguns elementos são perdidos por percolação, enquanto outros, mais

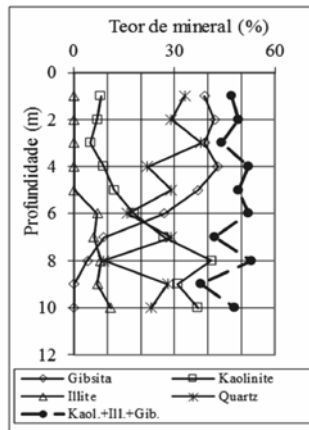
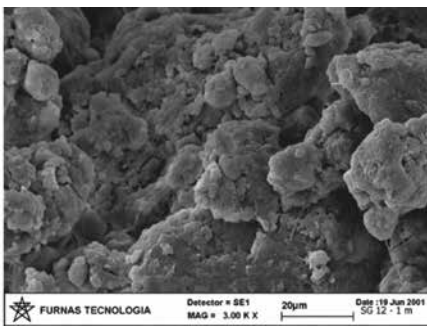


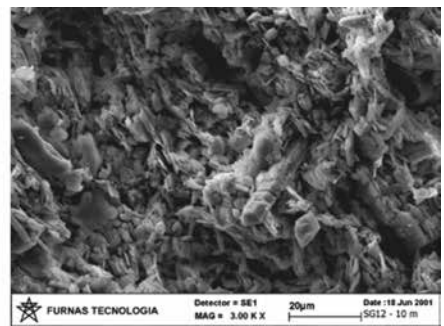
Figura 19. Mineralogia de um perfil de solo tropical (Carvalho 1995).

estáveis, tendem a se acumular. As partículas minerais remanescentes não sendo desgastadas, ao mesmo tempo em que se reorganizam e se reagrupam, formando os agregados do solo. Isso se reflete na formação de estrutura agregada ou pedacidade, desde que existam elementos capazes de atuar como cimentantes, tais como óxi-hidróxidos de ferro e alumínio e matéria orgânica.

Nessa esteira, a Figura 20a apresenta a microestrutura típica do solo tropical profundamente intemperizado, e a Figura 20b, a estrutura típica de um solo tropical pouco intemperizado. Embora análises mais detalhadas para esse perfil de solo tenham sido apresentadas por Guimarães (2002) e Lopera (2016), a Figura 16a mostra uma estrutura com presença de agregados formando macroporos entre eles e possuindo microporos em seus interiores, ou seja, intra-agregado. Esse tipo de estrutura apresenta então uma distribuição de poros bimodal, com microporos no interior dos agregados e macroporos e mesoporos entre eles.



(a)



(b)

Figura 20. a) Imagem microscópica de constituintes minerais de um solo coletado a 1 m de profundidade; b) solo coletado a 10 m de profundidade.

No solo pouco intemperizado, desaparece a estrutura agregada, cedendo lugar à presença de partículas isoladas ou comendo pacotes de argila (Figura 20b), o que proporciona uma distribuição de poros mais uniforme sem a presença dos macroporos drenantes.

A concentração iônica, ou seja, elementos químicos eletricamente carregados, interfere tanto nas forças de atração quanto na repulsão entre as partículas. As forças de atração entre as partículas, adesão e coesão dependem de ligações eletrostáticas como Pontes de Hidrogênio, Forças de Van der Waals e, em pH ácido, ligações eletrostáticas do tipo “face/borda”, que ocorrem entre arestas positivas e negativas de partículas de argila, formando arranjo do tipo “Castelo de Cartas” (FERREIRA *et al.*, 2010), semelhante à Figura 20b.

A concentração de determinados íons tem efeito na solubilização das partículas. A presença do íon Cálcio promove a floculação dos colóides do solo, enquanto o íon Sódio provoca dispersão das partículas, desmanchando os agregados e impactando negativamente a estrutura do solo. Posteriormente, as partículas desagregadas podem percolar em sentido descendente, entupir os poros em profundidade e originar uma camada impermeável em sub-superfície (FERREIRA *et al.*, 2010). Tal camada pode condicionar a formação de fluxo hídrico suspenso, tendendo a evoluir para feições erosivas do tipo “Pipping”.

Para facilitar a abordagem do problema, constam, nas Figuras 21 e 22, curvas granulométricas apresentadas por Roseno e Camapum de Carvalho (2007), para um perfil de solo do Distrito Federal. No estudo, os autores analisaram a influência da secagem e de agentes desagregadores químicos e mecânicos nas propriedades texturais de solos, que vão de profundamente intemperizado, Latosolo Vermelho coletado a 1m de profundidade ao solo de transição para o solo residual saprolítico coletado a 8 m de profundidade. Ao comparar as curvas granulométricas dos solos analisados, obtidas usando-se, como meios dispersores, o álcool e a água destilada (Figura 17), fica claro que, nesses solos tropicais, a água pura praticamente não tem efeito defloculador e/ou desagregador sobre os solos estudados quando não submetidos a processo de secagem prévia. É importante, porém, atentar para a qualidade da água, mesmo a da chuva, pois, muitas vezes, ela estando poluída pode atuar, dependendo do seu pH e composição, defloculando e/ou desagregando ou mesmo floculando ou agregando o solo.

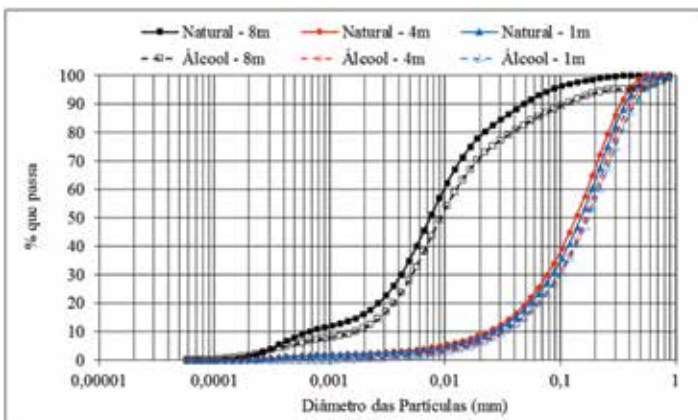


Figura 21. Efeito da água na granulometria ao longo do perfil de solo (modificado Roseno e Camapum de Carvalho (2007)).

A Figura 22 mostra o efeito desagregador exercido pelo ultrassom e pelo defloculante hexametáfosfato de sódio sobre o perfil de solo estudado. Fazendo-se um paralelo com as

áreas de cultivo, o ultrassom guarda relação com o pisoteio de animais e a passagem de máquinas agrícolas e o defloculante químico com os insumos agrícolas utilizados, lembrando, é claro, que estes, a depender do solo e de sua composição poderão também atuar como agentes floculadores ou agregadores.

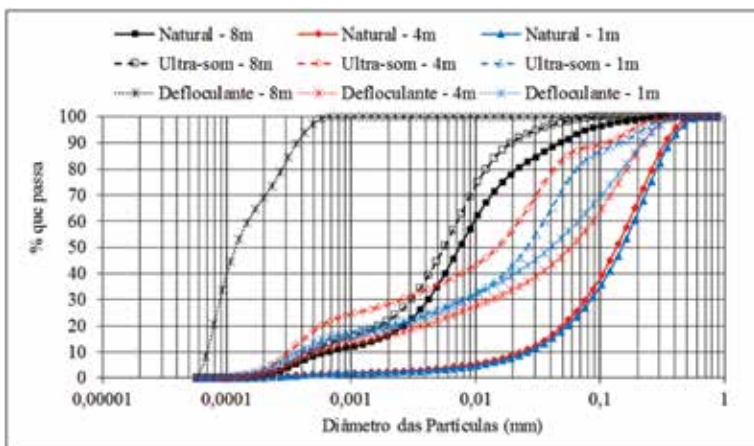


Figura 22. Desagregação por ação de defloculante químico e ultrassom ao longo do perfil de solo (modificado Roseno e Camapum de Carvalho (2007)).

As análises granulométricas apresentadas deixaram claro que elementos químicos adicionados aos solos profundamente intemperizados podem desagregá-los, Tudo depende do solo e do agente químico usado. Para ilustrar esse destaque, cita-se o trabalho apresentado por Dantas *et al.* (2015), no qual estudou-se dois Latossolos, um sendo o mesmo solo profundamente intemperizado do Distrito Federal, que vem sendo objeto da presente discussão, e o outro oriundo do Município de Aparecida de Goiânia, GO. Os dois solos foram tratados com diferentes teores de calcário dolomítico, composto, segundo a indústria, por 30% de CaO e 18% de MgO. Os teores usados foram superiores aos geralmente adotados no cultivo, buscando-se maximizar as alterações. Cabe destacar que, no manejo, não raro, vários pontos da área tratada ficam com teores elevados dos insumos, enquanto outros recebem uma carga insignificante. A Figura 23 mostra imagens dos dois solos tratados imediatamente após as misturas e 15 horas depois.

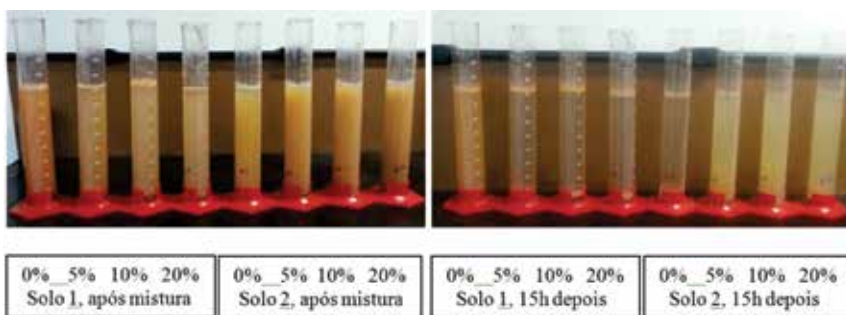


Figura 23. Efeito do calcário no estado de agregação de dois solos.

A Figura 24 (SILVA e SANTOS, 2005) mostra, para o mesmo solo profundamente intemperizado do Distrito Federal, que, ao se promover a correção do solo nas dosagens comumente adotadas na região, 0,2% de calcário e 0,025% de NPK, observa-se que a adubação com a adição de calcário e NPK conduziu o solo a apresentar maior compactação, em consequência da desagregação que sofreu.

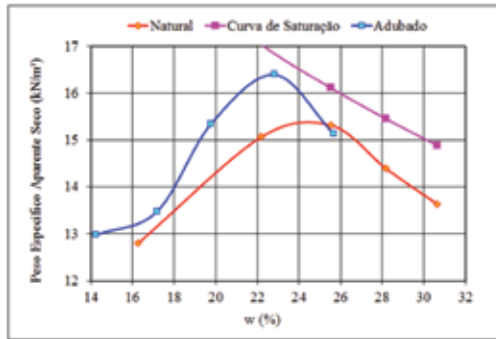


Figura 24. Curvas de compactação obtidas para um solo profundamente intemperizado, com e sem a adição de calcário e NPK.

As análises realizadas quanto aos impactos que os insumos agrícolas podem gerar em características dos solos, como, por exemplo, na textura e na curva característica de retenção de água, permitem avaliar os reflexos que eles podem propiciar na erodibilidade dos solos.

Os solos, ao se desagregarem, tornam-se mais erodíveis pela maior facilidade de desprendimento e transporte das partículas. Ao mesmo tempo, ao passar a apresentar uma textura mais fina, menos agregada, os macroporos inicialmente existentes cedem lugar para poros menores, elevando-se o potencial de retenção de água do solo para um mesmo teor de umidade. Quando o solo é recoberto por uma lâmina de água proveniente do fluxo superficial oriundo da precipitação pluviométrica, como já apontado, o solo sob sucção puxará essa água para o interior do maciço, gerando uma pressão neutra positiva na fase ar. Quando essa pressão neutra ultrapassa a coesão do solo, as partículas são desprendidas e arrastadas pela água. Já quando a pressão se mantém inferior, a oclusão gerada na fase ar impede a infiltração da água, o que, por sua vez, amplia o fluxo superficial e pode contribuir para a ampliação da erosão superficial (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2012).

Observa-se ainda dos resultados apresentados que a desagregação do solo, em consequência de sua calagem e adubação, amplia a sua compactabilidade e, por consequência, o seu potencial de redução de porosidade. Em campo, essa redução de porosidade pode ser ocasionada pelo pisoteio de animais, passagem de máquinas agrícolas ou ainda devido à atuação dos ciclos de molhagem e secagem do solo. Essa redução de porosidade tem como desdobramentos, entre outras duas consequências: ampliar o potencial de retenção de água do solo e impedir a infiltração, em ambos os casos, contribuindo para ocorrência de maior taxa de erosão superficial.

É evidente que não se está aqui a apregoar a não correção do solo para a prática de cultivo, mas sim a torná-la mais eficiente e menos danosa ao meio ambiente ao ampliar a erodibilidade do solo, possibilitando a ocorrência de assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Análises simples podem levar a técnicas de manejo mais apropriadas em solos com maior

risco de erosão, destacando-se, como técnicas apropriadas, o trabalho do solo em curvas de nível e terraço e a manutenção de leiras ou bacias de retenção.

Para ilustrar a ampliação dos processos erosivos em função do uso de insumos agrícolas, a Figura 25 mostra um caso onde uma voçoroca na área de expansão urbana da cidade de Anápolis, Estado de Goiás, foi submetida à adubação para plantio da leguminosa Sansão-do-Campo e da gramínea Bambu, de modo a se promover a estabilidade dos taludes.



Figura 25. Erosão sendo calcarizada e adubada (1998).

A Figura 26a, mostrando o lado esquerdo da erosão, apresenta um perfil de intemperismo de cor amarelada, e a Figura 26b apresenta o lado direito da erosão, constituído por um material vermelho escuro.



Figura 26. a) Talude em solo predominantemente amarelo; b) Talude em solo predominantemente vermelho (Fotos: José Camapum de Carvalho, 2007).

As Figuras 26a e 26b mostram, respectivamente, a que estado foram conduzidos o talude em solo amarelo e o talude em solo vermelho, nove anos depois do tratamento inicial realizado. O solo amarelo passou por acentuado processo erosivo, enquanto o solo vermelho manteve-se praticamente inalterado, mas também nele o plantio não subsistiu, provavelmente por força das elevadas sucções atuantes no maciço e em função de sua morfologia íngreme.

A avaliação do potencial desagregador e de erodibilidade desses solos foi feita de modo muito simples: usando-se três provetas para cada solo, na primeira, colocou-se 100 gramas do solo natural; na segunda, misturou-se a mesma quantidade de solo a 10% em peso de calcário; e na terceira, imergiu-se o solo e adicionou-se o mesmo teor de calcário. Observa-se, na Figura 27, que o solo amarelo desagregou-se, gerando suspensão, enquanto no solo vermelho ocorreu agregação (Figura 28).

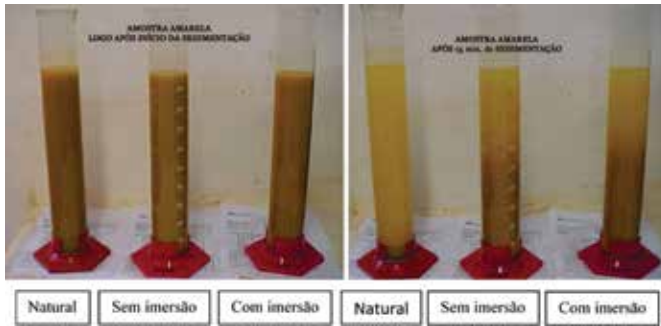


Figura 27. Influência do uso do calcário no estado de agregação do solo amarelo.

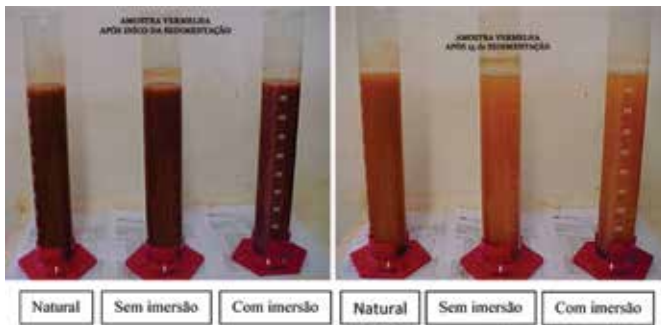


Figura 28. Influência do uso do calcário no estado de agregação do solo vermelho.

A aplicação de insumos agrícolas como adubos e corretivos introduz, no sistema solo, elementos químicos capazes de provocar alterações estruturais relevantes na resistência do solo ao desprendimento e transporte junto aos fluxos hídricos. A superfície dos colóides do solo possui cargas elétricas que reagem com os eletrólitos adicionados via insumos, interferindo na concentração de vários outros íons dispersos na solução do solo que compõem a Dupla Camada Difusa (DCD).

Solos excessivamente adubados podem apresentar interações físico-químicas semelhantes às observadas em solos salinos, agravadas em condições de irrigação e culminando em feições erosivas de grande porte, sendo necessária a adoção de medidas preventivas e corretivas contra a desestruturação do solo e a perda de suas funções.

5 Dendrogeomorfologia – perspectivas e tendências de monitoramento dos processos erosivos hídricos

Os processos erosivos devem ser mitigados para garantir a longevidade dos agroecossistemas. O sucesso da mitigação dos impactos em áreas degradadas implica estudos sobre o meio físico em diferentes escalas de observação, considerando-se a interferência humana. Estudos de acompanhamento da evolução dos processos erosivos permitem interferir a tempo, antes que tais processos ganhem proporções que inviabilizem técnica ou economicamente o controle da erosão.

Nesse cenário, técnicas que permitam aferir a ocorrência espaço-temporal da erosão e seus efeitos são essenciais para a tomada de decisões e planejamento do uso do solo. O uso de indicadores espaciais e temporais de baixo custo e fácil obtenção apresenta grande utilidade na avaliação dos processos erosivos. A eficiência desses indicadores está relacionada a sua ampla dispersão, abrangência e acessibilidade.

A Dendrogeomorfologia é uma metodologia que considera as árvores como testemunhos espaço-temporais do processo erosivo. Árvores que formam anéis de crescimento anuais em seus troncos possibilitam a datação da idade dos indivíduos e a posterior correlação cronológica com alterações ambientais. A perda de solo em torno das raízes ou a sua deposição junto ao caule podem provocar alterações anatômicas nas plantas, capazes de indicar ocorrência de erosão ou soterramento com precisão anual (HUPP, BAZEMORE, 1993) (Figura 29).



Figura 29. Processo erosivo em margem de corpo hídrico, evidenciado pela exposição de raízes de indivíduos arbóreos (a) (Foto: Renata S. Momoli). Processo erosivo em mata ciliar, evidenciado pelo soterramento de caules de indivíduos arbóreos (b) (Foto: Miguel Cooper).

Estudo sobre erosão em Latossolo Vermelho cultivado com soja revelou a idade dos sedimentos depositados numa mata ciliar que circunda uma vereda e abriga várias nascentes do Córrego Ponte Nova (MOMOLI *et al.*, 2011). Foi constatada a deposição de até 34 cm de sedimentos num período de 24 anos na base da espécie arbórea *Guarea guidonea* nativa do Cerrado goiano (MOMOLI *et al.*, 2011). Erosão em área urbana também pôde ser verificada, utilizando-se a técnica de Dendrogeomorfologia numa Unidade de Conservação urbana, o Jardim Botânico de Goiânia, onde a avaliação das raízes de indivíduos arbóreos situados numa encosta evidenciou a perda de solo e remobilização de sedimentos. Mesmo em encostas com declividade abaixo de 3%, verificou-se o aprofundamento de sulcos de erosão na ordem de até 8 cm em 6 meses, a partir do final da estação chuvosa (OLIVEIRA e MOMOLI, 2015).

6 Considerações finais

A ocorrência de erosão em áreas rurais depende de um conjunto de fatores associados e apresenta efeitos localizados e a longas distâncias. Os processos erosivos, uma vez deflagrados e não controlados, se avolumam, causando prejuízos progressivos. Assim, a erosão que se

inicia a partir do fluxo hídrico laminar pode, com a concentração do fluxo, ganhar energia cinética e evoluir para erosão concentrada em sulcos, posteriormente ravinas e finalmente voçorocas, momento em que a incisão alcança a profundidade do lençol freático.

A substituição da vegetação original por plantas cultivadas consiste na primeira etapa da fragilização do solo frente aos processos erosivos, provocando prejuízos imediatos à sua qualidade. Devido à importância e à necessidade da produção de alimentos, fibras e biocombustíveis, o manejo conservacionista do solo deve ser adotado.

O manejo inadequado das terras agrícolas pode comprometer irremediavelmente a qualidade ambiental e a produtividade econômica, culminando em pobreza do solo e desertificação. Os efeitos deletérios de hábitos de cultivo ultrapassados e/ou inadequados são potencializados pela expansão do agronegócio, que, alavancada pela sua importância no Produto Interno Bruto (PIB), impacta grandes áreas e compromete a longevidade da produção de agrícola.

Enfatiza-se que os reflexos dos processos erosivos não se limitam à redução da capacidade produtiva da área. Eles alcançam os cursos d'água e reservatórios, poluindo-os com insumos e defensivos agrícolas e assoreando-os. Trata-se este de um dos mais sérios efeitos a distância do processo erosivo que se inicia nos solos cultivados.

Referências

BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. **Revista brasileira de ciência do solo**. Viçosa, v.24, n.3, p.657-668, 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.

BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. Columbus. 2008. 638 p.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Tra. Igo Fernando Lepsch. Porto Alegre: Bookman, 2013. 589p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; REZENDE, L.R.; CARDOSO, F.B.F.; LUCENA, L.C.F.L.; GUIMARÃES, R.C.; VALENCIA, Y.G. Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. **Transportation geotechnics**, v. 5, pp. 3–19. 2015.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; BARBOSA, M.C.; MENDONÇA, R.M.G.; FARIAS, W.M.; CARDOSO, F.B.F. Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados. In: Camapum de Carvalho, J.; *et al.* (Orgs.) **Solos não saturados no contexto geotécnico**. pp. 39 - 78. 2015.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JUNIOR, G.F.N.; LEÃO CARVALHO, E.T. Considerações sobre aspectos relacionados aos sistemas de infiltração de águas pluviais. In: _____. (Orgs.). **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicada a solos tropicais**. pp. 621 - 637. 2012.

CARVALHO, M.N. Análise mineralógica de um perfil de solo do Distrito Federal através de raios X. **SEMINÁRIO SOBRE GEOTECNIA DOS SOLOS TROPICAIS**. Universidade de Brasília. Brasília. pp. 1-7. 1995.

CASTRO, S. S. Erosão hídrica na alta bacia do rio araguaia: distribuição, condicionantes, origem e dinâmica atual. **Revista do departamento de geografia**. USP. São Paulo. v. 17, p. 38-60, 2005.

COOPER, M.; TORRADO, P. V.; GRIMALDI, M. Soil structure transformations from ferralitic to nitic horizons on a toposequence in southeastern Brazil. **Revista brasileira de ciência do solo. Viçosa**. v. 34, pg. 1685-1699, 2010.

DANTAS, A. A. N.; MENDES, T. A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Influência da adição de calcário na estabilidade de solos tropicais. In: **XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**. Natal. 5 p. 2015.

DANTAS, K. P.; MONTEIRO, M.S. L. Valoração econômica dos efeitos internos da erosão: impactos da produção de soja no cerrado piauiense. **Revista de economia e sociologia rural**. Brasília. v.48. 2010.

EIJSSACKERS, H. J.P. Leading concepts towards vital soil. In: **Vital Soil: Function, value and properties**. Amsterdam: Ed. DOELMAN, P.; EIJSACKERS, H. J.P.. Elsevier. Developments in Soil Science - v. 29 - 2004. 340 p.

ELD Initiative . **The value of land: Prosperous lands and positive rewards through sustainable land management**. Disponível em <www.eld-initiative.org>. Acesso em: 25 mai.2016

FAO; ITPS - Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. **Status of the world's soil resources (SWSR): main report**. Rome, 2015.

EMBRAPA. **Avaliação da suscetibilidade natural à erosão dos solos da Bacia do Olaria, DF**. Planaltina: Embrapa Cerrados. 2001. 33 p.

FERREIRA, P. A.; SILVA, J. B. L.; RUIZ, H. A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N.S; LACERDA, C. F (Eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados**. . Fortaleza, INCT Sal, pg. 21- 42. 2010.

GUIMARÃES, R.C. **Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas**. 2002. 183 fl. Dissertação de Mestrado G.DM. – 090A/02, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília. 2002.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

HUPP, C.R.; BAZEMORE, D.E. Temporal and spatial patterns of wetland sedimentation, West Tennessee. **Journal of hydrology**. Amsterdam, v. 141, p. 179-196, 1993.

JESUS, A. S. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares: estudo de caso da cidade de Anápolis – GO.** 2013. 340 fl. Tese de Doutorado G.TD – 087/2013, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília. 2013.

LAL, R. Soil conservation and ecosystem services. **International soil and water conservation research.** v. 2, pp. 36-47. 2014.

LAL, R.. Land degradation and pedological processes in a changing climate. **Pedologist.** P. 315-325. 2012.

LAL, R.. Soil degradation by erosion. **Land degradation and development.** Oxford. v. 12. pg. 519-539. 2001.

LOPERA, J.F.B. **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados.** 2016. 149 fl. Dissertação de Mestrado G.DM. – 272/16, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. 2016.

LUIZ, G. C. **Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – município de Goiânia-GO.** 2012. 246 fl. Tese de Doutorado G.TD – 075/2012, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. 2012.

MARTINS, M. L. Plantar, pasturar e fiar na Vila Formosa de Alfenas, MG: décadas de 1850-1890. **Estudos econômicos.** São Paulo. v.43. pg. 397- 429. 2013.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International soil and water conservation research.** v.1, 2013.

MIEDMA, R. Applications of micromorphology of relevance to agronomy. **Advances in agronomy.** Amsterdam, v. 59, p. 119-169, 1997.

MOMOLI, R. S. **Dinâmica da sedimentação em solos sob matas ciliares.** 2011. 190 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2011.

MOMOLI, R.S.; COOPER, M. Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar. **Pesquisa agropecuária brasileira.** Brasília, v.51, n.9, p.xxxx-xxxx., 2016. No prelo.

MOMOLI, R.S.; COOPER, M.; CASTILHO, S. C. P. Sediment morphology and distribution in a restored riparian forest. **Scientia agricola.** Piracicaba, v.64, n.5, p. 486-494, 2007.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation.** 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 304 pp.

OLDEMAN, L.R.; HAKKELING, R.T.A.; SOMBROEK, W.G. **World map of the status of human-induced soil degradation.** Wagenigen. ISRIC. pp. 37- 48. 1991.

OLIVEIRA, T. B.; MOMOLI, R. S. Aplicação da dendrogeomorfologia na estimativa de erosão no Jardim Botânico Amália Hermano Teixeira, Goiânia (GO). In: I SIMPÓSIO INTER-

NACIONAL DE ÁGUAS, SOLOS E GEOTECNOLOGIAS - SASGEO. Uberaba. **Anais do I Simpósio Internacional de Águas, Solos e Geotecnologias**. v. 1. 2015.

ROSENO, J.L.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser. **III SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE**. Cuiabá. pp. 136-147. 2007.

RUITER, P. C. Balance and stability in vital soils. In: DOELMAN, P.; EIJSACKERS, H. J.P. (Eds.). **Vital Soil: function, value and properties**. Amsterdam: Elsevier. Developments in soil science - v. 29 - pp. 197-214. 2004.

SILVA, A.M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, Amsterdam, v.57, p. 251-259, 2004.

TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M.F.; DECHEN, S. C. F. The costs of soil erosion. **Revista brasileira de ciência do solo**. Viçosa. v. 35, pg. 287-298, 2011.

USDA Soil Survey Staff. **Key to soil taxonomy**. 11th. ed. Washington. Soil taxonomy, 2010. 338 p.

VASCONCELOS, E. L.; SILVA, T. T. S.; COSTA FILHO, G. E. P.; SILVA, L. M. S. Estimativa de perda de solo em áreas incendiadas: o caso da bacia hidrográfica do córrego taquari no Distrito Federal. **XIV ENEEAmb. II FÓRUM LATINO e I SBEA – Centro-Oeste**. Disponível em:

<<http://soac.unb.br/index.php/ENEEAmb/ENEEAmb2016/paper/viewFile/4861/1196>>
Acesso em: 1º maio 2016.

VERHEIJEN, F.G.A.; JEFFERY, S.; BASTOS, A.C.; VAN DER VELDE, M.; DIAFAS, I. **Biochar application to soils - a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions**. Luxembourg. Office for the official publications of the European Communities pp: 63-65. 2009.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.33, pg.743-755, 2009.

CAPÍTULO 18

Aporte de sedimentos de redes de drenagem tributárias de reservatórios de usinas hidrelétricas

Márcio Henrique de Campos Zancopé
Lucas Espíndola Rosa
Maximiliano Bayer
Marta Pereira da Luz

Palavras-chave: Potencial de transferência de sedimentos. Morfometria de redes de drenagem. Transporte sedimentar.

1 Princípios do transporte de sedimentos fluviais

A deposição transitória ou permanente de sedimentos ocorrida nos leitos dos rios e dos lagos é conhecida por assoreamento. Quando esse assoreamento ocorre no interior de lagos de barragem para aproveitamento hidroelétrico, hidroviário, abastecimento, irrigação, e/ou lazer, afeta a função para a qual foram criados. Nesses reservatórios, o assoreamento reduz a profundidade e o volume d'água útil e promove o soterramento de obras, estruturas e equipamentos. Além disso, nos cursos fluviais, em geral, ainda provoca erosão nas margens e aumento da frequência de transbordamentos.

Perez Filho, Quaresma e Rodrigues (2008) verificaram que os efeitos sobre a dinâmica fluvial com a instalação de barragens nos rios vão além do assoreamento na interconexão fluviolacustre dos remansos dos reservatórios. Eles identificaram o aumento da quantidade e do comprimento dos canais das cabeceiras (nascentes) da rede de drenagem dos afluentes de reservatórios no noroeste do Estado de São Paulo. Esse aumento ocorreu entre o momento anterior e o posterior da instalação das barragens e enchimento dos lagos. Essas mudanças na rede de drenagem estariam ligadas ao ajustamento da forma do perfil longitudinal dos cursos d'água, decorrente do encurtamento do comprimento total dos cursos fluviais e da elevação do nível topográfico dos respectivos exutórios (interconexão fluviolacustre) a partir do enchimento dos reservatórios. Tais mudanças promoveriam a retomada da erosão remontante nas cabeceiras de drenagem, levando ao reposicionamento para montante das nascentes e ao consequente aumento do comprimento dos canais afluentes dos reservatórios. Os efeitos na dinâmica fluvial não se restringem aos exutórios nos remansos dos reservatórios; eles alcançam as cabeceiras da rede de drenagem, em função da alteração da energia potencial gravitacional dos afluentes dos reservatórios, causada pelo novo gradiente fluvial. Esse gradiente é o quociente da diferença altimétrica entre as nascentes e os exutórios, na interconexão fluviolacustre, e o comprimento total do rio. A diferença altimétrica dos gradientes é alterada pela elevação topográfica dos exutórios, a partir do enchimento dos reservatórios.

As observações de Perez Filho, Quaresma e Rodrigues (2008) indicam que todo o sistema fluvial e a rede de drenagem são afetados pela instalação de barragens e enchimento dos reservatórios, demonstrando a complexidade da dinâmica fluvial. Quanto mais heterogênea for a litologia e maior for a influência de estruturas geológicas no escoamento fluvial na bacia hidrográfica, menor será a transmissão dos efeitos remontantes nos cursos d'água, provocados pelas barragens e reservatórios. Zancopé e Perez Filho (2006) demonstraram a influência da litologia e das estruturas geológicas na dinâmica do escoamento fluvial, verificando a distribuição longitudinal das planícies fluviais num rio. Segundo eles, a litologia e as estruturas geológicas afetam o transporte sedimentar, desenvolvendo áreas preferenciais de deposição, como as planícies fluviais, desacelerando a transferência de sedimentos à jusante. Similarmente, os efeitos remontantes das barragens e reservatórios são atenuados pela litologia e estruturas geológicas, as quais os cursos d'água transpõem.

Os barramentos nos cursos d'água, destinados à formação de reservatórios para funções diversas, são criados para regular as vazões fluviais, mantendo o volume de água útil dos reservatórios. A operação dos lagos dos reservatórios permite essa regulação, de modo a atender às funções para as quais foram criados. Concomitantemente, tais barramentos impedem a passagem da maior parte da carga de sedimentos transportados para jusante (CARVALHO *et al.*, 2000, p. 15). Na transição do ambiente fluvial para o lacustre, no remanso dos reservatórios, ocorrem mudanças nas propriedades hidráulicas do escoamento fluvial, como o aumento das áreas das seções transversais e a redução da velocidade do fluxo fluvial, por exemplo. Essas mudanças favorecem a deposição da carga sedimentar transportada pelos cursos d'água. Parece, assim, inevitável a ocorrência de assoreamentos em lagos de reservatórios, haja vista as mudanças nas propriedades hidráulicas na interconexão fluviolacustre e o intrínseco trabalho dos cursos d'água em conduzir sedimentos simultaneamente ao escoamento das águas.

O aporte de sedimentos aos lagos de reservatórios está intimamente ligado ao trabalho executado pelos cursos d'água. Todos os cursos naturais de água corrente, desde pequenos córregos até grandes rios, ao conduzirem o volume de água de montante para jusante através do leito fluvial, efetuam o transporte de sedimentos. À medida que a água escoou pelos leitos fluviais, carrega consigo uma variedade de partículas, desde dimensões moleculares, denominada carga dissolvida, passando por frações de argilas, siltes e areias, até blocos de rochas, em torno de um metro de diâmetro, constituindo a carga detrítica. A composição e forma das cargas sedimentares são tão variadas quanto o seu tamanho. A carga sedimentar transportada é obtida nas próprias margens do canal e no fundo do leito. Porém, conforme salienta Cristofoletti (1981), a maior parte dessa carga é fornecida aos cursos d'água pelo deslocamento detrítico sobre as vertentes e encostas dos vales, por meio da ação erosiva na superfície dos solos e regolitos. A carga dissolvida é obtida pelas reações químicas do intemperismo químico dos materiais disponíveis nas bacias hidrográficas.

A energia utilizada para o trabalho fluvial advém do escoamento da água no interior dos leitos fluviais, devido à atuação da força gravitacional, a qual atua sobre a resistência interna da massa d'água. Dessa maneira, promove-se o cisalhamento da coluna d'água, uma vez que a superfície do leito fluvial (margens e assoalho) exerce resistência externa, contrária à direção do deslocamento da água. Morisawa (1985) estima que 95% da energia de um rio é consumida para superar a resistência interna da água e a resistência externa do leito ao colocar a massa d'água em movimento. Parece restar pouca energia para o trabalho fluvial, mas

permite ao Rio Araguaia, por exemplo, descarregar 18 milhões de toneladas de sedimentos por ano no Rio Tocantins; enquanto permite ao Rio Paraná descarregar 112 milhões de ton/ano de sedimentos no Atlântico Sul (LATRUBESSE; STEVAUX; SINHA, 2005). A energia potencial gravitacional proporcionada pela elevação dos Himalaias permite aos rios Ganges e Brahmaputra descarregar entre 900 e 1200 milhões ton/ano de sedimentos no Oceano Índico (LATRUBESSE; STEVAUX; SINHA, 2005).

Esses exemplos demonstram que o transporte e descarga sedimentar são diferentes em bacias hidrográficas distintas. O mesmo ocorre ao longo de um único curso fluvial. Exemplos disso são rápidos e corredeiras, os quais constituem trechos fluviais em leito rochoso com predomínio de seixos e blocos de rocha. Apresentam essa configuração porque marcam a transição entre trechos de cursos d'água com gradientes fluviais diferentes. No caso das corredeiras, há aumento do gradiente quando o fluxo deixa o trecho montante e adentra as corredeiras à jusante. Com o gradiente maior, o fluxo fluvial acelera, devido à maior atuação da força de cisalhamento (componente tangencial gravitacional ou paralela à superfície do leito), permitindo o transporte de sedimentos de tamanho maior. Por essa razão, é que, nas corredeiras, há maior presença de seixos e blocos, uma vez que sedimentos de tamanho menor, como areias, foram carregados pelo fluxo mais veloz. À jusante das corredeiras, o leito volta a apresentar bancos arenosos, pois o gradiente é menor que nas corredeiras, fato que desacelera o fluxo, permitindo a presença de sedimentos arenosos no leito.

Estudos sobre a dinâmica fluvial mostraram haver correlação entre a velocidade do fluxo e o transporte de sedimentos. Em 1935, Filip Hjulström publica um estudo no qual apresenta um gráfico (Figura 1), ainda hoje usado para explicar a relação entre a velocidade do fluxo fluvial e a competência de um rio. Competência é o diâmetro da maior partícula que um rio consegue transportar.

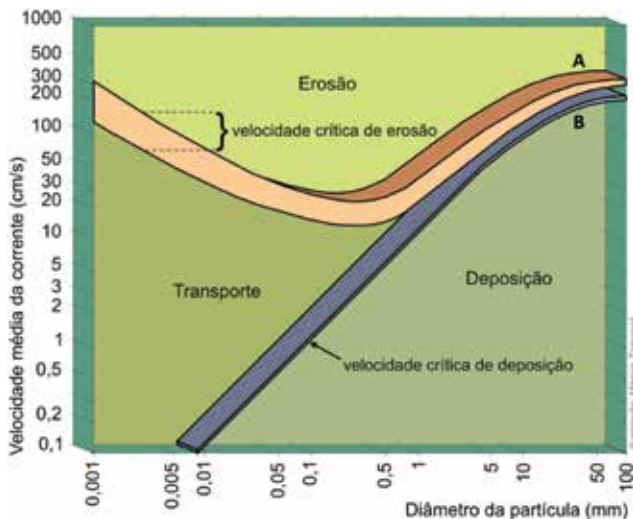


Figura 1. Relação erosão, transporte e deposição (HJULSTRÖM, 1935).

A curva 'A' no gráfico de Hjulström (Figura 1) representa as velocidades críticas de erosão, ou seja, aquelas velocidades mínimas necessárias para retirar os sedimentos do repouso.

Hjulström (1935) insiste que a curva da velocidade crítica de erosão deve ser entendida como uma faixa, pois depende, além do tamanho, da massa (e de sua densidade) do grão sedimentar e do fluxo turbulento. Como é possível observar pelo desempenho da curva, sedimentos maiores que 0,4 mm de diâmetro, aproximadamente, possuem velocidades críticas cada vez maiores quanto maior for o seu diâmetro (tamanho e velocidade são diretamente proporcionais para direita do gráfico). Esse desempenho está relacionado ao peso do grão: quanto maior seu tamanho, maiores serão sua massa e peso imerso, bem como a velocidade e a força necessárias para retirá-lo do repouso.

Por outro lado, grãos com diâmetros menores que 0,4 mm também necessitam de velocidades críticas cada vez maiores quanto menor for o seu diâmetro (inversamente proporcional para esquerda do gráfico). Nesse caso, o que deve ser superado para retirar o sedimento fino e muito fino do repouso não é o peso do grão, mas as forças de coesão entre os grãos, como a interação entre cargas elétricas na superfície de cristais de argila, por exemplo (KÄMPF, N.; MARQUES, J.J.; CURTI, N., 2012). Além disso, Morisawa (1985) menciona que a rugosidade do leito é cada vez menor quanto menor for o diâmetro predominante dos sedimentos. A rugosidade atua na produção de fluxos turbulentos, os quais apresentam, em diversos instantes, vetores de deslocamento diferentes ao do peso, favorecendo a força necessária para romper o repouso. Rápidos e corredeiras representam o auge dos fluxos turbulentos, justamente devido à maior presença de seixos e blocos.

A curva 'B' no gráfico de Hjulström (Figura 1) representa as velocidades críticas de deposição, as quais são as velocidades mínimas necessárias para manter o sedimento em movimento. Abaixo desses valores, os grãos sedimentares depositam-se. O desempenho da curva da velocidade crítica de deposição está relacionado ao tamanho e densidade do grão. Sedimentos maiores (mais massa), ou com densidades maiores, necessitam de maior velocidade do fluxo para mantê-los em movimento, o que é recíproco. Deve-se notar que sedimentos menores que 0,01 mm possuem velocidades críticas de deposição insignificantes ($< 0,1$ cm/s). Sedimentos desse intervalo de diâmetro permanecem em movimento, suspensos na coluna d'água, mesmo em ambientes lênticos de reservatórios, o que permite seu transporte para jusante, transpondo-se as barragens dos reservatórios. A deposição dessa classe de sedimentos obedece à Lei de Stokes, sobre a precipitação de partículas num meio viscoso. Variações físico-químicas da água e da concentração de partículas nos ambientes lênticos afetam a viscosidade, promovendo, somente então, a deposição desses sedimentos muito finos.

As curvas de velocidades críticas de erosão e de deposição, segundo Hjulström (1935), permitem perceber que, numa seção transversal, o aumento da velocidade, devido a um incremento da vazão por um evento de chuva, por exemplo, eleva a competência do rio, ou seja, leva ao transporte de sedimento de tamanho maior, bem como maior quantidade de sedimentos. Inversamente, a diminuição da velocidade, devido ao recesso da vazão pelo encerramento do mesmo evento de chuva, leva à deposição dos sedimentos maiores, primeiramente, e em seguida dos sedimentos menores.

Por outro lado, estas mesmas relações permitem perceber que, num rio, em determinado momento, numa dada velocidade, um tamanho específico de sedimento é transportado. Noutro momento, noutra dada velocidade, outro tamanho de sedimento é transportado. Determinado tamanho de sedimento permanece em repouso enquanto outro conjunto é transportado, demonstrando o transporte seletivo de sedimentos pelos cursos d'água. Como

a aceleração da velocidade do fluxo fluvial é gradual, à medida que o fluxo acelera, sedimentos que estavam em repouso entram em movimento. Isso explica o aumento da capacidade de transporte (maior quantidade de carga sedimentar) e, por conseguinte, da concentração de sedimentos, na fase de ascensão das vazões fluviais. Inversamente, à medida que o fluxo desacelera, sedimentos que estavam em movimento são depositados. A variação da velocidade, num dado intervalo de tempo numa mesma seção transversal, provoca variação no tamanho e quantidade de sedimentos transportados. Durante o período da cheia, na estação chuvosa do ano climatológico de uma bacia hidrográfica, os valores médios das vazões e das velocidades dos fluxos são maiores, permitindo o transporte de sedimentos maiores em maior quantidade, ou seja, descarga sedimentar elevada. No período da vazante, na estação seca da mesma bacia, as médias das vazões e das velocidades dos fluxos são menores, tornando difícil o transporte de sedimentos e, conseqüentemente, uma descarga sedimentar reduzida. Tais variações constituem a dinâmica do transporte sedimentar.

Não obstante, como já exemplificado, a velocidade do fluxo fluvial varia ao longo do tempo. Num ano climatológico, as vazões e as velocidades variam de mínimas, durante a vazante (estação seca), a máximas, durante o período de cheia (estação chuvosa). Observações empíricas apontam que a velocidade do fluxo fluvial varia também em profundidade na coluna d'água, lateralmente, numa mesma seção transversal, e longitudinalmente, nos cursos fluviais, tornando ainda mais complexa a dinâmica de transporte de sedimentos (CARVALHO, 2008).

A distribuição da velocidade da água em profundidade num canal fluvial mostra as menores intensidades situadas próximas ao fundo (Figura 2). Isso ocorre em função da resistência proporcionada pela superfície do leito (atrito) e do consumo da energia do fluxo pelo esforço de cisalhamento para a conservação do movimento da água. As velocidades máximas ocorrem entre 0,2 e 0,8 da profundidade, a partir da superfície da água, conforme Christofolletti (1981).

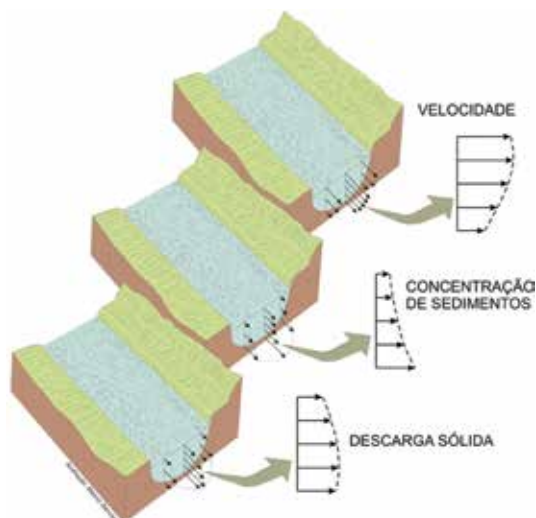


Figura 2. Distribuição da concentração de sedimentos em profundidade e na seção transversal (CARVALHO, 2008).

Contudo, as mesmas observações empíricas apontam que a concentração de sedimentos transportados mostra um desempenho inverso ao da velocidade do fluxo (Figura 2). Os maiores teores da concentração de sedimentos ocorrem mais próximos do fundo do canal. Assim, ocorrem devido à interação entre a velocidade do fluxo, o peso, o tamanho e a forma dos grãos sedimentares transportados e o fluxo turbulento. A partir dessa interação, alguns sedimentos são transportados pelo fundo, rolando ou se arrastando, a exemplo dos seixos. Outros, como as areias, são transportados saltando pelo fundo. A saltação ocorre em virtude do fluxo turbulento que produz velocidades críticas de erosão em certos instantes, lançando as areias em suspensão. Porém, no instante seguinte, o fluxo turbulento desacelera, produzindo velocidades críticas de deposição, assentando as mesmas areias no fundo. O fluxo turbulento novamente suspende as areias, que, no instante seguinte, assentam-se no fundo. A sucessão do ciclo suspensão-deposição constitui o transporte por saltação. A saltação restringe os sedimentos arenosos no terço inferior da coluna d'água no canal, uma vez que não é capaz de mantê-los suspensos livremente no fluxo turbulento ao longo do escoamento fluvial. Por fim, as partículas finas, como areia fina, siltes e argilas, por serem pequenas e de menor peso, são transportadas livremente em suspensão no fluxo fluvial. As argilas e o silte fino não apresentam velocidades críticas de deposição, conforme observado no gráfico de Hjulström (1935).

O resultado entre esses tipos diferentes de transporte da carga detrítica produz concentração mínima de sedimentos arenosos próxima à superfície da água e máxima junto a fundo do leito (Figura 2). Quanto maior a quantidade da fração da areia grossa no curso fluvial, maior será a concentração dessa fração junto ao fundo. Por outro lado, quanto maior a quantidade da fração da areia fina, maior será sua concentração em suspensão. A concentração de sedimentos finos (siltes e argilas), transportados exclusivamente em suspensão, distribui-se uniformemente da superfície ao fundo devido ao fluxo turbulento. A concentração de silte na coluna d'água mostra-se bimodal, ora mais próxima do fundo, quando mais grosso for, ora mais próxima da zona de maior velocidade, na metade superior da coluna d'água (CARVALHO, 2008).

Transversalmente, no canal fluvial, as velocidades do fluxo são menores junto às margens e maiores no centro. Por conseguinte, a concentração de sedimentos apresenta a mesma tendência.

A combinação entre a distribuição das velocidades e das concentrações de sedimentos é responsável pela distribuição da descarga de sedimentos (Figura 2), que é menor junto às margens e fundo do canal e maior no centro. Verticalmente, a descarga de sedimentos é mais intensa em torno de 0,8 da profundidade a partir da superfície da água, em função da combinação entre a distribuição das velocidades e das concentrações de sedimentos.

A dinâmica de transporte de sedimentos sofre, ainda, variação longitudinal nos cursos d'água. No curso superior dos rios, os gradientes fluviais são elevados, produzindo velocidades intensas do fluxo fluvial e levando ao predomínio de velocidades críticas de erosão para maioria dos sedimentos. A ocorrência de vales profundos e estreitos, de leitos rochosos com matacões e blocos e de planícies fluviais estreitas e restritas, ou ausentes em certos trechos, no curso superior dos rios, é consequência do predomínio das velocidades críticas de erosão. Gradientes elevados e predomínio de velocidades críticas de erosão produzem denudação, ou seja, maior exportação de sedimentos à jusante que a importação a partir das vertentes e

encostas dos vales. Se, por um lado, os gradientes fluviais elevados dos cursos superiores são atraentes para a instalação de reservatórios de usinas hidroelétricas, por outro lado, as taxas elevadas de denudação desfavorecem esses empreendimentos, em razão do aporte sedimentar e do assoreamento acentuados, comprometendo a vida útil dos reservatórios.

No curso médio dos rios, os gradientes fluviais são moderados, produzindo um equilíbrio entre velocidades críticas de erosão e de deposição. Nesse caso, a quantidade de sedimentos importados das vertentes e encostas, bem como daqueles transferidos a partir dos rios do curso superior é similar aos exportados ao curso inferior, caracterizando-se os cursos médios como uma zona de transferência de sedimentos. Por isso, no curso médio dos rios, ocorre a presença de planícies fluviais medianamente largas, de bancos arenosos pouco frequentes e instáveis no interior e margens dos canais e vales mais abertos, comparados aos do alto curso.

No curso inferior dos rios, os gradientes fluviais são muito baixos e a energia do fluxo é suficiente para manter o deslocamento da água. Nesse caso, a quantidade de sedimentos exportados através dos exutórios é menor que o importado a partir do curso médio, produzindo agradação. Em tais casos, as planícies fluviais são extensas e largas, com predomínio de sedimentos lamosos (argilas e siltes) depositados pelos transbordamentos. Há ocorrência frequente de bancos arenosos nas margens e no interior dos canais em certos casos. Os vales são rasos e aplanados, dificultando o lançamento de sedimentos aos cursos d'água, o que leva à ocorrência frequente de colúvios sobre as vertentes nessas porções inferiores das bacias hidrográficas.

As propriedades geológicas, geomorfológicas, pedológicas, fitogeográficas, climáticas e de uso e ocupação das bacias hidrográficas afetam profundamente a dinâmica do aporte de sedimentos. Numa análise geral dos grandes sistemas fluviais tropicais, Latrubesse, Stevaux e Sinha (2005) mostraram que o transporte de sedimentos está relacionado com as províncias geológico-geomorfológicas onde esses grandes sistemas fluviais estão instalados. Sistemas fluviais sobre cinturões orogênicos ativos têm alta produção de sedimentos. O já mencionado aporte elevado de sedimentos do Brahmaputra e do Ganges, ao drenar a porção meridional do cinturão orogênico dos Himalaias, é emblemático. Os tributários do Sistema do Amazonas que drenam o cinturão dos Andes são responsáveis por 90% do total da carga sedimentar.

Por outro lado, os sistemas fluviais sobre áreas cratônicas possuem baixo aporte sedimentar. O Rio Negro, ao drenar o Cráton Norte-Amazônico, carrega oito milhões de ton/ano de sedimentos, enquanto os tributários andinos do Rio Madeira carregam estimadamente entre 248 a 600 milhões de ton/ano, contribuindo com 50% da carga de sedimentos suspensos do Rio Amazonas. O Rio Congo, segundo maior sistema fluvial do mundo em descarga líquida, carrega 40 milhões de ton/ano de sedimentos. Essas relações podem ser explicadas na medida em que os rios apresentam correntes velozes e de alta energia, capazes de transportar grandes quantidades de carga detrítica, ao “descerem” das regiões elevadas dos cinturões orogênicos, em razão do elevado gradiente decorrente da amplitude altimétrica. Nas áreas cratônicas, o relevo costuma apresentar-se topograficamente mais aplanado por longos ciclos erosivos em duradoura estabilidade tectônica. Assim, ocorrem menores gradientes fluviais, promovendo rios com descargas de menor energia e, conseqüentemente, competência e capacidade de transporte menores.

A complexidade dessas relações aumenta ao se compararem sistemas fluviais sob domínios morfoclimáticos e fitogeográficos diferentes. Na região do Brasil Central, sobre cinturão orogênico muito antigo (Pré-cambriano), inativo e aplanados por longas fases erosivas, os rios Araguaia e Tocantins, com áreas de drenagem de 377 e 757 mil km² sob predomínio de cerrado (savana e/ou savana-florestada), carregam cerca de 18 e 58 milhões de ton/ano de sedimentos, respectivamente. Já o Tapajós e o Xingu, com áreas de drenagem de 490 e 504 mil km² sob floresta pluvial equatorial, em áreas do Cráton Sul-Amazônico, carregam cerca de seis e nove milhões de ton/ano de sedimentos, respectivamente. Nesses casos, a cobertura florestal mais densa intensifica os processos pedogenéticos e dificulta a ação erosiva, o deslocamento detrítico sobre as vertentes e encostas dos vales e o fornecimento de carga sedimentar aos rios. Nos casos em que a cobertura florestal é menos densa, a ação erosiva sobre as vertentes deslocaria maior quantidade de detritos, fornecendo mais carga sedimentar aos rios.

O uso e ocupação humana nas bacias hidrográficas afetam sua dinâmica sedimentar. Latrubesse *et al.* (2009) verificaram um aumento de 31% da carga do leito (fundo) no período de 1965 a 1998 no curso médio do rio Araguaia, entre as cidades goianas de Aragarças e Luiz Alves. A carga passou de 6,6 milhões de toneladas em 1965 para 8,8 milhões de toneladas em 1998. Segundo eles, tal aumento está relacionado ao desmatamento do Cerrado e às práticas agrícolas não conservacionistas, durante o mesmo período, nas sub-bacias tributárias do alto curso do Rio Araguaia, no sudoeste goiano e sudeste mato-grossense. Ao mesmo tempo, Castro (2005), Oliveira e Castro (2005) e Marinho, Castro e Campos (2006) demonstraram a elevada ocorrência de focos erosivos naquelas mesmas regiões, resultantes da incompatibilidade entre o uso das terras, a aptidão dos solos e o manejo agrícola empregado nas lavouras. O aumento da carga do médio Araguaia de 1965 a 1998 corresponde à resposta do sistema fluvial ao desmatamento do Cerrado e às práticas agrícolas, demonstrando a influência do uso e ocupação das bacias hidrográficas sobre a dinâmica do aporte de sedimentos.

Ademais, o uso dos rios por meio da instalação de barragens e reservatórios artificiais poderia ser considerado benéfico, já que provoca a retenção da carga sedimentar e assoreamentos à jusante. Contudo, o aporte sedimentar dos rios nas zonas litorâneas é responsável por fornecer sedimentos que compõem as praias. Menor aporte de sedimentos nos estuários e deltas não supre o carregamento dos sedimentos praias pelas correntes litorâneas, promovendo erosão marinha das praias adjacentes. O fenômeno da erosão das praias da capital pernambucana é exemplo do desequilíbrio no balanço sedimentar costeiro, resultante da interrupção do deslocamento dos sedimentos litorâneos pelas estruturas do porto de Suape. A retenção de sedimentos pelas barragens beneficiaria, à jusante, o abastecimento, a irrigação e o turismo aquático, dada a redução da turbidez, não fosse a diminuição do volume d'água, da profundidade necessária à navegação e da vida útil dos reservatórios.

2 O transporte de sedimentos em redes de drenagem

Os rios não constituem cursos d'água naturais solitários, sendo muito pouco frequentes rios sem cursos d'água afluentes. Os rios estão associados entre si, formando uma rede de canais que escoam através da bacia hidrográfica. Como cada rio drena o excedente hídrico da bacia hidrográfica e evacua os sedimentos produzidos em seu interior, as redes de drenagem

fluvial são responsáveis por executar o mesmo trabalho, porém coletivamente. Esse trabalho das redes de drenagem desempenha enorme função denudacional nos continentes. Ab'Saber (1949; 1972) a muito constatou a participação das redes de drenagem na evacuação de sedimentos e na esculturação do relevo brasileiro, conforme exemplos da Depressão Periférica Paulista e das Depressões Marginais Sul e Norte Amazônicas, ocorridas a mais de 20 milhões de anos.

Os rios são interconectados nas bacias hidrográficas por redes hierarquizadas de canais, formando sistemas tributários e distributários. Os sistemas tributários, conforme o termo sugere, permitem a arrecadação de água e carga sedimentar num rio principal, a partir dos cursos d'água contribuintes afluentes. Inversamente, os sistemas distributários promovem a difusão de água e sedimentos, a partir do rio principal, para os cursos d'água secundários.

A imagem mais marcante que exemplifica a configuração das redes de drenagem entre sistemas tributários e distributários é a de uma árvore. Em termos muito simples, as raízes de uma árvore arrecadam água e micronutrientes necessários às funções fisiológicas. Da mesma forma, ramos e galhos são responsáveis por distribuir, a partir do caule, água e micronutrientes até as folhas mais distantes, para a realização da fotossíntese. As redes de drenagem com canais convergindo para o rio principal são sistemas tributários como as raízes de uma árvore. Por outro lado, as redes de drenagem com canais divergindo a partir do rio principal são sistemas distributários, como a ramagem de uma árvore (Figura 3).

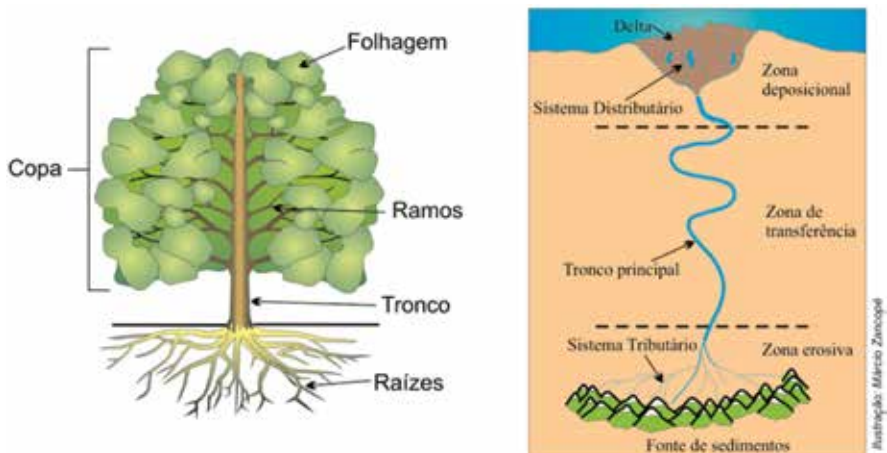


Figura 3. Analogia entre a estrutura arbórea (esquerda) e as zonas das bacias hidrográficas (sistemas tributários e distributários).

Redes de drenagem de sistemas distributários são muito frequentes na natureza, embora não dominem o conhecimento popular como tal. Leques aluviais em ambientes fluviais, como do Okavango em Botsuana, na África Meridional, e do Rio Taquari no Estado do Mato Grosso do Sul, bem como desembocaduras fluviais em delta, como dos rios Mississippi e Nilo, representam exemplos de sistemas distributários (Figura 4). Por outro lado, redes de drenagem de sistemas tributários são amplamente divulgadas, a ponto de dominar o senso comum. Os padrões de drenagem dendrítico, paralelo, radial, anelar, entre outros, constituem exemplos de sistemas tributários (Figura 5).



Figura 4. Redes de drenagem distributárias. No sentido horário, a partir da imagem superior-esquerda: Delta do Okavango (Botswana, África Meridional), Megaleque do Rio Taquari (Mato Grosso do Sul, Brasil), Delta do Nilo (Egito) e Delta do Mississippi (EUA).

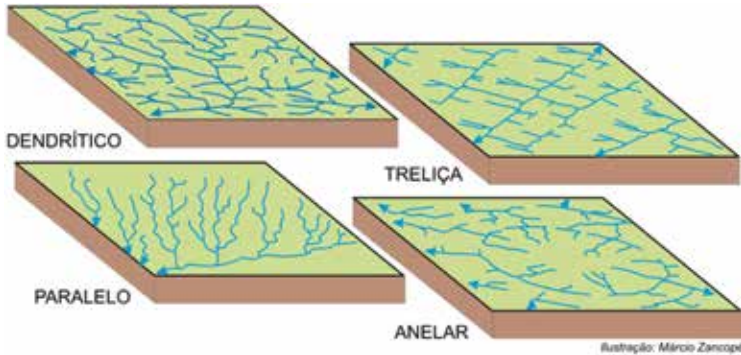


Figura 5. Padrões de drenagem.

A imagem da árvore, como analogia da configuração das redes de drenagem entre sistemas tributários e distributários, se estende para além da forma, alcançando a dinâmica do transporte sedimentar. Redes de drenagem distributárias, difusoras de água e carga sedimentar, constituem sistemas agradacionais, formando, por esta razão, cursos d'água em leito aluvial e leques aluviais, como do Okavango e do Rio Taquari.

No entanto, redes de drenagem tributárias, arrecadoras de água e de carga sedimentar, constituem sistemas denudacionais. Isso acontece devido ao déficit no balanço sedimentar desses sistemas tributários (denudacionais), nos quais as redes de drenagem das sub-bacias contribuintes evacua, através do exutório, volume maior de sedimentos que aqueles lançados nos cursos d'água, por meio da ação erosiva na superfície dos solos e regolitos das verten-

tes dos vales. Por essa razão, os sistemas fluviais tributários (denudacionais) possuem cursos d'água em leito rochoso, predominantemente.

Deve-se mencionar que são muito frequentes, nos sistemas tributários, trechos de cursos d'água em leito aluvial alternados por trechos em leito rochoso. Essa alternância se deve à presença de estruturas geológicas e litologias resistentes sob os cursos d'água, que acabam afetando os processos de transporte da carga sedimentar. Zancopé e Perez Filho (2006) observaram no Rio Mogi Guaçu, interior do Estado de São Paulo, a alternância entre trechos em leito rochoso e leito aluvial, onde os leitos aluviais constituem bolsões agradacionais desenvolvidos à montante de lito-estruturas (Figura 6). Essas lito-estruturas resistem à incisão vertical do leito fluvial, produzindo uma taxa menor de rebaixamento do nível de base local que dos trechos fluviais à montante. Isso causa gradiente fluvial baixo à montante dessas lito-estruturas e, conseqüentemente, menos energia disponível para o transporte, favorecendo a deposição da carga sedimentar e o desenvolvimento das planícies fluviais, às margens dos cursos d'água.

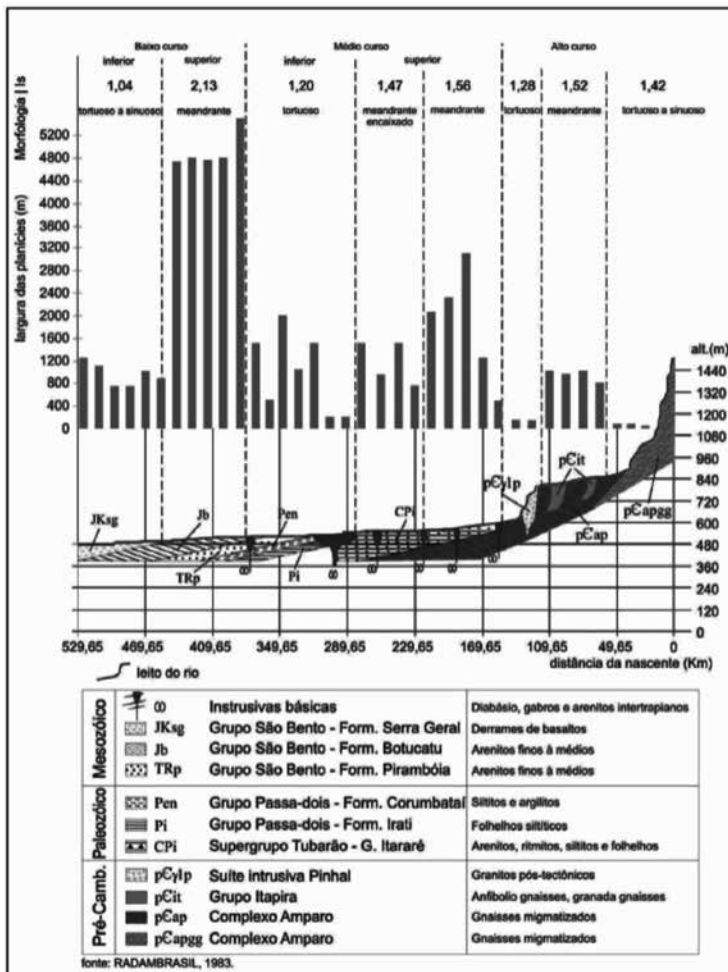


Figura 6. Distribuição das planícies fluviais (ZANCOPÉ; PEREZ FILHO, 2006).

Como mostraram Zancopé e Perez Filho (2006), o transporte de sedimentos em sistemas de drenagem tributários não é homogêneo ou uniforme ao longo dos cursos d'água. Da mesma forma, o transporte de sedimentos não é igual entre redes de drenagem de sub-bacias hidrográficas dos sistemas tributários. Há sub-bacias que têm capacidade de evacuar volume maior de sedimentos que outras e vice-versa.

Na tentativa de comparar a capacidade das redes de drenagem em evacuar a carga sedimentar fornecida pelas vertentes, Zancopé, Gonçalves e Bayer (2015) avaliaram o potencial de transferência de sedimentos das redes de drenagem das sub-bacias contribuintes da margem direita do alto curso do Rio Araguaia. Segundo os autores, o potencial de transferência de sedimentos é a capacidade relativa das redes de drenagem de transportar sua carga sedimentar até seu exutório. Sub-bacias cuja rede de drenagem possui um potencial de transferência de sedimentos elevado transportam eficientemente sua carga sedimentar, lançando grande quantidade de sedimentos através do exutório. Por outro lado, sub-bacias com potencial de transferência reduzido transportam com pouca eficiência sua carga sedimentar, apresentando uma probabilidade elevada de sofrer assoreamento ao longo dos cursos d'água da rede de drenagem. A figura 7 apresenta o resultado da avaliação do potencial de transferência de sedimentos para a área estudada por Zancopé, Gonçalves e Bayer (2015).

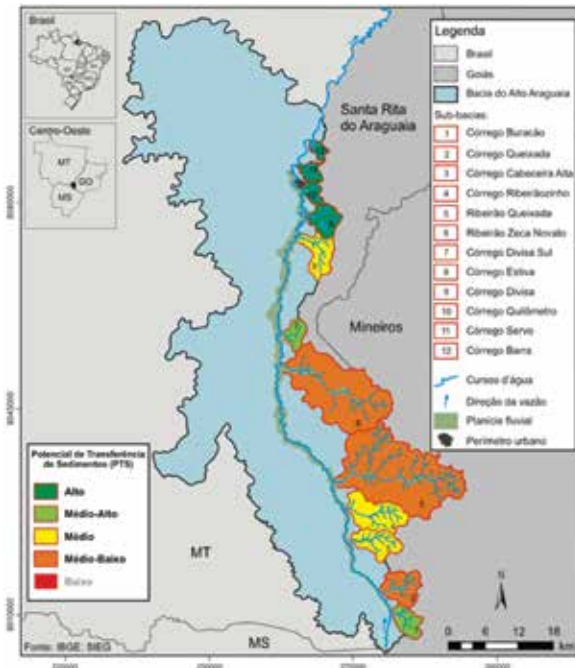


Figura 7. Potenciais de transferência de sedimentos das sub-bacias goianas na região das nascentes do Araguaia (ZANCOPÉ; GONÇALVES; BAYER, 2015).

A partir da associação de parâmetros morfométricos da rede de drenagem, Zancopé, Gonçalves e Bayer (2015) perceberam o predomínio de potenciais de transferência médio a alto, indicando uma capacidade de moderada a elevada da rede de drenagem da área estu-

dada, de evacuar, através dos seus exutórios, os sedimentos lançados nos cursos d'água. No entanto, os próprios autores ressaltaram que não realizaram amostragem da descarga sedimentar para corroborar ou calibrar os resultados alcançados pela análise morfométrica da rede de drenagem.

Apesar da tendência observada e da ressalva apontada no estudo de Zancopé, Gonçalves e Bayer (2015), é possível perceber que há ocorrência de sub-bacias cuja rede de drenagem possui potencial alto, enquanto outras sub-bacias possuem potencial médio-baixo, demonstrando a irregularidade na capacidade de transporte sedimentar entre as sub-bacias de um sistema tributário como aquele.

3 O potencial de transferência de sedimentos das bacias contribuintes da UHE Itumbiara: estudo de caso

A análise morfométrica de bacias hidrográficas foi desenvolvida na segunda metade do século XX. Inúmeros pesquisadores foram responsáveis pela expansão e difusão da perspectiva morfométrica em estudos hidrográficos (CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 85).

A aplicação da análise de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas é muito variada. A determinação do índice de circularidade de uma bacia hidrográfica, por exemplo, colabora para a explicação do comportamento das vazões fluviais nos exutórios (LACAVA; OLIVEIRA; PEREIRA FILHO, 2009) e da variabilidade dos picos de cheia (CALIL; *et al.*, 2012). Comparando parâmetros morfométricos da bacia do Rio Jeribucassu, no Município de Itacaré, litoral da Bahia, Meliani (2006) classificou as sub-bacias quanto à importância relativa na captação das águas das chuvas, indicando aquelas que devem ser objeto de preservação ou recuperação, tendo em vista as suas contribuições ao abastecimento dos centros urbanos vizinhos.

Adaptando a metodologia desenvolvida por Zancopé e Bayer (2012) e Zancopé, Gonçalves e Bayer (2015), foi analisado o potencial de transferência de sedimentos das bacias hidrográficas contribuintes do lago do reservatório da UHE Itumbiara, no Rio Paranaíba (Figura 8). De acordo com os estudos citados, o potencial de transferência de sedimentos (PTS) é a capacidade relativa das redes de drenagem de transportar sua carga sedimentar até seu exutório. Os objetivos dessa análise consistiram em comparar os potenciais de transferência de sedimentos das sub-bacias contribuintes, apontar os potenciais de transferência de sedimentos predominantes e correlacioná-los com a distribuição das concentrações e descargas instantâneas dos sedimentos suspensos dos cursos d'água da rede de drenagem em questão.

Um estudo dessa natureza tem a finalidade de verificar os remansos ou braços dos lagos dos reservatórios artificiais que possam sofrer maior aporte de sedimentos; indicar locais para a instalação de estações fluviossedimentométricas; orientar programas de monitoramento e controle de assoreamentos, principalmente nas sub-bacias com maior potencial de transferência de sedimentos; contribuir à gestão do uso das terras e manejos agropecuários no entorno dos reservatórios artificiais; avaliar a viabilidade de novos empreendimentos de uso múltiplo dos recursos hídricos; entre outras.

Conforme Zancopé e Bayer (2012) e Zancopé, Gonçalves e Bayer (2015), o potencial de transferência de sedimentos (PTS) foi determinado pela associação de parâmetros morfo-

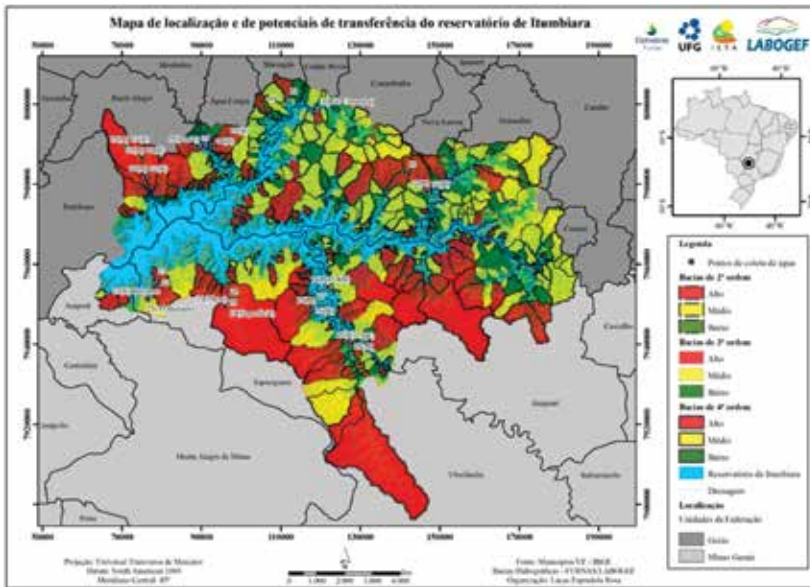


Figura 8. Área de estudo.

métricos da rede de drenagem das sub-bacias contribuintes do lago do reservatório da UHE Itumbiara. Os parâmetros morfométricos utilizados foram Densidade Hidrográfica (Dh), Densidade de Drenagem (Dd), Extensão do Percurso Superficial (Eps) e Gradiente (Gd) dos rios principais (eixos das sub-bacias). A densidade de drenagem (Dh) e a densidade hidrográfica (Dd) indicam respectivamente o comprimento relativo e a quantidade dos cursos d'água aptos a receber os sedimentos oriundos das vertentes. A extensão do percurso superficial (Eps) indica a distância que os sedimentos percorrem sobre as vertentes até os rios e o consequente transporte à jusante. O gradiente (Gd) indica a declividade geral de cada rio e a energia potencial para transportar os sedimentos (CHRISTOFOLETTI, 1980). Os parâmetros morfométricos da rede de drenagem foram determinados de acordo com Christofolletti (1980), comparando-se, em todos os casos, sub-bacias de mesma ordem hierárquica.

A concentração dos sólidos em suspensão (CSS) é a massa de partículas sedimentares em suspensão numa determina unidade de volume do fluxo fluvial, transportadas no interior da corrente fluvial e mantidas em suspensão pelo fluxo turbulento. A determinação da concentração dos sólidos em suspensão (CSS) foi realizada, nesse caso, por amostragem da água dos cursos fluviais e adaptada de metodologias reconhecidas, segundo Carvalho (2008). Os critérios para escolha dos pontos de amostragem foram os cursos d'água de sub-bacias classificadas com potenciais de transferência de sedimentos altos e médios; proximidade de sub-bacias com maior variabilidade de graus de potencial de transferência de sedimentos entre elas; acessibilidade aos pontos de coleta e alcance de maior abrangência dentro da área estudada no menor intervalo de tempo de amostragem possível, de modo a descartar eventos de chuva que possam influenciar a amostragem.

A descarga sólida de suspensão instantânea foi determinada a partir da vazão instantânea (descarga líquida) e da concentração de sólidos em suspensão da seção transversal amos-

trada (CARVALHO, 2008). Nesse caso, a vazão foi determinada a partir de micro molinete com contador de pulso digital (Hidromec®) e curva de calibração (certificação 343-1262-1-2013 Hidromec®).

3.1 Potencial de transferência de sedimentos

Este estudo de caso avaliou o Potencial de Transferência de Sedimentos (PTS) de 475 sub-bacias contribuintes do lago do reservatório da UHE Itumbiara. A avaliação dessas sub-bacias alcançou uma área de 4.526,87 km² no entorno do reservatório. Desse total, 194 sub-bacias são de 2ª ordem hierárquica, 161 sub-bacias são de 3ª ordem e 120 sub-bacias são de 4ª ordem. A Figura 9 mostra a participação relativa das sub-bacias avaliadas na área mapeada, destacando que 50% dessa área apresentou sub-bacias de 4ª ordem hierárquica, 15% de 3ª ordem e 6% de 2ª ordem.



Figura 9. Participação relativa das áreas das sub-bacias avaliadas.

Por possuírem área individual maior, as sub-bacias de 4ª ordem hierárquica predominaram nesse aspecto, alcançando 3.163,5 km² da área mapeada. As sub-bacias de 3ª e 2ª ordem hierárquicas abrangeram 983,23 km² e 380,13 km², respectivamente.

Contatou-se o predomínio de sub-bacias contribuintes com Potencial de Transferência de Sedimentos alto. A Tabela 1 mostra que 2.351,86 km² da área estudada apresentaram Potencial alto, enquanto 1.817,86 km² e 357,15 km² apresentaram Potencial médio e baixo respectivamente.

Tabela 1. Potencial de Transferência de Sedimentos por quantidade de sub-bacias e áreas mapeadas.

Sub-bacias	POTENCIAL DE TRANSFERÊNCIA DE SEDIMENTOS						Total	
	Alto		Médio		Baixo		Quant.	Área
	Quant.	Área	Quant.	Área	Quant.	Área		
2ª ordem	83	293,46	86	78,45	25	8,22	194	380,13
3ª ordem	12	76,70	107	731,51	42	175,02	161	983,23
4ª ordem	40	1981,70	59	1007,90	21	173,91	120	3163,50
Total	135	2351,86	252	1817,86	88	357,15	475	4526,87

A Figura 10 mostra a participação relativa das áreas das sub-bacias para o Potencial de Transferência de Sedimentos da área mapeada. Destaque-se que 37% da área mapeada apresentou sub-bacias com potencial alto, 28% apresentou sub-bacias com potencial médio e apenas 6% apresentou sub-bacias com potencial baixo.

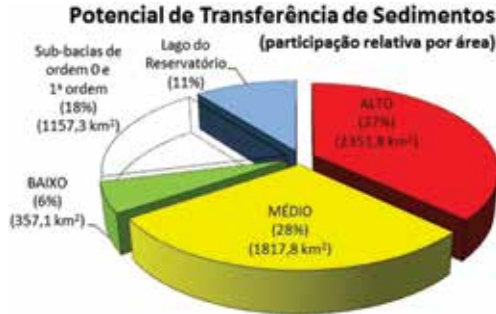


Figura 10. Potencial de Transferência de Sedimentos para a área estudada.

A Figura 11 mostra a mesma participação por ordem hierárquica. É possível observar que 1.981,7 km² da área com potencial de transferência de sedimentos alto são de sub-bacias de 4ª ordem hierárquica, enquanto 76,7 km² e 293,46 km² são de 3ª e 2ª ordem, respectivamente. Por outro lado, 1.007,9 km² da área com potencial médio são de sub-bacias de 4ª ordem hierárquica, enquanto 731,51 km² e 78,45 km² são de 3ª e 2ª ordem, respectivamente. Por fim, 173,91 km² da área com potencial baixo são de sub-bacias de 4ª ordem hierárquica, enquanto 175 km² e 8,22 km² são de 3ª e 2ª ordem, respectivamente.

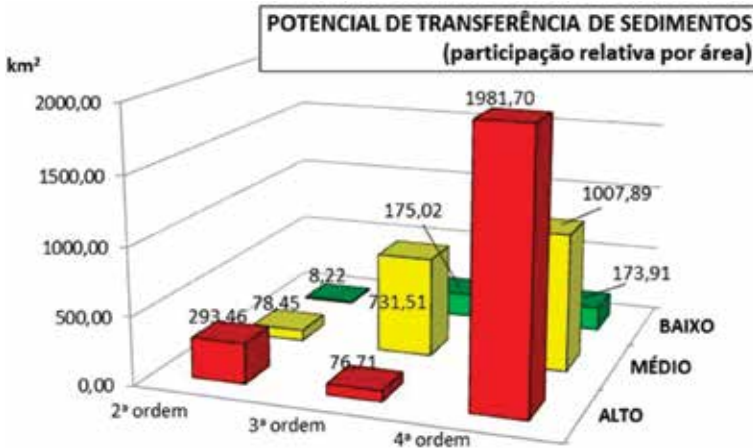


Figura 11. Potencial de Transferência de Sedimentos por área das sub-bacias nas respectivas ordens hierárquicas.

Contudo, em quantidade de sub-bacias, houve predomínio de Potencial de Transferência de Sedimentos médio. Uma revisão da Tabela 1 permite observar que 252 sub-bacias apresentaram Potencial de Transferência de Sedimentos médio, enquanto 135 e 88 sub-bacias apresentaram potencial alto e baixo, respectivamente.

Essa diferença entre área e quantidade está ligada ao fato de sub-bacias de ordem hierárquica superior possuírem área individual maior, embora possam ocorrer em número menor na área total. A soma das áreas das sub-bacias de 4ª ordem hierárquica abarca uma área total maior, enquanto as somas das áreas das respectivas sub-bacias de ordem hierárquica inferior alcançam áreas totais menores.

A Figura 12 mostra a participação relativa do número das sub-bacias nas respectivas ordens hierárquicas nos potenciais de transferência de sedimentos, em que se destaca o predomínio do Potencial médio em todas as ordens hierárquicas. É possível observar que 40 sub-bacias com potencial de transferência de sedimentos alto são de 4ª ordem hierárquica, enquanto 12 e 83 sub-bacias são de 3ª e 2ª ordem, respectivamente. Por outro lado, 59 sub-bacias com potencial médio são de 4ª ordem hierárquica, enquanto 107 e 86 sub-bacias são de 3ª e 2ª ordem, respectivamente. Por fim, 21 sub-bacias com potencial baixo são de 4ª ordem hierárquica, enquanto 42 e 25 sub-bacias são de 3ª e 2ª ordem, respectivamente.

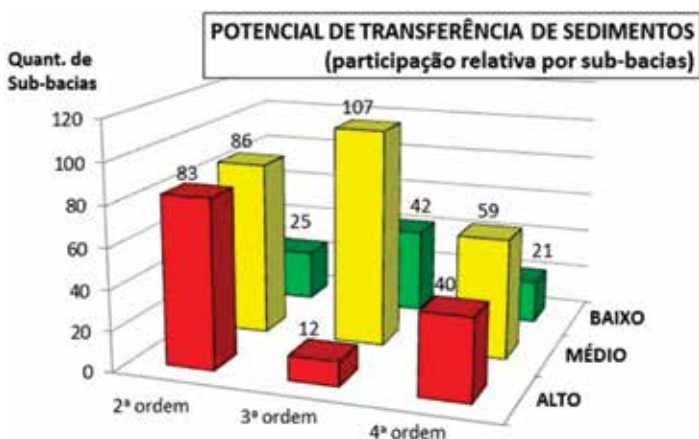


Figura 12. Potencial de Transferência de Sedimentos por quantidade de sub-bacias nas respectivas ordens hierárquicas.

Comparando as figuras 11 e 12, é possível perceber que, embora as sub-bacias de 2ª ordem hierárquica tenham pequena participação na área das sub-bacias estudadas (Figura 11), elas apresentam significativa contribuição em quantidade de sub-bacias com Potencial alto e médio (Figura 12). Persistindo na comparação, é possível perceber que, embora as sub-bacias de 4ª ordem apresentem quantidades menores (Figura 12), concentram significativamente potenciais altos e médios, tanto em área (Figura 11), quanto em número.

Em termos de distribuição espacial, as bacias de 2ª ordem hierárquica com potencial alto predominam na porção oeste da área estudada, enquanto as sub-bacias com potencial médio predominam na porção centro-leste, ao longo do eixo do Paranaíba. As bacias de 3ª ordem hierárquica com potencial médio predominam na porção sul da área, enquanto, na porção leste, predominam sub-bacias com potencial baixo. As sub-bacias de 4ª ordem hierárquica com potencial alto predominam na porção sul da área estudada, enquanto, nas porções norte e leste, predominam sub-bacias com potencial médio. A Figura 13 compara a distribuição dos potenciais de transferência de sedimentos por ordem hierárquica das sub-bacias contribuintes na área estudada.

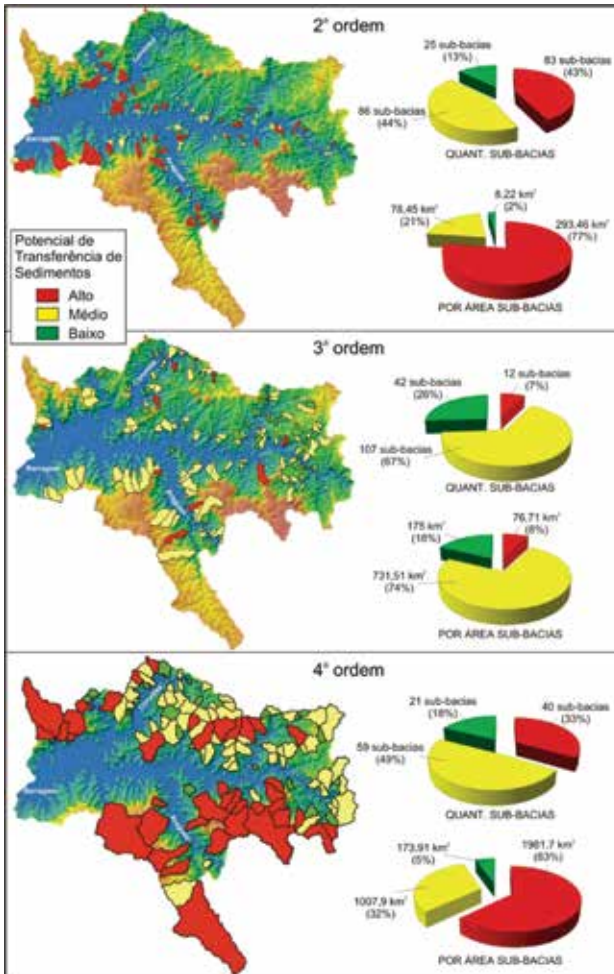


Figura 13. Distribuição dos potenciais de transferência de sedimentos por sub-bacias nas respectivas ordens hierárquicas.

3.2 Concentração de sólidos em suspensão (CSS) e descarga sólida em suspensão (QSS)

Para a área analisada, as concentrações de sólidos em suspensão (CSS) medidas ao longo dos canais principais das sub-bacias contribuintes de 4º ordem hierárquica apresentaram valores considerados “baixos” (< 150 mg/l), ou diretamente “muito baixos” (<50 mg/l), segundo Carvalho *et al.* (2000). Os valores de CSS encontrados nos canais principais das sub-bacias de 2ª e 3ª ordem hierárquica são ainda menores, podendo ser considerados como “muito baixos” (< 50 mg/l), segundo a mesma referência.

De maneira geral, a concentração de sólidos em suspensão (CSS) mostrou-se diretamente proporcional ao grau do potencial de transferência de sedimentos (PTS). Isto é, as CSS

maiores foram encontradas nas sub-bacias com PTS maiores, enquanto as CSS menores foram encontradas nas sub-bacias com PTS menores. Como exemplo, destacam-se os pontos 04A e 05 (Figura 14), cujas sub-bacias apresentaram PTS baixo e alto, respectivamente. O ponto 04 (PTS baixo) apresentou CSS menor (13 mg/L) que o ponto 05 (PTS alto; CSS = 26 mg/L), tendo ambos pontos de amostragem localizados no exutório das sub-bacias respectivas.

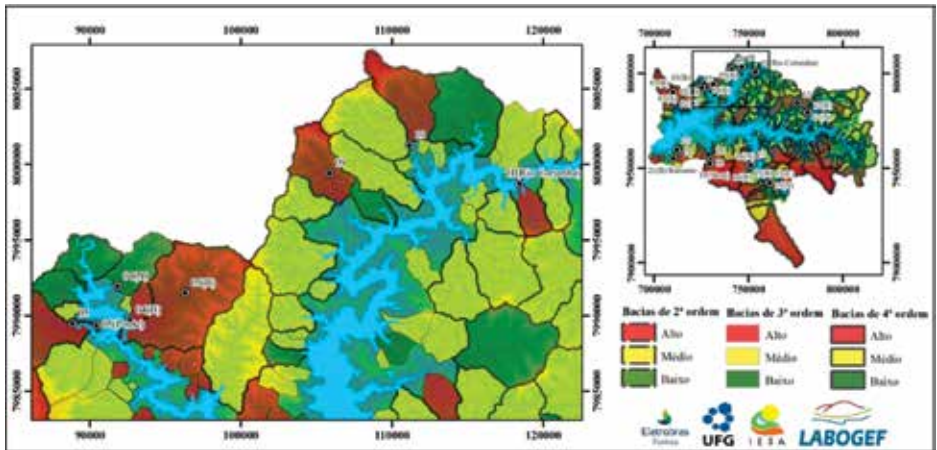


Figura 14. Distribuição dos pontos de amostragem (4A, 5, 9 e 10) de CSS.

Alguns pontos de amostragem localizaram-se no exutório das sub-bacias (exemplo anterior), enquanto outros localizaram-se em posições intermediárias. Contudo, os PTS e as CSS mantiveram-se diretamente proporcionais. Como exemplo, destacam-se os pontos 09 e 10 (Figura 14), cujas sub-bacias apresentaram PTS alto e médio, respectivamente. Muito embora o ponto 9 (PTS alto) tenha apresentado CSS menor (2,2 mg/L) que o ponto 10 (PTS médio; CSS = 3 mg/L), a amostragem do ponto 09 localizou-se à metade da sub-bacia, aproximadamente, registrando a concentração correspondente à parte da área (montante do ponto de amostragem) da sub-bacia com PTS alto. Por outro lado, a amostragem do ponto 10 localizou-se no exutório, registrando a concentração correspondente à área de toda a sub-bacia com PTS baixo.

Alguns pontos de amostragem localizaram-se em posições diferentes no interior da mesma sub-bacia. Como exemplo, destacam-se os pontos 16 (A), 16 (B) e 17 (Figura 15), cuja sub-bacia apresentou PTS alto. Os pontos 16 (A) e 16 (B) constituem um único local, da mesma seção transversal, que foi amostrado duas vezes: a primeira amostragem ocorreu antes de um evento de chuva, 16 (A), e a segunda amostragem, 16(B), ocorreu após o mesmo evento de chuva. O ponto 16 localizou-se no interior da sub-bacia, à montante da confluência com outro tributário da mesma sub-bacia. O ponto 17 localizou-se no exutório. Já o ponto 16 (A) apresentou CSS de 7 mg/L, registrando a concentração correspondente à parte da área da sub-bacia (montante do ponto de amostragem); o ponto 17 apresentou CSS de 16,6 mg/L, registrando a concentração correspondente à área de toda a sub-bacia. Nesse caso, verificou-se o incremento da CSS à jusante, demonstrando-se a conformidade com os modelos de geometria hidráulica reconhecidos, que demonstram a tendência do aumento da carga sedimentar em direção de jusante (CHRISTOFOLETTI, 1981; SUGUIO; BIGARELLA, 1990).

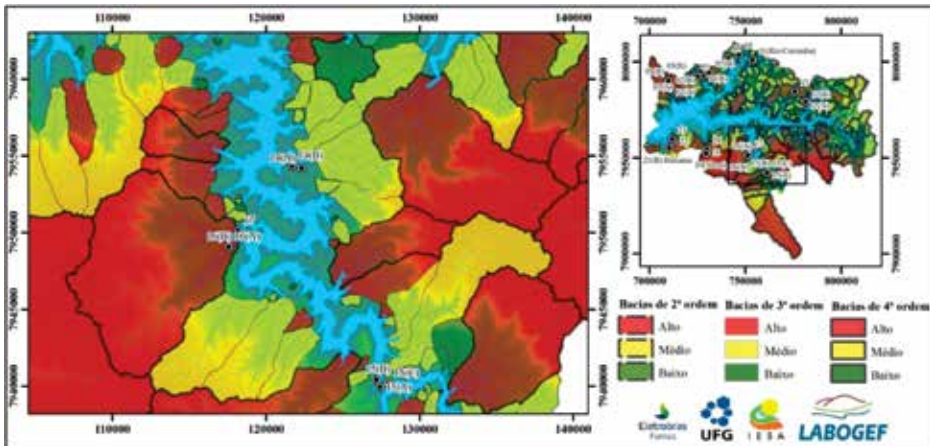


Figura 15. Distribuição dos pontos de amostragem (16 A, 16 B, 17, C, 15 A, e 15 B) de CSS.

Os pontos de amostragem 16 e 17 merecem outro destaque. Ambos os pontos foram amostrados no mesmo dia, antes de um evento de chuva. Porém, o ponto 16 também foi amostrado um par de horas após um evento de chuva no mesmo dia e apresentou, antes da chuva, CSS de 7 mg/L, enquanto, após a chuva, apresentou CSS de 547,8 mg/L. O evento de chuva incrementou em 78 vezes a CSS naquele ponto de amostragem, demonstrando a importância da participação da precipitação na produção e liberação (transferência) de sedimentos numa bacia hidrográfica, seja para um evento de chuva ou para uma estação chuvosa com precipitações acima da média.

Outro destaque deve ser dado aos pontos C, 15(A) e 15(B) (Figura 15). Esses pontos de amostragem localizaram-se na confluência dos rios Araguari (MG) e Uberabinha (MG). O Rio Uberabinha é afluente da margem esquerda do Rio Araguari. A amostra do ponto C foi coletada no Rio Araguari, 200 metros à montante da confluência com o Rio Uberabinha, registrando CSS de 10,4 mg/L, exclusivamente do Rio Araguari. A amostra do ponto 15(A) foi coletada no Rio Uberabinha, 60 metros à montante da confluência com o Rio Araguari, registrando CSS de 162,4 mg/L, exclusivamente do Rio Uberabinha. Essa foi a segunda maior CSS encontrada durante a campanha de amostragem desse mapeamento. O Rio Uberabinha apresentou uma CSS 15 vezes maior que o Rio Araguari, muito embora ele seja 3,5 vezes mais estreito que o Araguari. A amostra do ponto 15(B), coletada à margem esquerda do Rio Araguari, 150 metros à jusante da confluência com o Rio Uberabinha, registrou CSS de 51,6 mg/L, demonstrando uma taxa de diluição de aproximadamente 0,74 mg/L a cada metro. Deve ser lembrado que a mistura entre as águas na confluência de rios depende da densidade, temperatura e velocidade do fluxo; do ângulo da confluência; da rugosidade do leito, entre outras variáveis, sendo comum o percurso de centenas de metros até a mistura completa.

Outros valores importantes de CSS mapeados são dos pontos 22 e 23 (Figura 16). Além do valor elevado da CSS encontrado no ponto 23, a comparação com a CSS do ponto 22 é merecedora de destaque. A CSS encontrada para o ponto 23 foi 106,4 mg/L, enquanto a do ponto 22, apenas 1,9 mg/L, coletada a 1,9 km aproximadamente à montante no mesmo curso d'água, foi 14 mg/L. O ponto 23 foi amostrado quando o nível da água do lago do reservatório estava baixo e o

exutório do respectivo curso d'água posicionado 1,5 km aproximadamente, à jusante do exutório no nível (cota) normal da água. O ponto 23 encontrar-se-á submerso quando o nível da água estiver nas situações normais. Como não há afluente entre ambos os pontos amostrados, tal incremento da CSS pode ser explicado pela remobilização dos depósitos de fundo do lago do reservatório, ao longo da extensão do curso d'água instalado sobre os depósitos antes suabaquáticos, até o reposicionamento do exutório no nível baixo.

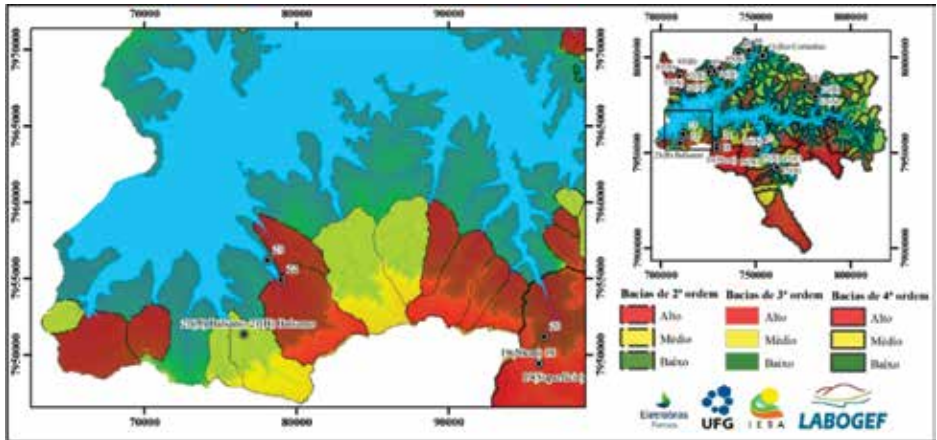


Figura 16. Distribuição dos pontos de amostragem (22 e 23) de CSS.

A diferença das CSS's entre os pontos 22 e 23 aponta a influência da operação do lago do reservatório da UHE Itumbiara sobre a remobilização de sedimentos dos remansos. As flutuações entre os níveis d'água elevados e baixos, principalmente em períodos de estiagem prolongada, além de afetarem a produção de energia elétrica, podem transferir os sedimentos dos remansos para zonas interiores do lago do reservatório.

4 Considerações finais

De acordo com a 3ª edição do Atlas de Energia Elétrica do Brasil, produzido pela Agência Nacional de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008), o Banco de Informações de Geração (BIG) dispõe de 159 usinas hidrelétricas; 1.042 usinas termelétricas, duas nucleares; 320 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs); 227 centrais geradoras hidrelétricas (pequenas usinas hidrelétricas) e uma usina solar, em novembro de 2008. O mesmo atlas informa que 74% da capacidade instalada de geração de eletricidade em 2008 estava baseado em usinas hidrelétricas, sendo que "... há poucos anos, as hidrelétricas representavam cerca de 90% da capacidade instalada" (ANEEL, 2008, p. 34). Esses dados sinalizam uma tendência de diversificação da matriz da energia elétrica. A situação da geração de eletricidade no Brasil ainda depende de condições hidrológicas das bacias hidrográficas contribuintes dos reservatórios do sistema gerador nacional (pluviosidade nas cabeceiras contribuintes, captação para abastecimento público urbano, industrial e agropecuário, taxa de aporte de sedimentos, etc.).

Apesar dessa tendência de diversificação da matriz elétrica, os órgãos planejadores do setor elétrico persistem no empreendimento de usinas de grande porte, porém, agora, em fronteiras cada vez mais distantes dos grandes centros consumidores, como as bacias sul-amazônicas e Tocantins-Araguaia (ZANCOPÉ; CARPI JR., 2008). Parte dessa persistência é justificada pelo incremento elevado e imediato na oferta de eletricidade, trazido por esses grandes empreendimentos, dadas sua potência e capacidade de geração. Além da diversificação da matriz geradora, programas de conservação e eficiência energética deveriam ser intensificados para além do selo PROCEL de economia de energia, criado em 1993, do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL).

Independentemente de programas de diversificação da matriz de geração e eficiência energética, o Brasil adquiriu uma experiência técnica em hidroeletricidade, que se originou nos primórdios da industrialização brasileira (LIMA, 1995). Ademais, o território brasileiro (8,5 milhões de km²) ocupa 47% da América do Sul (17,8 milhões de km²), continente com uma das maiores densidades hidrográficas, o que favorece a ocorrência de um potencial hidrelétrico considerável. A interação desses fatores socioeconômicos e históricos com aqueles fatores físicos-naturais explica o intenso uso da hidroeletricidade.

As bacias hidrográficas, objetos da exploração hidrelétrica, drenam o excedente de água das precipitações, descontados os volumes que retornam à atmosfera pela evapotranspiração e aqueles que são absorvidos e integram a estrutura fisiológica dos seres vivos; os que compõem a unidade dos solos e regolitos e os que sofrem percolação profunda e recarregam aquíferos. Ao fazerem isso, criam uma rede de drenagem complexa que, junto ao volume de água escoado, conduz uma variedade de sedimentos. Condições geográficas das bacias hidrográficas produzem um volume maior ou menor de sedimentos transportados. Os estudos sobre a dinâmica e aporte sedimentar em redes de drenagem tributárias permitem avaliar a viabilidade dos reservatórios de novos empreendimentos de usinas hidrelétricas e a vida útil dos respectivos projetos; indicar locais para a instalação de estações fluviossedimentométricas; reavaliar programas de monitoramento e controle de assoreamentos; detectar os remansos ou braços do lago do reservatório de usinas em operação que possam sofrer maior aporte de sedimentos; alimentar bancos de dados que permitam validar modelos de aplicação na quantificação das perdas e transferências de sedimentos em bacias hidrográficas; e orientar a gestão do uso das terras e manejos agropecuários no entorno dos reservatórios.

Referências

AB'SABER, A.N. Regiões de circundenação pós-cretáceas no planalto brasileiro. **Boletim paulista de geografia**. São Paulo, n. 1, 1949.

_____. Da participação das depressões periféricas e superfícies aplainadas na compartimentação do planalto brasileiro. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 29, 1972.

ANEEL (BRASIL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2008.

CALIL, P.M.; OLIVEIRA, L.F.C.; KLIEMANN, H.J.; OLIVEIRA, V.A. Caracterização geomorfológica e do uso do solo da bacia hidrográfica do alto Meia Ponte, Goiás. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 16, n. 4, p. 433-442, 2012.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JR. N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamentos de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000.

_____. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CASTRO, S. S. Erosão hídrica na alta bacia do rio Araguaia: distribuição, condicionantes, origem e dinâmica atual. **Revista do departamento de geografia**, São Paulo, n. 17, p. 38-60, 2005.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

_____. **Geomorfologia fluvial: o canal fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

HJULSTRÖM, F. Studies of morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris. **Geological institute bulletin**. Upsala University. v. 25, p. 221-527, 1935.

KÄMPF, N.; MARQUES, J.J.; CURTI, N. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J.C. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: SBCS, 2012. Cap. 4. p. 81-146.

LACAVA, M. A.; OLIVEIRA, A.M.S.; PEREIRA FILHO, A.J. Comportamento hídrico de superfície da bacia do Rio Cabuçu de Cima, Parque Estadual da Cantareira, Guarulhos, SP. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 10, n. 1, 23-30, 2009.

LATRUBESSE, E.M.; STEVAUX, J.C.; SINHA, R. Grandes sistemas fluviais tropicais. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 6, n. 1, p. 01-18, 2005.

LATRUBESSE, E. M.; AMSLER, M. L.; MORAIS, R. P.; AQUINO, S. The geomorphology response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: the case of the Araguaia River. **Geomorphology**, v. 113, n. 3-4, p. 239-252, 2009.

LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, J.T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. **U.S. Geological survey professional paper**, v. 252, p. 1-57, 1953.

LIMA, J.L. **Políticas de governo e desenvolvimento de setor de energia: do Código de Águas à crise dos anos 80 (1934-1984)**. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade, 1995.

MARINHO, G. V.; CASTRO, S. S.; CAMPOS, A. B. Hidrology and gully process in the upper Araguaia River basin, Central Brazil. **Zeitschrift für geomorphologie**, v. 145, n. suplementar, p. 119-145, 2006. (Edição Especial – Tropical Geomorphology: with special reference to South America).

MELIANI, P.F. Mapeamento da rede hidrográfica e análise dos parâmetros da densidade de drenagem aplicados ao estudo ambiental: o caso da bacia do Rio Jeribucassu, Itacaré, Bahia. **Geografia**. Rio Claro, v. 31, n. 1, p. 119-136, 2006.

MORISAWA, M. **Rivers: forms and process**, N. York: Longman, 1985.

NIGHTON, D. **Fluvial forms and process**. London: E. Arnold, 1984.

OLIVEIRA, V. C. V.; CASTRO, S. S. Susceptibility and risks to water erosion in the upper of Araguaia River basin (GO/MT), Brazil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 1, n. 1, p. 697-708, 2005. (Edição especial – International Symposium on Land Degradation and Desertification).

PEREZ FILHO, A. QUARESMA, C. RODRIGUES, T.R.I. Ação antrópica como agente transformador da organização espacial em bacias hidrográficas. In: Colóquio Internacional de Geocrítica, 10. Barcelona, 2008. **Actas del coloquio**. Barcelona: Universidad de Barcelona: 2008.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. **Ambiente fluvial**. 2ª ed. Florianópolis: Ed. UFPR/UFSC, 1990.

ZANCOPÉ, M.H.C.; BAYER, M. Proposta metodológica para avaliar o potencial de transferência de sedimentos de bacias hidrográficas a partir de índices morfométricos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9. Rio de Janeiro, 2012. **Anais do**. Rio de Janeiro: UFRJ/UGB, 2012, p. 1-3.

ZANCOPÉ, M.H.C.; CARPI JÚNIOR, S. Potencial hidrelétrico: expansão, eficiência energética e desenvolvimento sustentável. In: PANTANO FILHO, R.; SANTOS ROSA, D.; IRIAS, L.J.M. (org.) **Desenvolvimento sustentável**. Itatiba/SP: Berto Editora, 2008. Cap. 6, p. 65-76.

ZANCOPÉ, M.H.C.; GONÇALVES, P.E.; BAYER, M. Potencial de transferência de sedimentos e suscetibilidade a assoreamentos da rede hidrográfica do alto Rio Araguaia. **Boletim goiano de geografia**. Goiânia, v. 35, n. 1, p. 115-132, 2015.

ZANCOPÉ, M.H.C.; PEREZ FILHO, A. Considerações a respeito da distribuição das planícies fluviais do Rio Mogi Guaçu. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 7, n. 1, p. 65-71, 2006.

CAPÍTULO 19

Erosão em vias não pavimentadas e em obras de engenharia e suas consequências para os reservatórios

Lilian Ribeiro de Rezende
Wilson Conciani
Anna Karina Chaves Delgado
Washington Peres Núñez
Leandro Olivio Nervis
José Camapum de Carvalho

Palavras-chave: Solo laterítico. Solo saprolítico. Estabilização. Drenagem.

1 Introdução

Este capítulo trata das questões relativas ao aparecimento de processos erosivos em vias sem pavimentação e obras geotécnicas, bem como as consequências desse fenômeno para os reservatórios de água. Além da introdução, o capítulo é composto por mais cinco itens que abrangem temas como: a relação das obras de engenharia e das erosões com o assoreamento de cursos d'água e reservatórios; questões sobre prevenção e medidas mitigadoras; materiais utilizados na construção de vias não pavimentadas, com enfoque nas questões relacionadas aos solos tropicais; estudo de caso de um revestimento primário e considerações finais. Dessa forma, pretende-se ressaltar a importância das considerações apresentadas e contribuir para a construção de vias e obras duráveis, sem impactos relacionados à erodibilidade de solos e sem consequências negativas para os reservatórios.

2 Obras de engenharia e os processos erosivos como fontes de assoreamento de cursos d'água e reservatórios

As diferentes obras de engenharia, tais como construções de casas, edifícios, rodovias e barragens, em geral, são concebidas e construídas sem uma preocupação clara e definida com os processos erosivos que ocorrerão na fase de construção. Essa falta de cuidado preventivo pode dar origem a processos de erosão superficial, carreando solos para os cursos d'água e reservatórios. A Figura 1 indica, pela cor da água do rio Descoberto, que margeia áreas urbanas dos Estado de Goiás e do Distrito Federal, desembocando no reservatório Corumbá IV, que os processos erosivos em áreas circunvizinhas são evidentes. Nesse caso, não se pode também desprezar as contribuições das áreas rurais, cuja prática agrícola se faz presente e contribui com grande volume de solo para o assoreamento do reservatório.



Figura 1. Rio Descoberto. Vista da Rodovia BR-060, km 5, Goiás (Foto: José Camapum de Carvalho).

Em áreas urbanas, o problema geralmente se inicia na fase de implantação do loteamento com desmatamentos, aberturas de ruas sem o devido planejamento de ocupação e falta de implantação de obras de infraestrutura como os sistemas de drenagem urbana. Nos empreendimentos públicos, essas práticas são empregadas para ampliar a visibilidade da iniciativa; já nos privados, para ampliar as possibilidades de negociação. Em ambos os casos, tais práticas também visam à otimização dos custos financeiros diretos, em que geralmente não estão inseridos os custos indiretos relacionados aos passivos ambientais gerados pelo empreendimento, mas que podem ser elevados em função da gravidade do problema. Cabe aqui lembrar que os poluidores direto e indireto são responsáveis pelos danos ambientais gerados.

A Figura 2a mostra uma via de acesso ao Reservatório Serra da Mesa, no Município de Uruaçu, com remoção de grande parte da vegetação em seu entorno, favorecendo-se, assim, a atuação de processos erosivos. Já a Figura 2b mostra que a área de empréstimo usada para erguer o leito da via está se submetendo a processos erosivos que contribuem para o assoreamento do rio Araguaia. As Figuras 3a e 3b indicam que a preservação de vegetação às margens das estradas vicinais contribui para que se evitem processos erosivos.



(a)



(b)

Figura 2. Exemplos de questões referentes às vias de acesso: (a) Reservatório Serra da Mesa; (b) Rodovia de acesso ao rio Araguaia (Foto: José Camapum de Carvalho).

Os problemas de assoreamento de cursos d'água e reservatórios em consequência das obras de engenharia não se limitam às obras em si. Eles estão muitas vezes ligados a processos erosivos que ocorrem em áreas de empréstimo, como será abordado no item 3.2.

Em todos esses exemplos mostrados e discutidos, quase sempre a consequência final é, além dos prejuízos ambientais locais, o assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Logo, faz-se necessário que o empreendedor tome consciência mais ampla dos problemas que muitas vezes passam despercebidos, e que os engenheiros, urbanistas e paisagistas sejam forma-



Figura 3. Existência de vegetação preservadas em vias de acesso: (a) Via de acesso à propriedade rural; (b) Via de acesso ao rio Araguaia (Foto: José Camapum de Carvalho).

dos no domínio das ações preventivas para eliminar ou pelo menos mitigar os processos erosivos nas obras de engenharia ou a elas relacionados. Essa formação poderá ser no âmbito da educação formal, desde o ensino fundamental (CAMAPUM DE CARVALHO; LELIS, 2006; LELIS; CAMAPUM DE CARVALHO, 2011) e ensino médio (CAMAPUM DE CARVALHO; DINIZ, 2005; CAMAPUM DE CARVALHO; LELIS, 2010), até os cursos universitários (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2012), como também no campo da educação não formal, em eventos e artigos técnicos. Complementarmente, torna-se relevante o aprimoramento das normas técnicas e jurídicas, com a finalidade de ampliar a necessidade de cumprimento de certos pré-requisitos ambientais para a aprovação de projetos e execução das obras de engenharia.

3 Ações preventivas e mitigadoras dos processos erosivos

3.1 Obras civis

As obras lineares são muito suscetíveis aos processos erosivos. Isso se deve ao fato de essas estruturas concentrarem e acumularem fluxo. Por obras lineares, pode-se entender aquelas cuja dimensão longitudinal é muito superior às demais. Estão, nesse caso, as rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, canais, entre outras. A Figura 4 mostra um caso de erosão em linha de transmissão.



Figura 4. Erosão na linha de transmissão Jaurú – Coxipó, decorrente da limpeza da faixa de domínio da obra. Jangada, MT (Foto: Wilson Conciani).

Entre as obras lineares, as mais comuns são as estradas. Essas estruturas são concentradoras de fluxo. Pelas suas características geométricas e pela sua função social, elas agregam um conjunto de outras estruturas que potencializam sua capacidade de concentrar o fluxo de água. Um exemplo típico dessas estruturas agregadas pelas estradas são as cercas de fazendas, as quais têm servido como um empecilho à instalação de medidas mitigadoras do fluxo e da consequente erosão (PRANDINI, 1998). Como decorrência disso, o entorno das estradas é quase sempre uma região de muita erosão. A Figura 5 mostra um modelo topográfico da região das fraldas da Serra do Parecis, em Mato Grosso, onde as questões de relevo com declividades de até 20 %, solo suscetível à erosão e uso da terra para pastagens se somam, de modo a produzir intensos processos erosivos ao longo da rodovia. Nessa figura, observa-se que há um fluxo preferencial paralelo à rodovia, indicado pelas linhas azuis que correm ao longo da rodovia ou que nela se iniciam. Também é possível observar que as escavações têm início nas margens da rodovia.

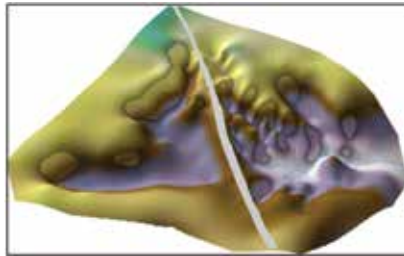


Figura 5. Modelagem do terreno mostrando a erosão intensa ao longo da rodovia no Município de Tangará da Serra, MT. A cor roxa indica as regiões mais baixas onde a erosão já escavou até atingir o lençol freático.

As razões para essa concentração de fluxo, assim como para a ampliação do fluxo superficial, são as mais diversas possíveis. Entre elas, destacam-se: os aspectos topográficos favoráveis à concentração do fluxo; a limpeza do terreno com a consequente remoção da vegetação e eliminação das barreiras naturais ao fluxo; o uso do solo como material para a construção da via, sem os devidos e necessários cuidados para que se evite erosão, e a compactação das áreas lindeiras. A Figura 6 mostra como o entorno da estrada está erodido. Nesse caso, a limpeza do terreno, a escavação para o bota dentro (material usado na construção da via) e a falta de estruturas de prevenção, como drenagens apropriadas, são os gatilhos do processo erosivo. Como a limpeza atinge uma área maior que a do leito carroçável, toda a faixa fica exposta ao fluxo. Contudo, a compactação do leito carroçável o torna menos permeável que as demais re-



Figura 6. Erosão ao longo da BR 163, região da serra do Cachimbo no sul do Pará (Foto: Wilson Conciani).

giões. Portanto, as águas correrão do centro da rodovia para fora. Isso gera erosão transversal em sulcos no leito carroçável e erosão em ravinas ou voçorocas na faixa de domínio.

O comprimento dessas obras lineares, em situações de declividade favoráveis, permite que o fluxo de água alcance velocidades muito maiores que aquelas consideradas críticas no processo de destacamento de partículas. A forma da encosta também é determinante na intensidade do processo erosivo, pois, além de intervir no fluxo superficial, influi nos fluxos em meio saturado e não saturado de subsuperfície, intervindo na estabilidade estrutural do solo ou do maciço. A Figura 7 mostra a carga sedimentométrica ao longo de encostas com diversas formas de relevo na direção longitudinal, conforme descrito por Vilar (1990). Conforme se vê na figura, a forma convexa é a que resulta em maior erosão ao final da encosta.

Na Figura, 8 também se observa que a carga de sedimentos é sempre maior no final da encosta, seja para perfis lineares, côncavos ou convexos. Na forma convexa-côncava, tem-se certamente uma redução, nesse caso, devido à retenção dos sedimentos no trecho côncavo, o que intervém na forma do relevo, com outras consequências futuras quanto aos processos erosivos e geração de sedimentos. A Figura 8 mostra um trecho de rodovia, pelo qual se percebe que a erosão é muito intensa na região mais baixa da encosta. Ao contrário, no topo da encosta, trata-se apenas de pequenos sulcos. Essa diferença de volume escavado se deve à velocidade da água. No topo da encosta, a velocidade é pequena, contudo, à medida que a água avança para a região de jusante, a sua velocidade aumenta, seja em consequência do aumento da declividade, seja em função da ação gravitacional. O aumento da velocidade da água faz crescer o seu potencial erosivo.

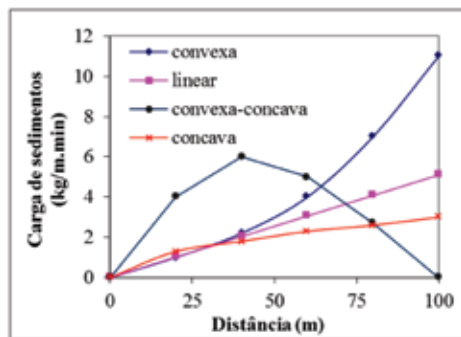


Figura 7. Erosão ao longo de encostas segundo a sua forma geométrica.



Figura 8. Trecho mostrando que a erosão se intensifica na parte mais baixa da encosta. Rodovia em Tangará da Serra, MT (Foto: Wilson Conciani).

3.2 Áreas de empréstimo

Não raro são deflagrados processos erosivos em áreas de empréstimo utilizadas na construção das vias. A Figura 9 ilustra graves problemas erosivos que se instalaram em uma área de empréstimo utilizada na construção da rodovia BR-020, próxima à cidade de Formosa, Estado de Goiás.

Muitas vezes, as áreas de empréstimo utilizadas na construção rodoviária e submetidas a processos erosivos se situam margeando o corpo estradal e o ameaçando diretamente. A Figura 10 ilustra essa situação existente às margens da BR-060, entre Abadiânia e Anápolis, em Goiás, cujos sedimentos foram carreados para o leito do córrego. Mas, em qualquer que seja o caso, o solo erodido é quase sempre sendo carreado para os cursos d'água e reservatórios localizados à jusante, assoreando-os.



Figura 9. Erosão em área de empréstimo próxima a BR-020 (Foto: José Camapum de Carvalho).



Figura 10. Erosão em área de empréstimo junto à BR-060, km 77/78, Goiás (Foto: José Camapum de Carvalho).

Exemplos existem também para áreas de empréstimo utilizadas na construção de barragens, como mostra a Figura 11, retratando uma área de empréstimo utilizada na construção do Reservatório da UHE Itumbiara. Essa área já se encontra hoje recuperada.

Diante do exposto, entende-se que são necessários cuidados preventivos de recuperação ambiental das áreas utilizadas como jazida nas diferentes obras de engenharia. Algo relevante, sempre que possível, é a recomposição da flora original, o que contribui também para a preservação da fauna local.



Figura 11. Área de empréstimo usada na construção da Barragem da UHE Itumbiara (Foto: Maurício Martines Sales).

3.3 Rodovias não pavimentadas

A erosão em vias não revestidas ou dotadas de revestimentos primários tem diversas formas de manifestação. As ravinas e voçorocas ao longo da estrada são formas comuns e facilmente reconhecidas. Contudo, o maior dano ao tráfego acontece pela formação de sulcos transversais no sentido do trânsito ou ao atingirem o leito viário. Os sulcos se repetem com grande frequência e causam desconforto aos usuários e instabilidade aos veículos. Essa forma de erosão em sulcos é conhecida popularmente como “costela” (Figura 12).

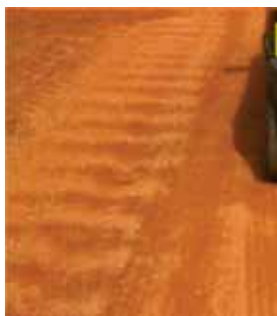


Figura 12. Sulcos transversais (“costelas”), BR-381, Minas Gerais (Foto: Anna Karina Chaves Delgado).

As costelas se formam pelo escoamento transversal da água, isto é, o perfil da via deve ter o seu eixo longitudinal mais elevado (do centro para as laterais), de modo a não acumular água na superfície, o que gera o fluxo transversal. Essa elevação faz a água atingir velocidades superiores à crítica no sentido transversal, originando os sulcos. Isso é mais frequente nas curvas em que o traçado exige superelevação na lateral externa da via, fazendo, portanto, com que os comprimentos de escoamento se tornem maiores, o que propicia velocidades mais elevadas da água. Por outro lado, há que se lembrar, também, de que o leito carroçável é compactado, o que reduz a permeabilidade. Se a água não se infiltra no solo, ela se acumula e escoar pela superfície. Pode-se dizer que a forma mais adequada de prevenir esse tipo de erosão é o revestimento do leito e, no caso dos revestimentos primários, o uso de materiais

menos erodíveis ou solos estabilizados. O revestimento impede o contato da água com o solo e, portanto, o destacamento das partículas.

3.3.1 Traçado

Nesta sessão, serão indicados fatos que orientam o traçado do ponto de vista dos solos, do relevo e, eventualmente, da hidrografia. Outras questões, tais como as ligadas a limites de propriedades e destinos, não serão abordadas. Há que se ter clareza de que o objetivo de uma estrada é interligar dois ou mais pontos e que o traçado ideal é uma reta, pois tem a menor distância. Contudo, obstáculos naturais, estratégias de segurança de trânsito, custos e atendimento a conveniências locais ou regionais podem introduzir importantes mudanças nesse traçado ideal.

Entre outros, dois fatores que podem ser limitantes, em especial ao se considerar os custos de implantação da via, são o perfil geológico e a geomorfologia da região por onde se deseja passar a estrada. Nesse caso, considere-se o perfil geológico o conjunto de embasamento rochoso e solos e como geomorfologia as formas de relevo naturais e de origem antrópica, incluindo-se, nesse último caso, a própria forma do relevo imposta pelo traçado definido, envolvendo cortes e aterros. A discussão pode começar pelo relevo.

Conforme foi mostrado na Figura 7, a forma da encosta é um fator determinante na erodibilidade do solo. Isso já foi estabelecido na Equação Universal da Erodibilidade dos solos, em consequência do fluxo superficial. Se considerado o fluxo de subsuperfície, a forma do relevo, ao intervir na posição do lençol freático, na umidade do solo e na interação solo-atmosfera, intervém, conforme mostrado por Jesus (2013), no potencial de erodibilidade do solo. Portanto, ao se traçar uma estrada, deve-se buscar os locais com menor declividade e com encostas lineares, e, ao se fazer cortes e aterros, deve-se avaliar o impacto deles nos processos erosivos. Isto faz com que a velocidade da água possa se manter nos limites da velocidade crítica de destacamento das partículas e, assim, manter a erosão sob controle.

Uma estratégia frequente para reduzir o comprimento de encostas é a colocação de curvas. Isto é, quebra-se a encosta em dois segmentos, de modo a reduzir o trecho de escoamento da água e, portanto, a sua energia erosiva. A Figura 13 mostra essa situação, em que, além da curva para diminuir o comprimento da encosta, foi colocada uma estrutura de coleta da água e de dissipação de energia da água superficial.



Figura 13. Colocação de curvas para redução do comprimento de encostas como estratégia para controlar a erosão (Foto: Wilson Conciani).

A declividade do traçado é sim um importante fator de erosão. A criação de cartas de erodibilidade baseadas na declividade do terreno é bastante comum. A Figura 14 exemplifica uma dessas cartas de declividade que auxiliam na escolha do traçado de uma rodovia.

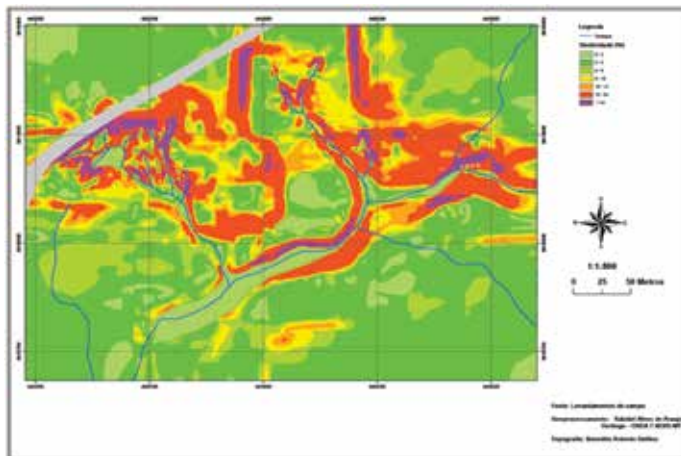


Figura 14. Exemplo de carta de declividade do terreno usada para escolha do traçado rodoviário.

Outras componentes importantes da questão geológica são o tipo de solo e o seu perfil de resistência. Nos anos 1980 e 1990, foram realizados diversos estudos e publicações sobre esse componente do projeto de obras lineares. Podem ser destacados aqui alguns desses trabalhos: Dias (1987), Nogami e Villibor (1995) e Conciani *et al.* (1995). No que se refere aos solos, devem-se observar não apenas a textura, mas também a atividade e a distribuição do solo nos perfis, segundo o seu grau de alteração. Pela baixa coesão, os solos granulares finos, como as areias, são apontados como os mais erodíveis. Entretanto, nas regiões de solos colapsíveis, como as argilas porosas não saturadas, a erosão é igualmente um problema ambiental grave.

Nos cortes, não raro, ao se atingir o solo saprolítico, nos quais predominam os siltes ou areias finas, surgem erosões de margem em sulcos, gerando sedimentos que contribuem para o assoreamento de cursos d'água e reservatórios (Figura 15).



Figura 15. Corte junto à BR 060, km 56, Goiás (Foto: José Camapum de Carvalho).

Na análise do potencial erodível do solo, a correlação entre a pedologia e a erodibilidade é uma ferramenta importante na definição dos traçados rodoviários. A Tabela 1, adaptada de uma publicação do IPT realizada em 1992, mostra algumas dessas correlações.

A utilização dessas informações de erodibilidade, associada ao uso de mapas pedológicos, permite ao projetista obter informações de traçado mais adequado quando se considera o aspecto da erosão associada à implantação e uso de uma via. Nesse caso, pode-se construir mapas de erodibilidade. Esses mapas são confeccionados pela superposição de mapas de pedologia, hidrografia e declividade. Em alguns casos, associa-se também a ocorrência de chuvas. O fato concreto é que o projetista dispõe de uma ferramenta que lhe permite escolher traçados com menor potencial de erosão.

Tabela 1. Quadro de correlações entre as classes de solo e índices de erodibilidade. (adaptado de IPT, 1992).

Classe	Índices de erodibilidade	Unidade pedológica
I	10,0 a 8,1	Cambissolos litólicos
		Argissolos (antigos pozólicos de textura arenosa a média) de perfis abruptos
		Neossolos quartzarênicos
II	8,0 a 6,1	Argissolos (antigos perfis podzólicos não abruptos)
III	6,0 a 4,1	Luvissolos
		Latossolos vermelho-amarelos com textura argilosa
IV	4,0 a 2,1	Latossolos de textura média
		Latossolos roxos
		Argissolos (antigo terra roxa estruturada)
		Chernossolos
V	2,0 a 0,0	Gleissolos, organossolos e neossolos aluviais
		Planossolos
		Gleissolos (antigo solonchack e solometz)

No que tange ainda aos aspectos geológicos, assumem importância: a geologia estrutural, a hidrogeologia e a presença de cavidades em subsuperfície. A Figura 16a ilustra uma bacia de retenção e infiltração, obra muito usada no Estado de Mato Grosso do Sul. No entanto, esse tipo de obra requer atenção especial em relação à presença de falhas e cavidades de subsuperfície, como ilustra a Figura 16b, que retrata o caso em que a presença de uma bacia de retenção e infiltração deu margem ao surgimento de um importante processo erosivo



Figura 16. Bacias de detenção: (a) Via de acesso ao Recanto Ecológico Rio da Prata, Jardim-MS, a partir da BR 267 (Foto: Wilson Conciani); (b) Margem da rodovia MS178 no trecho que liga Bonito à BR 267 (Foto: José Camapum de Carvalho).

de superfície. Destaca-se, como sobressai na cor da água mostrada na Figura 16a, que essa técnica construtiva, por um lado, permite a retenção de água e sedimentos; por outro, para que cumpra de modo eficaz sua função de infiltração, requer manutenção periódica, pois os sedimentos nela depositados não só reduzem o seu volume de armazenamento como também tendem a impermeabilizá-la.

3.3.2 *Drenagem*

As estruturas de drenagem são importantes ferramentas no controle e mitigação do potencial erosivo. Em se tratando de estradas, existem diversas possibilidades de ações de controle de erosão. A principal delas é o revestimento. No caso de pavimentos não revestidos ou dotados de revestimento primário, serão apresentados aqui alguns recursos frequentemente usados na prevenção contra processos erosivos: saídas de água, quebra-molas, caixas de coleta e dissipadores. Por outro lado, também deve-se lembrar dos taludes de cortes e aterros que ficam por vezes expostos e sujeitos à processos erosivos.

Os quebra-molas são barreiras transversais colocadas nas estradas. Essas barreiras são conhecidas na agricultura como camaleões. O seu propósito é parar o fluxo de água e dirigi-lo para uma caixa de coleta ou dissipador de energia. O espaçamento desses quebra-molas é definido em função da declividade e do regime de chuvas no local da obra. Para cada trecho, tem-se um espaçamento recomendado. Em se tratando de estruturas que são colocadas nas estradas, sua altura deve ser tal que permita a passagem de veículos e force a água a uma redução de velocidade. Para além da simples redução de velocidade da água, deve-se sempre acoplar esta solução a um desvio de água para fora do leito, de modo a impedir a sua infiltração local. O uso dessa solução deve ser restrito em locais de grande declividade ou de baixo volume de trânsito. Os quebra-molas causam desconforto, aumentam o desgaste dos veículos e exigem manutenção constante. Além disso, a falta ou o dano na sinalização da sua existência pode causar acidentes. Logo, trata-se de solução a ser usada com parcimônia.

Talvez, guardando essa ideia dos camaleões, criou-se trechos com ondulações na via que liga a rodovia MS-382 à Gruta do Lago Azul em Bonito-MS (Figura 17). Essas ondulações contribuem para a redução da velocidade do fluxo no leito estradal, reduzindo, assim, a velocidade da água no fluxo superficial. Além disso, quebram a monotonia dos grandes trechos lineares da via.



Figura 17. Via de acesso à Gruta do Lago Azul a partir da rodovia MS-382 (Foto: José Camapum de Carvalho).

As caixas de coleta são também importantes recursos para minimizar o potencial de erosão em estradas de terra. Esse recurso, em geral, está associado ao uso de quebra-molas. Um tira a água da estrada e o outro a coleta. Uma vez acumulada, parte da água lentamente se infiltra no solo, parte é evaporada e parte ainda é consumida por animais, não acarretando prejuízo ao trânsito e ao meio ambiente.

Um cuidado simples na construção e manutenção de estrada de terra é manter o centro da estrada ligeiramente mais elevado que as laterais. Em geral, esta declividade varia entre 1 e 4%. Assim sendo, não há acúmulo de água no leito carroçável, e a água que corre para a lateral é dirigida para áreas de infiltração ou de dissipação de energia. Um bom exemplo dessas áreas de dissipação pode ser visto na Figura 18, onde se observa que o fluxo é dirigido para uma área plana, na qual a velocidade diminui e a água se infiltra no solo. Para os casos em que a região de concentração do fluxo tem maior potencial erosivo, pode-se colocar pedras para reduzir a velocidade e promover a infiltração da água. A Figura 19 ilustra um desses casos.



Figura 18. Abaulamento do leito carroçável e o direcionamento do fluxo para região de dissipação da energia (Foto: Wilson Conciani).



Figura 19. Dissipador de energia com uso de pedras (Foto: Wilson Conciani).

Outro importante recurso para controlar a erosão no leito carroçável e na faixa de domínio é o uso de diques de contenção. Esses diques são construídos na margem da rodovia e contêm a água para impedir o fluxo concentrado de grandes volumes de água. Os diques favorecem a infiltração e, mesmo no caso em que são ultrapassados pelo fluxo, a água tem sua velocidade reduzida. A Figura 20a mostra o uso de diques nas margens de uma estrada revestida. Contudo, essa solução é comum em pavimentos não revestidos. Nos casos de regiões mais planas, os diques são feitos pela escavação do bota dentro, situação em que passam a funcionar como poços de coleta ou lagos de contenção. Embora simples, essas obras requerem projeto e controle construtivo, pois, como é sabido, o transbordo da água acumulada pode erodir o barramento, fazendo com que ele perca sua finalidade (Figura 20b).



Figura 20. Exemplos de situações com uso de diques: (a) Uso de diques de contenção do fluxo nas margens de rodovias (Foto: Wilson Conciani); (b) Comprometimento dos diques por processos erosivos, margem da GO-020 (Foto: José Camapum de Carvalho).

3.3.3 Revegetação

A revegetação das margens das estradas e das áreas de empréstimo também é uma estratégia de controle de erosão. Nesse caso, a vegetação atua em duas formas: impede o destacamento das partículas e reduz a velocidade do fluxo. De um modo geral, as margens das estradas devem ser recobertas com gramíneas para controlar o potencial de erosão e assegurar a visibilidade em grandes extensões. As áreas mais afastadas e as áreas de empréstimo devem ser revegetadas com gramíneas e com espécies arbóreas. Os agrônomos e engenheiros florestais usam diferentes espécies vegetais para que este processo seja mais rápido e eficiente. Por exemplo: gramíneas associadas com plantas precursoras (como as embaúbas), seguidas de espécies mais densas e duradouras (como ipês). Assim, tem-se que uma espécie protege a outra até que toda a flora esteja recomposta. A Figura 21 mostra o plantio de gramíneas em mudas em uma área de empréstimo.



Figura 21. Área de empréstimo onde a grama está sendo plantada (Foto: Wilson Conciani).

O plantio da grama e das árvores para revegetação das margens e das áreas de empréstimo carece de substrato de boa qualidade para seu sucesso. Ocorre que toda a camada fértil do solo foi removida. Para assegurar um bom substrato, toda a camada vegetal (solo superficial, horizonte A e ou H) é estocada. Assim, na fase final da obra, esse material é usado na forração do solo ou das covas onde as árvores são plantadas. Na obra da Figura 21, esse cuidado não

foi tomado e, nesses casos, é comum a correção do pH do solo e a incorporação de nutrientes. Deve-se, nesse caso, analisar se os produtos químicos adicionados não são desagregadores do solo, o que pode facilitar a ocorrência de processos erosivos.

4 Materiais de construções das vias

4.1 Exemplos de especificações para a camada de revestimento

Na literatura nacional e internacional, existem várias especificações voltadas especialmente para a seleção adequada de materiais para o revestimento primário, sendo que algumas também sugerem critérios para a definição de espessuras das camadas a serem empregadas. Entretanto, é comum serem verificadas diferenças substanciais entre tais especificações, incluindo, muitas vezes, critérios antagônicos entre elas. Além disso, boa parte dos trabalhos publicados sobre o assunto se embasa nos princípios da Mecânica dos Solos tradicional, concebidos para solos originados predominantemente pelo intemperismo físico (típico dos países frios), podendo refletir em resultados ineficientes para solos originados predominantemente pelo intemperismo químico (solos tropicais).

4.1.1 A especificação do DNIT e a prescrição da classificação MCT

O Manual de Conservação Rodoviária do DNIT (2005) recomenda, para emprego em revestimento primário, a utilização de material oriundo de jazida, o qual deve atender aos critérios da Tabela 2 e não deve apresentar expansão maior que 2%. Tal material, conhecido em campo como sílico-argiloso, cascalho, saibro ou piçarra, deve ser espalhado em camadas de 10 a 20cm sobre a terraplenagem concluída, sendo recomendável sua adequada compactação e que a pista tenha largura uniforme.

Tabela 2. Características dos materiais de revestimento primário (modificado de DNIT, 2015).

Descrição	Classif. TRB	Granulometria				IP (%)	Indicação como revestimento primário
		Diâmetro máximo (mm)	% passante				
			n. 10 (2,0 mm)	n. 40 (0,425 mm)	n. 200 (0,075 mm)		
Cascalho origem vulcânica	A-2-6	25	49	38	24	17	Bom
Cascalho quartzoso	A-2-4	24	58	45	24	9	Bom
Cascalho laterítico	A-2-4	22	51	42	26	10	Bom

Obs.: TRB = *Transportation Research Board*; IP = índice de plasticidade, sendo que os valores de % passante e IP se referem ao limite máximo.

Constata-se que o emprego dessa especificação na seleção dos materiais, sem uma análise crítica prévia, pode resultar em desempenho insatisfatório ou então em custos elevados de forma desnecessária. Por ser baseada na classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), que considera granulometria e limites de consistência ao invés do comportamento, restringe-se a escolha a materiais de classificação A-2-6 e A-2-4, os quais, a depender da natureza dos finos, podem apresentar alto potencial erodível. Por outro lado, ela não contempla o emprego de solos que possuam expressiva porcentagem de finos, mas que podem apresentar excelente comportamento, inclusive com relação à erosão, e que, muitas vezes, se encontram abundantemente disponíveis no local, repercutindo em aumento de custos e impactos ambientais desnecessários para importar, de distâncias maiores, materiais que atendam às premissas da especificação, às vezes com desempenho pior.

Alternativamente, destacam-se as publicações de Nogami e Villibor (1995) e Villibor e Nogami (2009), que contemplam metodologias para a seleção dos materiais com base em critérios que dizem comportamento, não se atendo àquelas baseadas em classificações tradicionais que levam em conta basicamente granulometria e limites de Atterberg. A experiência tem demonstrado que, para solos originados predominantemente pelo intemperismo químico, também denominados como “solos tropicais”, os critérios tradicionais não condizem, com o desempenho para as diversas aplicações geotécnicas. Dessa forma, foi desenvolvido o sistema de classificação Miniatura, Compactado, Tropical (MCT). Assim, na Tabela 3, são apresentadas as recomendações de algumas aplicações geotécnicas dos grupos da classificação MCT, as quais incluem o emprego dos solos para construção de camada de base de pavimentos, reforço de subleito compactado, subleito compactado, corpo de aterro, camada de proteção de erosão e revestimento primário.

Conforme as indicações da Tabela 3, os melhores solos para emprego em camadas de revestimento primário são os pertencentes aos grupos LA' e LG' da classificação MCT, nessa ordem. Já para camadas de proteção de erosão, os solos pertencentes a esses grupos também são os mais recomendados, porém, em ordem inversa de prioridade. Percebe-se que os grupos da classificação da AASHTO, em que esses solos recaem, não coincidem com os grupos recomendados pela especificação do DNIT, ou seja, esses solos seriam descartados para uso em revestimento primário, mesmo sendo, em termos de solos finos, os melhores segundo a classificação MCT.

Os solos do grupo LA' possuem colorações vermelha e amarela, são tipicamente arenosos e são encontrados no horizonte B dos solos pedologicamente designados por Nitossolos e Argissolos. Podem ainda ser encontrados em perfis pedologicamente não classificáveis como lateríticos, possuindo, nesse caso, cor branca, cinza, etc. Os taludes de corte nesses solos são firmes, pouco ou não erodíveis, nitidamente trincados, quando expostos às intempéries. Tais solos, quando devidamente compactados, adquirem capacidade de suporte e módulos de resiliência elevados, baixa permeabilidade, pequena variação volumétrica (contração e expansão), razoável coesão, propriedades tais que podem possibilitar seu uso em pavimentação. Já em suas condições naturais possuem baixa massa específica aparente seca, baixa capacidade de suporte e podem ser colapsíveis.

Já os solos do grupo LG' são constituídos por argilas ou argilas arenosas do horizonte B dos solos conhecidos como Latossolos, Argissolos, Luvisolos e Nitossolos. Quando, na sua constituição, possuírem porcentagem relativamente alta de areia, podem apresentar, na condição compactada, propriedades similares às dos solos do grupo LA', porém com capacida-

de de suporte e módulos de resiliência menores; maior plasticidade; menor massa específica aparente seca e maior umidade ótima para mesma energia de compactação; maior contração e maior resistência à erosão hidráulica. Na sua condição natural, podem ser colapsíveis, apresentando, nesse caso, permeabilidade *in situ* elevada, mesmo se tratando de solos argilosos. Os taludes de corte normalmente são resistentes à erosão pluvial.

Tabela 3. Alguns empregos geotécnicos dos solos da classificação MCT (modificado de NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

Designação		Granulometrias típicas								
k = caolínico m = micáceo s = sericítico q = quartzoso		areias siltes (q, s)	areias siltosas	Siltes (k, m) Siltes arenosos	argilas argila arenosa argila siltosa siltes argilosos	areias	areias argilosas	argilas argila arenosa argila siltosa siltes argilosos		
		N = não laterítico			L = laterítico					
COMPORTAMENTO		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'		
GRUPO MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'		
Propriedades	Mini-CBR (%)	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B		
	sem imersão perda por imersão									
	Expansão	B	B	E	M, E	B	B	B		
	Contração	N	B, M	M	B, M	B, M	B	B		
	Coefficiente de permeabilidade	M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B		
	Coefficiente de sorção	E	B, M	E	M, E	B	B	B		
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = muito elevado E = elevado M = médio B = baixo n = não recomendado								
Utilização	Base de pavimento	n	4°	n	n	2°	1°	3°		
	Reforço de subleito compactado	4°	5°	n	n	2°	1°	3°		
	Subleito compactado	4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°		
	Aterro compactado	4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°		
	Proteção à erosão	n	3°	n	n	n	2°	1°		
	Revestimento primário	5°	3°	n	n	4°	1°	2°		
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas		USCS	SP	MS	SM, CL	MH	SP	SC	MH	
			SM	SC	ML, MH	CH	SC		ML	
				ML	ML, MH	CH			CH	
		TRB	A-2	A-2	A-4	A-4	A-6	A-2	A-2	A-6
			A-4	A-4	A-5	A-7-5	A-7-5			
			A-7	A-7-5	A-7-5	A-7-5				
						A-4		A-7-5		

Obs.: USCS = *Unified Soil Classification System*; TRB = *Transportation Research Board*.

4.1.2 A especificação da República da África do Sul

Em nível de outros países, destaca-se a especificação do Departamento de Transportes da República da África do Sul para revestimento primário, a qual foi desenvolvida a partir da

década de 80, sofrendo várias melhorias e adaptações ao longo do tempo, de acordo com as experiências observadas em campo. Entende-se ser importante apresentar, mesmo resumidamente, a referida especificação, pois a República da África do Sul apresenta marcantes similaridades de clima e solo com o Brasil. O documento do qual foram extraídas as informações a seguir consiste num artigo técnico publicado por Paige-Green (1990). Na Tabela 4 e na Figura 22, são apresentadas as recomendações para a seleção de materiais para emprego em camada de revestimento primário, de acordo com a mencionada especificação.

Tabela 4. Recomendações para a seleção de materiais para emprego em camada de revestimento primário (modificado de PAIGE-GREEN, 1990).

Propriedade	Valor
Diâmetro máximo	37,5 mm
Quantidade máxima acima do diâmetro máximo	5%
Produto de Retratibilidade (<i>Shrinkage Product</i> - S_p)	100-365 (preferível até 240)
Coefficiente de Graduação (G_c)	16-34
CBR compactado (95% do Proctor modificado)	>15%
Impacto Treton	20-65

Obs.: S_p = retratibilidade linear x % passante na peneira de 0,425mm; G_c =(% passante na peneira de 26,5mm - % passante na peneira de 2,0mm) x % passante na peneira de 4,75mm/100.

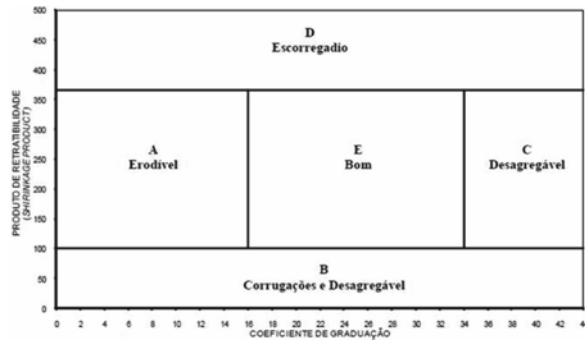


Figura 22. Diagrama representando a expectativa de desempenho dos materiais (PAIGE-GREEN, 1990).

4.2 O uso de solos finos

Apesar da crescente comprovação da boa qualidade dos solos finos tropicais como material de pavimentação, atualmente, no Brasil, ainda há sérias restrições a sua aplicação de forma mais generalizada, por se ater ainda à metodologia tradicional do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), de uso e aplicação de materiais, a qual requer adaptações aos solos tropicais. Tal vinculação à metodologia tradicional, em geral, se justifica pelo baixo uso da metodologia MCT em nível nacional, uma vez que esta se encontra mais disseminada no Estado de São Paulo. Tem-se ainda, quando do uso dos solos finos, problemas como o aparecimento de trincas de reflexão na base da estrutura de pavimento e a suscetibilidade desses solos à erosão provocada pelo fluxo de água. Cabe salientar, no entan-

to, que problemas assim são perfeitamente evitáveis mediante a realização de uma avaliação consistente do solo, na medida em que sejam evitados, por exemplo, o emprego de materiais não condizentes com a situação, ou o uso de uma condição de compactação inapropriada.

No entanto, como as pesquisas têm mostrado a excelência do comportamento no que tange à ausência de ruptura de base, valores de deflexão menores ao longo do tempo, valores de módulo de resiliência elevados, facilidade na recuperação, em decorrência da facilidade e abundância de solos lateríticos finos no país, faz-se necessário considerar a possibilidade do uso desses solos, em especial nas rodovias vicinais e naquelas submetidas a baixo e médio volume de tráfego. Nesse aspecto, cabe citar os documentos técnicos ora em vigor no meio rodoviário brasileiro:

- Norma DNIT 098/2007 – ES: base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço;
- DER/PR ES-P 08/05: Pavimentação: Solo Arenoso Fino Laterítico;
- ET-DE-P00/15 – Sub-base ou Base de Solo Arenoso Fino de Comportamento Laterítico – SAFL.

Buscando orientar sobre o uso de solos finos para a execução de vias não pavimentadas, serão analisados as propriedades e o comportamento de três dos 13 solos do Distrito Federal, estudados por Delgado (2007), sendo: um solo profundamente intemperizado, solo laterítico denominado HB7; um solo de transição, solo da zona mosqueada nomeado ZM3; e um solo saprolítico fino, solo pouco intemperizado designado como SF13. Essa seleção objetiva colocar em destaque a importância de se considerar as diferenças de propriedades e comportamento quando se usa os diferentes tipos de solos finos na construção rodoviária, bem como mostrar que a simples classificação constitui-se em mera ilustração do potencial comportamental do solo, requerendo, portanto, estudos mais detalhados. Pretende-se ainda mostrar a importância de se classificar o solo para condições as mais próximas possíveis da realidade de campo, devendo-se, por exemplo, considerar a análise granulométrica sem o uso de defloculante na sedimentação, pois essa é, geralmente, salvo raras exceções, a mais representativa da condição de campo.

Apesar de diferenças nos níveis de intemperização sofrida pelos três solos oriundos de locais distintos, todos eles foram coletados em horizontes mais superficiais (0,20 a 1,60m em relação à superfície do terreno), visando avaliar sua aplicabilidade na pavimentação a um baixo custo. No estudo realizado por Delgado (2007), são apresentadas análises mineralógicas, químicas, físicas e estruturais, correlacionando-as às classificações segundo os sistemas USCS, TRB e MCT, uma vez que estes, em especial os dois últimos, relacionam as características físicas dos materiais a sua aplicabilidade em camadas de pavimento.

A Tabela 5 apresenta as características granulométricas e os limites de Atterberg dos materiais aqui analisados. As análises granulométricas foram realizadas com e sem o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio. Ao se comparar os resultados obtidos nessas duas condições, verifica-se que, para o solo HB7, o defloculante reduziu de modo significativo o teor de areia nele presente, indicando que os agregados foram desfeitos. Para os solos ZM3 e SF13, no entanto, o defloculante usado atuou gerando a agregação do solo. Isso se deve ao fato de que a ilita presente nesses solos (Tabela 6) agrega quando em presença do defloculante. Essa particularidade mostra a importância de se considerar também a composição químico-mineralógica do solo nas análises.

Tabela 5. Caracterização das amostras de solos em estado natural (modificado de DELGADO, 2007).

Amostra	Granulometria sem defloculante				Granulometria com defloculante				Limites de Atterberg			
	P(%)	A(%)	S(%)	Ar(%)	P(%)	A(%)	S(%)	Ar(%)	w _L (%)	w _p (%)	IP(%)	Ia
HB7	0,0	53,0	40,0	7,0	0,0	20,0	33,0	47,0	40	32	8	0,17
ZM3	0,0	85,0	7,0	8,0	0,0	93,0	0,8	6,2	-	-	NP	-
SF13	0,0	13,8	78,1	8,1	0,0	90,0	5,0	5,0	-	-	NP	-

Obs.: P = pedregulho, A = areia, S = silte, Ar = Argila, w_L = limite de liquidez, w_p = limite de plasticidade, IP = índice de plasticidade, Ia = atividade da argila, NP = não plástico.

Tabela 6. Propriedades Químicas e Mineralógicas dos Solos (modificado de DELGADO, 2007; modificado de CARDOSO, 2002).

Amostra	Propriedades Químicas											
	pH KCl	pH H ₂ O	ΔpH	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ cmolc/kg	K ⁺ cmolc/kg	Na ⁺ cmolc/kg	Al ³⁺ cmolc/kg	H ⁺ +Al ³⁺ cmolc/kg	% Al	% V	CTC cmolc/kg	MO %
HB7	4,9	5,6	-0,7	0,07	0,03	-	0,60	0,81	25	35	0,81	0,45
ZM3	5,0	5,1	-0,1	0,21	0,02	-	0,01	0,60	6	90	0,83	0,20
SF13	4,2	4,7	-0,5	0,30	0,0	-	0,01	0,61	15	72	0,89	0,25

Amostra	Propriedades Mineralógicas						
	Quartzo (%)	Rutilio + Anatásio (%)	Gibbsita (%)	Goetita (%)	Hematita (%)	Caulinita (%)	Ilita (%)
HB7	22,3	1,7	23,1	3,6	10,9	31,0	2,4
ZM3	88,6	0,1	1,3	0,1	1,6	5,1	3,2
SF13	45,1	0,6	1,2	3,0	3,6	18,6	26,3

Obs.: ΔpH = pH H₂O - pH KCl; CTC = capacidade de troca catiônica, MO = matéria orgânica.

As propriedades químicas e mineralógicas determinadas por Delgado (2007) e Cardoso (2002) estão apresentadas na Tabela 6. Vários estudos mostraram a influência da composição química e mineralógica no comportamento dos solos. Nesse sentido, Cardoso (2002) observou que a variação das propriedades físicas dos solos deve encontrar justificativa tanto na composição mineralógica quanto nas propriedades químicas deles. E, sob essa ótica, quando se fala das propriedades físicas dos solos, lateríticos ou não, deve-se considerar que elas guardam relação com características químico-mineralógicas. Assim, por exemplo, para os solos usados neste capítulo, se considerado o pH em KCl, o solo SF13 seria aquele com maior potencial agregador; porém, se considerado o teor de alumínio, seria o solo HB7 que estaria em condição mais favorável à agregação, de acordo com a observação feita por Botelho da Costa (1973), que indica que a agregação em solos lateríticos decorre também da ação floculante,

irreversível ou não, dos hidróxidos de ferro e/ou alumínio. Assim, conforme Botelho da Costa (1973) e os valores de \square pH, sabendo-se que valores positivos desse parâmetro apontam para o predomínio dos óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, ter-se-ia que o solo ZM3 seria o solo com maior potencial de presença desses elementos, pois é o que possui valor mais próximo do positivo (-0,1). Como esses e outros fatores intervêm na agregação do solo, são necessárias, no entanto, avaliações complementares como, por exemplo, a da mineralogia. A Tabela 6 mostra ainda que, se considerados os teores de gibsitita, hematita e goetita, o solo HB7 é, entre os três solos analisados, o que apresenta maior teor em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio e, portanto, o que seria o mais agregado, como de fato é. Destaque-se, como já observado na análise granulométrica dos três solos estudados, que geralmente o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio assume caráter agregador quando da presença de ilita nos solos do Distrito Federal.

Cardoso (2002) encontrou importantes correlações lineares positivas do pH em KCl com a fração argila obtida pela norma da ABNT NBR 7181/84, com uso de defloculante ($R = 0,932$), com o índice de vazios (e) ($R = 0,901$) e com a razão entre as frações argila determinadas a partir da análise com e sem uso de defloculante ($R = 0,801$), mostrando que o pH dos solos finos está associado diretamente ao teor de argila e é importante na formação de agregados. O citado autor mostrou ainda, ao extrair de alguns solos que estudou, entre eles o HB7, que os oxi-hidróxidos de ferro cristalino e de baixa cristalinidade são responsáveis pela agregação existente nos solos tropicais, e que, inclusive para o solo HB7, a remoção desses compostos químicos gerava a redução dos limites de liquidez e plasticidade, mantendo, no entanto, o índice de plasticidade. Observa-se, portanto, que análises mais integradas das propriedades físicas, químicas e mineralógicas podem contribuir para uma melhor avaliação do comportamento dos solos tropicais.

É necessário se destacar ainda que a baixa atividade dos solos pode ser explicada pela predominância de argilomineral do tipo caulinita e pela ausência de argilominerais do tipo montmorilonita e outros de maior atividade. Embrapa (1999) apresenta a atividade do solo (T) como dada pela $CTC \times 100$ (cmolc/kg \times 100), dividida pelo teor de argila em porcentagem, que, nesse caso, deve ser considerada como a fração de argila na condição defloculada e desagregada. Essa classificação apenas rotula o material em solo de atividade alta (Ta), solos com $T > 27$ cmolc/kg, e solo com atividade baixa (Tb), para valores de T menores que esse limite. Considerando-se as texturas dos solos (Tabela 5) e os valores de CTC contidos na Tabela 6, têm-se, respectivamente, para os solos HB7, ZM3 e SF13, atividades iguais a 1,7, 13,4 e 17,8; o que classifica todos os solos como de baixa atividade, no entanto, observa-se certa coerência entre esses valores, em especial o do HB7 e SF13, e a natureza das argilas, pois, no HB7, predomina a caulinita e, no SF13, a ilita, cabendo destacar que a própria Embrapa (1999) indica que essa classificação não se aplica às areias, ou seja, não se aplica ao solo ZM3, que contém 93% de areia (Tabela 5). Já Skempton (1953) define o coeficiente de atividade (A_c) como igual ao índice de plasticidade dividido pela fração argila, sendo que, por essa classificação, apenas o solo HB7 pode ser classificado apresentando A_c igual a 0,17, ou seja, solo inativo, pois os outros dois solos foram classificados como não plásticos.

Tratando agora da classificação dos solos, a Tabela 7 apresenta as classificações segundo os sistemas TRB, USCS e MCT. Observa-se, nessa tabela, certa incompatibilidade entre as classificações segundo esses três sistemas de classificação. A classificação do solo HB7, solo la-

terítico, mostra que, nos sistemas convencionais de classificação, a não utilização do defloculante conduz o solo a uma classificação mais condizente com o seu comportamento laterítico. Se consideradas as granulometrias desses solos, apresentadas na Tabela 5, verifica-se também incoerência entre a classificação MCT do solo ZM3 com a sua textura.

Tabela 7. Classificação dos solos estudados (modificado de DELGADO, 2007).

Amostra	TRB		USCS		MCT	
	sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	*
HB7	A-2-4	A-7	GC	SM	LG'	LG'
ZM3	A-3	A-3	SC	SC	LG'	NA'
SF13	A-3	A-4	SM	SM	NA	NS' - NA

Obs.: USCS = *Unified Soil Classification System*; TRB = *Transportation Research Board*; MCT = Miniatura, Compactado, Tropical; * classificação considerando propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

No entanto, a Figura 23 mostra que esse solo, no sistema classificatório MCT, apesar de se situar como LG', encontra-se próximo às fronteiras das subclasses NG', LA' e NA', o que torna recomendável a análise de outras propriedades como a própria granulometria. Nesse caso específico, com base na granulometria e na plasticidade, esse solo se situaria entre a subclasse LA' e a NA', deixando ainda uma indefinição. Recorrendo-se, porém, de modo complementar, às propriedades químicas e mineralógicas, verifica-se ser o solo rico em quartzo (88,6%) e pobre em oxi-hidróxidos de ferro e alumínio (1,3% de gibsitita, 0,1% de goetita e 1,6% de hematita), o que lhe conferiria, em teores mais elevados, um comportamento laterítico efetivo. Com essa composição, é então possível concluir se tratar, na realidade, de um solo NA'.

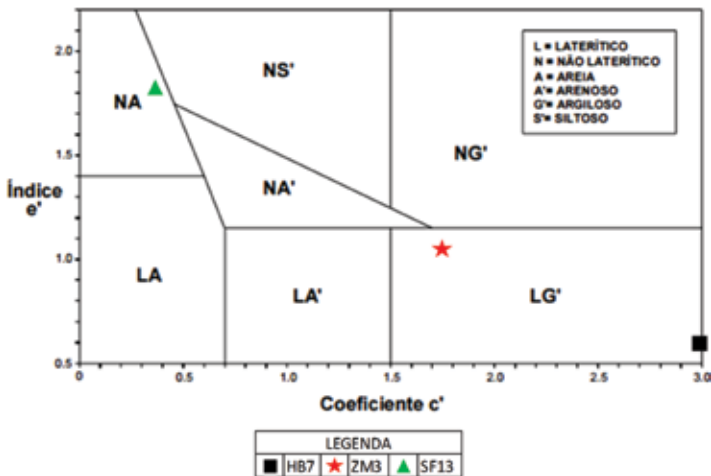


Figura 23. Classificação dos solos pela metodologia MCT (DELGADO, 2007).

Segundo a metodologia MCT, o solo SF13 é classificado como um solo NA, porém, na fronteira com o enquadramento como um solo NS'. Se observadas as características texturais apresentadas na Tabela 5, conclui-se tratar-se de um silte arenoso, portanto, mais uma vez a

complementação na análise classificatória, por meio da observação de outras propriedades do solo, mostra-se relevante. Destaque-se, como já discutido, que, devido ao fato de a illita assumir papel agregador quando em presença do defloculante hexametáfosfato de sódio, deve-se considerar os resultados obtidos sem o uso de defloculante na análise textural desse solo. Analisando-se sua composição mineralógica (Tabela 6), observa-se, no entanto, tratar-se, em termos mineralógicos, de uma argila arenosa, entendendo-se que a gibsitita, a goetita e a hematita integram a fração argila, apesar de não integrarem o grupo dos argilominerais. Do ponto de vista textural, considerando-se ainda a mineralogia, é possível colocar a hipótese da illita, que pertence ao grupo das micas, encontrar-se na fração silte. Entende-se, portanto, que a classificação MCT desse solo deveria ser reputada, levando-se em consideração as demais propriedades, como de fronteira NS' - NA.

Diante do exposto, percebe-se que, para qualquer sistema de classificação, faz-se necessário, sempre que possível, atentar-se para as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos finos.

Na Tabela 8, são apresentados as características e o uso desses solos, segundo os respectivos sistemas de classificação. Observa-se, nessa tabela, que se têm características ou usos similares para solos com textura e plasticidade bastante distintas, mostrando, assim, a necessidade de análises mais amplas das propriedades e comportamento dos solos tropicais.

Tabela 8. Características/Usos dos solos de acordo com os sistemas de classificação TRB, USCS e MCT (modificado de DELGADO, 2007).

CARACTERÍSTICAS / USO DE ACORDO COM OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO			
SOLOS	TRB	USCS	MCT
HB7 *	Classificação: A-7 / A-7-5 / A-7-6 Comportamento como Subleito: Sofível a Mau	Classificação: SM	Classificação: LG
		Trabalhabilidade como material de construção: Regular a Mau	Excelente Proteção a Erosão
		Permeabilidade Compactado: Semi-permeável a Impermeável	Bom para Revest. Primário
		Resistência Compactado e saturado: Boa	Médio para Corpo de Aterro
		Compressibilidade Compactado e saturado: Pequena	Médio para Subleito Compactado
HB7 **	Classificação: A-2-4 Comportamento como Subleito: Excelente a Bom	Classificação: GC	Classificação: LG
		Trabalhabilidade como material de construção: Boa	Excelente Proteção a Erosão
		Permeabilidade Compactado: Impermeável	Bom para Revest. Primário
		Resistência Compactado e saturado: Regular a Boa	Médio para Corpo de Aterro
		Compressibilidade Compactado e saturado: Muito Pequena	Médio para Subleito compactado
ZM3 **	Classificação: A-3 Comportamento como Subleito: Excelente a Bom	Classificação: SC	Classificação: LG
		Trabalhabilidade como material de construção: Boa	Excelente para Proteção a Erosão
		Permeabilidade Compactado: Impermeável	Bom para Revest. Primário
		Resistência Compactado e saturado: Regular a Boa	Médio para Corpo de Aterro
		Compressibilidade Compactado e saturado: Pequena	Médio para Subleito compactado
ZM3 Δ	Classificação: A-3 Comportamento como Subleito: Excelente a Bom	Classificação: SC	Classificação: NA'
		Trabalhabilidade como material de construção: Boa	Médio para Proteção a Erosão
		Permeabilidade Compactado: Impermeável	Médio para Revest. Primário
		Resistência Compactado e saturado: Regular a Boa	Péssimo para Corpo de Aterro
		Compressibilidade Compactado e saturado: Pequena	Péssimo para Subleito compactado
SF13 *	Classificação: A-4 Comportamento como Subleito: Sofível a Mau	Classificação: SM	Classificação: NA
		Trabalhabilidade como material de construção: Regular a Mau	Péssimo para Revest. Primário
		Permeabilidade Compactado: Semi-permeável a Impermeável	Ruim para Corpo de Aterro
		Resistência Compactado e saturado: Boa	Ruim para Subleito compactado
		Compressibilidade Compactado e saturado: Pequena	Ruim para Reforço de Subleito
		Características de drenagem: Regular a Má	

CARACTERÍSTICAS / USO DE ACORDO COM OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO			
SOLOS	TRB	USCS	MCT
SF13 **	Classificação: A-3 Comportamento como Subleito: Excelente a Bom	Classificação: SM	Classificação: NA
		Trabalhabilidade como material de construção: Regular a Mau	Revest. Primário
		Permeabilidade Compactado: Semi-permeável a Impermeável	Corpo de Aterro
		Resistência Compactado e saturado: Boa	Subleito compactado
		Compressibilidade Compactado e saturado: Pequena	Reforço de Subleito
		Características de drenagem: Regular a Má	
SF13 Δ	Classificação: A-3 Comportamento como Subleito: Excelente a Bom	Classificação: SM	Classificação: NS' - NA
		Trabalhabilidade como material de construção: Regular a Mau	
		Permeabilidade Compactado: Semi-permeável a Impermeável	
		Resistência Compactado e saturado: Boa	Péssimo para Subleito compactado
		Compressibilidade Compactado e saturado: Pequena	Péssimo para Corpo de Aterro
		Características de drenagem: Regular a Má	

* Com defloculante

** Sem defloculante

Δ ZM3: Solo reclassificado com base na textura e composição químico-mineralógica

Nesse sentido, considerando-se o preconizado na Tabela 8, conjuntamente aos parâmetros apresentados na Tabela 9, observa-se que os três tipos de solo estudados por Delgado (2007) e aqui usados como exemplo não se enquadram como adequados para aplicação como bases de pavimento. Os solos HB7 e SF13 poderiam ter outras utilizações e o solo ZM3, após reclassificação e considerando-se os resultados de mini CBR mostrados na Figura 25, não seria recomendado para uso em estruturas de pavimento. Além disso, é notável que a simples caracterização dos materiais e o enquadramento em uma classe de uma determinada classificação são, muitas vezes, insuficientes para se avaliar sua potencialidade de uso na construção rodoviária. Demandam-se, portanto, estudos complementares de capacidade de suporte e comportamento quando em presença de variação de umidade, ou mesmo, no caso de rodovias não pavimentadas ou com revestimento primário, de erodibilidade quando o revestimento se submete a fluxos superficiais.

Tabela 9. Critérios gerais para escolha de solo arenoso fino laterítico para base de pavimentos – Uso geral para qualquer região do país (modificado de NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Propriedades	Intervalos Admissíveis	Métodos de Ensaios
Grupos MCT	LG', LA', LA	M5 e M8
Capacidade de Suporte Mini-CBR H0 (%)	≥ 40	M2
Expansão sem sobrecarga – Es (%)	≤ 03	M2
Relação RIS (%) ou Perda de Suporte por Imersão PSI (%)	≥ 50	-
	≤ 50	-
Contração axial – Ct (%)	0,1 a 0,5	M3
Coefficiente de Sorção d'água – s [cm / √min]	10 ⁻² a 10 ⁻⁴	M4
Coefficiente de permeabilidade – ks [cm/s] (opcional)	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸	M4
Valores na umidade ótima da energia Intermediária do Mini-Proctor		

Obs.: M2 = Ensaio de Expansão; M3 = Ensaio de Contração; M5 = Ensaio de Compactação (Mini-Proctor – M1e Mini-MCV – M5); M8 = Ensaio de Perda de Massa por Imersão.

Para avaliação da resistência dos solos aqui analisados, inicialmente, foram determinadas as curvas de compactação, cujas condições ótimas são apresentadas na Tabela 10. A partir

desse resultados, visando à verificação da condição de suporte, foram realizados ensaios de mini-CBR para as energias de compactação Proctor Normal ($N = 5$ golpes), Proctor Intermediária ($N = 8$ golpes) e Proctor Modificada ($N = 20$ golpes), conforme mostra a Figura 24. Estudou-se o comportamento dos solos na condição não saturada (após compactação, representada pelos símbolos cheios) e saturada (após imersão e determinação de expansão, representadas pelos símbolos vazios). Nessa figura, são apresentados os resultados de resistência para diferentes umidades de compactação, visando simular a condição de variabilidade tanto da umidade de compactação em campo quanto das variações da umidade de equilíbrio em campo após a camada estar finalizada.

Tabela 10. Parâmetros de compactação dos solos para diferentes energias (modificado de DELGADO, 2007).

Amostras	Proctor Normal		Proctor Intermediária		Proctor Modificada	
	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
HB7	30,0	14,30	17,0	15,80	17,4	16,10
ZM3	21,0	14,80	21,0	15,00	21,3	15,20
SF13	18,0	16,20	16,0	16,50	15,0	16,80

Obs.: w_{ot} = umidade ótima, γ_{dmax} = peso específico aparente seco máximo.

Diante dos dados obtidos, Delgado (2007) observou que:

- O melhor comportamento foi o obtido para o solo HB7, solo laterítico, e o pior para o solo de transição ZM3, solo não laterítico. Todos os solos sofreram grande perda de resistência com a saturação, exceto alguns pontos do solo ZM3 (Tabela 10). No caso desse solo, tanto os ganhos como as perdas, apesar de percentualmente elevadas, não são relevantes, se observado que os valores de resistência são pequenos. Sendo assim, observa-se nitidamente a importância do sistema de drenagem como forma de garantir o bom comportamento dos materiais, além de prevenir erosões, que, em grande parte dos casos, são causadas pela perda de resistência dos materiais e consequente carregamento de partículas;
- Para os solos HB7 e SF13, verificaram-se valores razoáveis de mini-CBR, que já indicam suas aplicações respectivamente como sub-base e como reforço de subleito, desde que satisfeitas as condições de drenagem necessárias, cabendo, no entanto, atenção especial para o solo SF13, classificado na fronteira NS^s-NA.

Juntamente com a resistência, outro parâmetro de destaque para a seleção de materiais na metodologia MCT é a perda de massa por imersão, que pode ser correlacionada ao maior ou menor potencial de erodibilidade do material; sendo assim, também foram realizados ensaios para os diferentes materiais nas energias normal e intermediária de compactação, conforme apresentado na Tabela 11. Os resultados obtidos mostram que os piores comportamentos foram registrados para o solo ZM3 e SF13, os quais são compatíveis com os resultados das análises complementares realizadas. A partir do conjunto de dados visualizados na Tabela 12, depreende-se, mais uma vez, que fica comprovada a necessidade de realização de

análises complementares, de forma a se determinar a aplicação dos solos, sendo que, quanto à erodibilidade, o melhor comportamento foi verificado para o solo HB7 e os piores para os solos ZM3 e SF13.

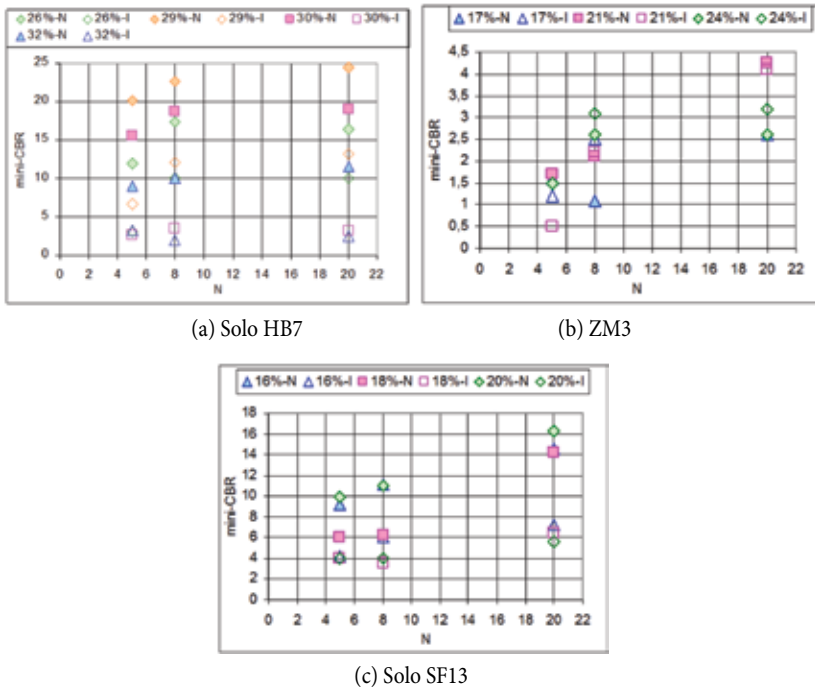


Figura 24. Valores de Mini CBR para diferentes energias de compactação (N) e umidades (DELGADO, 2007).

Segundo Melfi (1994), a relação existente entre as propriedades mecânicas dos materiais, sua composição mineralógica e organização interna dos grãos é marcante. Sendo assim, torna-se cada vez mais importante o estudo microscópico dos solos e o estabelecimento das relações entre as fases minerais presentes e sua organização, de modo a se ter a compreensão do porquê de solos com índices geotécnicos semelhantes apresentarem comportamentos hidromecânicos distintos. Observa-se então que as condições climáticas em que os solos são formados, assim como os diferentes graus de intemperização a que são submetidos, têm influência marcante no seu comportamento, do ponto de vista da engenharia.

Diante do exposto, é nítido que o uso dos solos finos em estruturas de pavimento, se fundamentado em estudos apropriados, é perfeitamente cabível. Atualmente, o grande entrave ao uso mais disseminado dos solos finos lateríticos no Brasil se prende à inexistência de normativo adequado em nível nacional que determine a prioridade no uso desses materiais, como forma até de evitar impacto ambiental gerado em exploração de cascalheiras situadas em condições ambientalmente delicadas.

Cabe ressaltar que, em 2014, com a implementação do Regime Diferenciado de Contratação Integrada (RDCi) abriu-se espaço para a evolução da engenharia rodoviária, inclusive, no que tange ao emprego de materiais finos para compor a estrutura do pavimento. Tal regime de contratação pública prevê a licitação de um anteprojeto de engenharia, na

maioria das vezes desenvolvido nos moldes tradicionais, para contratação de projeto básico e executivo juntamente com a execução da obra, em que é possível alterar traçado e materiais, desde que a estrutura do pavimento apresente comportamento igual ou superior àquela estrutura orçada no anteprojeto. No entanto, por falta de investimento público na qualificação de técnicos e contratação de ensaios de controle, até o momento, não houve grandes avanços nessa linha.

Tabela 11. Valores percentuais de decréscimo de Mini CBR em função da saturação, para diferentes umidades de compactação (w_c) (modificado de DELGADO, 2007).

Amostra	w_c (%)	Energia	Mini CBR (%)		Perda (%)
			Sem saturação	Com saturação	
HB7	26	Normal	12,5	3,5	72,0
		Intermediária	17,5	10,0	42,9
		Modificada	16,5	10,0	39,4
	29	Normal	20,0	6,5	67,5
		Intermediária	23,0	12,5	45,7
		Modificada	25,0	13,0	48,0
	30	Normal	16,5	3,5	78,8
		Intermediária	19,0	4,0	78,9
		Modificada	19,0	3,5	81,6
	32	Normal	9,0	3,5	61,1
		Intermediária	10,0	2,5	75,0
		Modificada	11,5	3,0	73,9
ZM3	17	Normal	1,5	1,2	20,0
		Intermediária	1,0	2,4	-140,0
		Modificada	2,5	2,5	0,0
	21	Normal	1,8	0,5	71,4
		Intermediária	2,0	2,2	-7,5
		Modificada	4,3	4,2	3,5
	24	Normal	1,5	1,5	0,0
		Intermediária	2,6	3,0	-15,4
		Modificada	2,5	3,3	-32,0
SF3	16	Normal	9,0	4,0	55,6
		Intermediária	11,0	6,0	45,5
		Modificada	14,0	7,0	50,0
	18	Normal	6,0	4,0	33,3
		Intermediária	6,0	4,0	33,3
		Modificada	14,0	6,5	53,6
	20	Normal	10,0	4,0	60,0
		Intermediária	11,0	4,0	63,6
		Modificada	16,5	5,5	66,7

Tabela 12. Valores de perda de massa por imersão (PMI) para as energias Proctor Normal e Intermediária (modificado de DELGADO, 2007).

Amostra	w_c (%)	Energia	PMI (%)
HB7	26	Normal	50
		Intermediária	45
	30	Normal	40
		Intermediária	30
	32	Normal	35
		Intermediária	28
ZM3	17	Normal	68
		Intermediária	59
	21	Normal	78
		Intermediária	80
	24	Normal	93
		Intermediária	100
SF3	16	Normal	73
		Intermediária	62
	18	Normal	78
		Intermediária	65
	20	Normal	70
		Intermediária	65

4.3 O uso de solos finos estabilizados

Estabilizar um solo significa melhorar suas propriedades, para que ele tenha condições de ser utilizado tanto em estradas não pavimentadas como em outras obras de engenharia. O processo de estabilização ou melhoramento de solos não é novidade. Muitas publicações tratam das questões relacionadas com as estabilizações granulométricas, químicas ou biológicas, realizadas com materiais convencionais, como areia, brita, cimento, cal e betume (AGRA *et al.*, 1992; CASANOVA, 1992; LIMA *et al.*, 1993) ou não convencionais, como diversos tipos de resíduos (SILVA, 1994; DIAS, 1995; PARREIRA; OLIVEIRA, 1995; FOGAÇA; CERATTI, 1996; REZENDE *et al.*, 2016). É importante ressaltar que, na atualidade, essa escolha deve ser feita de forma sustentável, sendo que a reutilização dos resíduos seria inicialmente estimulada nas regiões em que os eles são gerados, visando ao atendimento de critérios econômicos. No caso de estradas não pavimentadas, o foco principal da adoção desse processo seria a agregação das partículas do solo para proporcionar que a estrutura suporte o tráfego da via, além de impermeabilizar a camada. Dessa forma, ocorreria significativa redução do carreamento de partículas para os cursos d'água e reservatórios e não apareceria lama durante a estação chuvosa, tornando a estrutura mais durável.

No Brasil, como a maior parte dos solos superficiais é classificada como fina laterítica (NOGAMI; VILLIBOR, 1995), para a construção de vias não pavimentadas, deve-se verificar quais os tipos de estabilização serão adequados para o solo em questão, visando à obtenção da melhor relação custo x benefício e considerando questões como facilidade de aquisição dos

insumos, experiência executiva de empresas locais e normativas existentes. Por esse motivo, este item trata apenas do uso de solos finos estabilizados em pavimentação, com brita, com cal e com cimento.

No caso das misturas de solos lateríticos com brita, geralmente, obtém-se um tipo de material que não se enquadra nas faixas granulométricas especificadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para camadas de base. Assim, essas misturas devem ser tratadas como “solo-agregado” e não como “bases estabilizadas granulometricamente”. As misturas de brita com solo arenoso fino laterítico tendem a apresentar maior resistência do que as misturas com argila laterítica. Por isso, elas são consideradas apropriadas para rodovias de tráfego mais pesado. Para a obtenção do solo-agregado, podem ser utilizados solos do tipo Laterítico Areia (LA), Laterítico Arenoso (LA') ou Laterítico Argiloso (LG') que apresentem propriedades mecânicas e hidráulicas recomendadas por Nogami e Villibor (1995). Dependendo do tipo de solo utilizado, pode-se obter misturas coesivas ou não. As misturas coesivas são aquelas em que o solo laterítico usado apresenta valores do coeficiente c' entre 1,0 e 1,7, em que a resistência depende tanto da coesão das partículas como do ângulo de atrito interno. Já as misturas pouco ou não coesivas são aquelas em que o solo apresenta ' c ' variando entre 0,3 e 1,0, caso em que a resistência, depois de compactada, se deve ao ângulo de atrito interno.

Já a cal hidratada reage com um solo de granulometria média a fina para produzir reduções na sua plasticidade e expansão e aumento na sua trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento (LIMA *et al.*, 1993). No caso dos solos lateríticos, é importante ressaltar que nem sempre aqueles que apresentam valores de índice de plasticidade elevados possuem expansão significativa (NOGAMI *et al.*, 1985). Logo, o ganho na capacidade de suporte se torna um dos principais objetivos da estabilização. Devem ser produzidas misturas que tenham propriedades mecânicas e hidráulicas satisfatórias, sem que haja grandes mudanças nelas com a ação do intemperismo gerado tanto pelo meio físico como pela ação do tráfego. Segundo Nogami *et al.* (1980), existe grande demanda para o emprego de misturas solo-cal, principalmente em rodovias secundárias de baixo volume de tráfego. Trabalhos já publicados mostram que, para esse fim, o uso da cal calcítica é mais indicado do que a cal magnesiana (NÓBREGA, 1995). O teor de cal a ser incorporado ao solo pode variar entre 2% e 10%, em peso, sendo que a magnitude do ganho de resistência depende da mineralogia do solo em questão. Rezende (2003) observou que, para solos finos com alumínio livre, são necessários menores teores de cal para melhorar sua capacidade de suporte. Logo, da mesma forma que observado para os solos finos sem estabilização química, análises complementares como a realização de ensaios físico-químicos, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura podem auxiliar no entendimento do comportamento mecânico dos materiais, bem como na seleção dos solos finos que apresentam maior potencial para utilização.

A mistura solo-cimento é mais uma alternativa para melhorar as propriedades dos solos lateríticos e viabilizar o uso de materiais não tradicionais na estrutura de pavimento. Estudos mais aprofundados sobre a estabilização com cimento, principalmente com solos lateríticos, são mais bem tratados por Nogami *et al.* (1985), Lucena *et al.* (1986), Cunha *et al.* (1992), Casanova (1992), Casanova e Rodrigues (1993), Lima *et al.* (1993) e Montardo (1999). Geralmente, a estabilização com cimento é indicada para solos finos arenosos. Lucena *et al.* (1986) realizaram estudos de laboratório com o objetivo de definir a influência da ação do cimento na resistência à compressão simples e na durabilidade por molhagem e secagem de solos la-

teríticos estabilizados com vários teores de cimento. Nesse estudo, os autores destacaram que o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem parece ser mais adequado para definir o teor de cimento e mais econômico para ser usado na estabilização de solos lateríticos, quando comparado com o da resistência à compressão simples aos sete dias de cura. Como o foco do capítulo é a utilização de solos estabilizados em vias não pavimentadas, o estudo de durabilidade torna-se bastante aplicável.

Assim, no desenvolvimento de projetos de misturas de solos com cal ou com cimento, deve-se realizar estudos de dosagem para definir qual o teor ideal de aglomerante a ser incorporado ao solo. Nessa situação, devem ser executados ensaios para a determinação da resistência à compressão simples de amostras compactadas, avaliando-se a variação da resistência em função do tempo de cura, além da análise da durabilidade das aludidas amostras. Em campo, deve-se ter atenção ao processo de homogeneização dessas misturas, sendo recomendado o uso de usina de solos para esse fim. Após a compactação, deve-se observar o aparecimento de trincas de retração na base. Essas trincas devem ser seladas por meio do umedecimento e raspagem da superfície.

4.4 O uso de materiais granulares

O uso de materiais granulares, por sua maior capacidade portante, é quase sempre desejável nas camadas que compõem a estrutura de pavimento. No entanto, no caso das rodovias pavimentadas com revestimento primário, por vezes tratadas não pavimentadas, deve-se atentar para a estabilidade estrutural dos elementos granulares, assim como para a necessidade de certa coesão no solo, de modo a evitar o fácil deslocamento dos elementos granulares formando painéis e trilhas de roda nas vias. Adicionalmente, os materiais granulares soltos contribuem para a redução da segurança do tráfego na via, os quais são, no entanto, bem drenados, evitando-se acúmulo de água e formação de lama na via.

Embora os solos granulares bem graduados contribuam para uma melhor compactação, não são dotados de coesão. Para resolver esse tipo de problema, pode ser realizada a incorporação de material fino argiloso ou aglutinantes, como emulsão asfáltica, ou estabilizantes químicos como a cal e o cimento. No entanto, por suas características de menor rigidez, embora a emulsão asfáltica geralmente não contribua, ou não contribua de modo significativo para a melhoria do comportamento mecânico do solo, o seu uso torna a estrutura de pavimento mais durável e menos suscetível a processos erosivos. Geralmente, materiais puramente granulares como a brita são pouco usados nas rodovias vicinais não pavimentadas, pelos problemas já referidos relativos à falta de coesão, formação de painéis e trilhas de roda nas vias. Ainda como materiais granulares, não raro são usados matacões de pedra como sistema de contenção.

5 O problema de erosão superficial em pavimentos com revestimento primário

5.1 A erodibilidade em solos

Embora a questão da erodibilidade em solo seja muito mais ampla, ater-se-á aqui a aspectos relacionados à erosão hídrica de superfície, por constituir-se em uma das principais

preocupações nas rodovias vicinais com revestimento primário, embora, por exemplo, erosões eólicas geradas pela circulação dos veículos sejam também frequentes e o seu combate deva integrar ações preventivas (Figura 25). Com relação à erosão superficial hídrica, a qual é definida por Vargas (1977) como o resultado do arrancamento e arrastamento de grãos e torrões de solo pela pressão exercida por uma lâmina de água, vai depender, segundo o autor, da resistência que o solo oferece a essa pressão, a qual é chamada de erodibilidade. Nogami e Villibor (1995) definem erodibilidade específica como a resistência intrínseca do solo ao des-tacamento das partículas sob a ação dinâmica do fluxo superficial e das gotas da chuva. Bastos (1999) agrupa de maneira abrangente diversos modelos existentes na literatura para a previsão da erodibilidade dos solos, os quais são escritos em função de um fator K, denominado de fator de erodibilidade. Para fins práticos de avaliação da erodibilidade, o autor sugere duas alternativas: a avaliação direta por ensaios de *Inderbitzen* ou a avaliação indireta por meio de correlações com propriedades geotécnicas dos solos.



Figura 25. Erosão eólica gerada pela passagem de veículos; rodovia MS178, trecho que liga Bonito à BR 267, MS (Foto: José Camapum de Carvalho).

No ensaio de *Inderbitzen*, usado na avaliação da erosão superficial, é medida a perda de solo em amostras cujas superfícies coincidem com um plano de inclinação variável por onde passa um fluxo de água com vazão controlada. Os resultados dos ensaios são expressos em peso seco de solo erodido acumulado por unidade de área da amostra e plotados em relação ao tempo de ensaio. Os dados de perda total de solo em cada ensaio são plotados contra a tensão cisalhante hidráulica τ_h atuante no ensaio, a qual pode ser estimada simplificada-mente de acordo com a Equação 1. Destaque-se, porém, que, em análises mais completas e certamente complexas, deve-se incluir, nessa equação, a energia de adesão (a), que atua entre a água e o solo (Equação 2) e que pode ser assumida como a coesão do solo saturado.

$$\tau_h = \gamma_w hd \quad (1)$$

$$\tau_h = a + \gamma_w hd \quad (2)$$

onde:

τ_h : tensão cisalhante hidráulica;

a : adesão;

γ_w : peso específico da água;

h : altura da lâmina de fluxo;

d : declividade da rampa (m/m).

A altura da lâmina de fluxo pode ser estimada de acordo com a Equação 3.

$$h = \frac{Q}{vB} \quad (3)$$

onde:

h: altura da lâmina de fluxo;

Q: vazão;

v: velocidade do fluxo;

B: largura da rampa.

Aos dados plotados na curva perda de solo $\times \tau_h$, é ajustada uma reta, cujo coeficiente angular representa o fator de erodibilidade K (Figura 26). Na interseção dessa reta com o eixo x, encontra-se o valor de tensão cisalhante crítica τ_{hcrit} , a qual corresponde ao máximo valor de τ_h para erosão nula. Essa tensão crítica pode ser entendida como correspondendo à adesão da água ao solo e, por consequência, da água fazendo a junção entre as partículas, a qual necessita ser ultrapassada para que comece a ocorrer o processo erosivo.

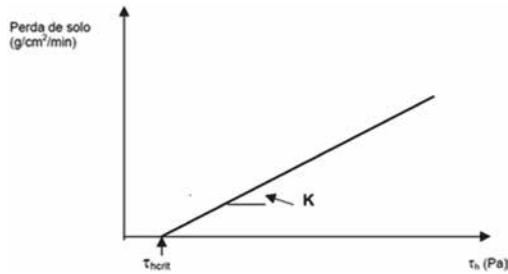


Figura 26. Definição dos parâmetros K e τ_{hcrit} a partir dos resultados dos ensaios de Inderbitzen (BASTOS, 1999).

Bastos (1999) propõe o critério a seguir para a previsão da erodibilidade dos solos, de acordo com os valores do fator K obtidos nos ensaios de *Inderbitzen*:

- $K < 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$: solos de baixa erodibilidade;
- $0,001 \leq K \leq 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$: solos de mediana erodibilidade;
- $K > 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$: solos de alta erodibilidade.

A esse critério, deve-se acrescentar o efeito da adesão, considerando-se, em função da morfologia do terreno, da sua cobertura, das intensidades pluviométricas regionais, qual o potencial de ocorrência de valores de h gerados pelas precipitações que a ultrapassariam, ou seja, com $\tau_h > \tau_{hcrit}$.

Para a avaliação indireta da erodibilidade, o autor propõe, como primeira aproximação, a aplicação de critérios pelo teor de finos, dado que são considerados potencialmente erodíveis solos que apresentam menos de 55% de material passante na peneira nº 200 (0,075mm) ou IP < 10%. A partir de resultados dos ensaios de classificação MCT, é possível aplicar o método de Villibor, Nogami e Fabbri (1986)¹ apud Bastos (1999), considerado satisfatório para

1 VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.; FABBRI, G.T.B. Proteção à erosão em pavimentos de baixo custo. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21. 1986, Salvador/BA, *Anais...* Rio de Janeiro, ABPv, 1986, 2: 413-413.

os solos subtropicais estudados. Solos do grupo LG' são considerados resistentes à erosão; solos dos grupos LA e LA' são potencialmente erodíveis, enquanto os solos NS' são considerados altamente erodíveis. Solos de outros grupos apresentam difícil previsão de erosão somente pela classificação MCT. Por fim, o autor propõe uma avaliação da erodibilidade a partir da variação do intercepto de coesão obtido a partir de ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova (não remoldados) na umidade natural e inundados, sendo que solos que apresentam uma diminuição maior ou igual a 85% do intercepto de coesão quando inundados são considerados potencialmente erodíveis. Esse é, no entanto, um tema que ainda requer muito estudo e reflexão. Por exemplo, os solos LG', por seu estado agregado, se ensaiados como se encontram na natureza, ou seja, sem uso de defloculante, apresentam baixo teor de fino e, no entanto, são considerados, segundo a proposta fundamentada na classificação MCT, pouco erodíveis. A proposta do autor, indicando que solos com perda de coesão superior a 85%, merece reflexão, que é aqui posta no sentido de se buscar o entendimento do fenômeno. Geralmente, quanto menor a umidade, maior a sucção atuante no solo e, por consequência, a resistência, acréscimo de resistência que pode se dar devido às forças adsorvivas ou ao efeito capilar, lembrando que a primeira impacta sobre a coesão e a segunda sobre o aumento da tensão confinante. Via de regra, ocorrendo sua saturação, a perda de coesão será tanto maior quanto maior for a sucção/capilaridade atuante no solo. Mas, talvez a análise fenomenológica devesse ser outra: quanto maior a sucção/capilaridade atuante no solo, maior será a energia de infiltração e maior tende a ser a pressão positiva gerada na fase ar. Com isso quanto maior a diferença entre a pressão na fase ar e a coesão real do solo (coesão do solo saturado), maior será o potencial erosivo do solo.

5.2 Estudo de caso

Nervis (2016) apresentou, em sua tese de doutorado, os resultados experimentais, de previsão de comportamento e de monitoramento de um trecho experimental de um pavimento com revestimento primário implantado em São Gabriel, fronteira oeste do Rio Grande do Sul, no qual foram avaliados diversos aspectos, entre eles a erodibilidade.

A extensão total do referido trecho era de 700m, com largura da plataforma de rolamento de 4m, sendo subdividido em sete seções de 100m cada (estacas variando de 2+900 m a 3+600 m), numeradas de A a G, com fluxo nos dois sentidos. O revestimento primário foi composto de duas camadas: a inferior, com espessura média de 17 cm, foi constituída de argila siltosa de comportamento laterítico (LG') e a camada superior, com espessura média de sete cm, foi composta de pedregulho arenoso (regionalmente conhecida como saibro), sendo a fração passante na peneira de 2 mm (46% do total) pertencente ao grupo NG' da classificação MCT. Essa esbelta camada foi incluída com a função principal de garantir a aderência pneu-pavimento. O solo do subleito tratava-se de uma areia siltosa de classificação MCT correspondente ao grupo NA', contendo 98% passando na peneira de 2 mm.

A camada de interesse em relação à erodibilidade, qual seja, a de saibro, pertence ao grupo A-2-4 da classificação da AASHTO, destacando-se que sua granulometria e índice de plasticidade atenderiam às exigências da especificação do DNIT, enquadrando-se na descri-

ção de “Cascalho quartzoso” da Tabela 2. Assim, seria qualificado como “bom” para uso em revestimento primário, com a recomendação do emprego de 10 a 20cm sobre o subleito existente. As características desse material estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Principais características geotécnicas do saibro empregado na camada superficial do trecho experimental (modificado de NERVIS, 2016).

Propriedades		Saibro (camada superior do revestimento)
Granulometria	Pedregulho ($2\text{mm} < \Phi \leq 60\text{mm}$)	54%
	Areia ($0,06\text{mm} < \Phi \leq 2\text{mm}$)	24%
	Silte ($0,002\text{mm} < \Phi \leq 0,06\text{mm}$)	12%
	Argila ($\Phi \leq 0,002\text{mm}$)	10%
Classificação segundo a NBR 6502: 95		Pedregulho arenoso
Peso Específico dos Grãos - $\tilde{\alpha}_s$ (kN/m^3)		25,16
Plasticidade	Limite de Liquidez (%)	35
	Limite de Plasticidade (%)	26
	Índice de Plasticidade (%)	9
	Classificação segundo Burmister (1949) <i>apud</i> Das e Sobhan (2014)	Plasticidade Baixa
	Classificação USCS	SM
Classificação da TRB		A-2-4
Classificação MCT (fração < 2mm)		NG'

Para a avaliação indireta da erodibilidade do material por meio de uma primeira aproximação proposta por Bastos (1999), apresentada anteriormente, a qual é baseada no teor de finos, o material pode ser considerado potencialmente erodível, pois apresenta menos de 55% de material passante na peneira nº 200 (0,075mm) e IP < 10%. Já para a avaliação indireta da fração fina do saibro empregado na camada superior do revestimento primário pelo método de Villibor, Nogami e Fabbri (1986)¹apud Bastos (1999) apresentado acima, tem-se que o material é potencialmente erodível. Como a porcentagem de material passante na peneira de 2 mm é de apenas 46%, o método é insuficiente para avaliar o comportamento do material.

O trecho experimental é predominantemente plano, porém, com a presença de uma pequena elevação entre as estacas 3+300m e 3+500m, com o ponto mais alto próximo à estaca 3+400m, apresentando diferenças de nível de aproximadamente 8 e 16m em relação às estacas anterior e posterior, conferindo declividades longitudinais de aproximadamente 9% e 17%, nas seções E e F, respectivamente. As drenagens laterais, quando necessárias, foram constituídas de sarjetas em forma de canaleta, com dimensões aproximadas de 0,60m de largura por 0,20m de profundidade em relação à borda da pista pronta. O abaulamento da seção transversal da pista variou de 5 a 7%. A Figura 27 ilustra a seção longitudinal do trecho experimental.

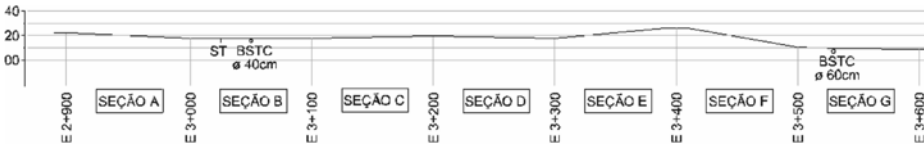


Figura 27. Seção longitudinal do trecho experimental (NERVIS, 2016).

5.2.1 Ensaios laboratoriais para a avaliação da erodibilidade

O saibro empregado na camada superficial, além de ter sido submetido a ensaios de caracterização e de classificação MCT (fração passante na peneira de 2 mm) foi submetido, entre outros, aos ensaios de *Inderbitzen* e de cisalhamento direto, com o propósito de avaliar experimentalmente seu potencial com relação à erodibilidade. Tais ensaios, conforme exposto anteriormente, têm por finalidade realizar uma avaliação direta da erodibilidade, no presente caso, do saibro empregado na camada final do revestimento primário do trecho experimental.

O equipamento utilizado consiste numa rampa hidráulica em chapa metálica de 25cm de largura e 60cm de comprimento e dotada de um orifício central, no qual é introduzida uma amostra de solo contida em um anel de PVC biselado de 10cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figura 28). Essa rampa é articulada, permitindo as seguintes regulagens de inclinação: 10°, 26°, 45° e 54°. O fluxo d'água é alimentado diretamente da rede hidráulica, e o controle e medida de vazão são realizados por um registro e um rotâmetro, respectivamente. A amostra é instalada de tal forma que sua superfície coincida com o fundo da rampa. O sistema de coleta e seleção de material erodido é constituído por baldes plásticos de 60 litros e por um conjunto de peneiras nas malhas de 4,8 mm, 2,0 mm, 0,42 mm e 0,075 mm (peneiras #4, #10, #40 e #200, respectivamente).

Inicialmente, foram moldados corpos de prova em cilindros grandes utilizados no ensaio de compactação, tomando como referência a umidade ótima e o grau de compactação máximo do ensaio Proctor normal. A partir desses corpos de prova, foram talhadas, com a utilização do anel de PVC biselado referido acima e ferramenta cortante, as amostras a serem submetidas ao ensaio, as quais ficaram contidas no interior do anel.



Figura 28. Ensaio de *Inderbitzen* (Foto: NERVIS, 2016).

Foram realizados quatro ensaios, adotando-se inclinações da rampa de 10° e 26° e vazões de 3 l/min e 6 l/min. Como a inclinação máxima da pista experimental, conforme descrito no subitem 3.2, é de 17% (10°), tornou-se desnecessário realizar ensaios com inclinações mais elevadas que 26°. As vazões adotadas visam simular condições de precipitações mais brandas e mais intensas e, assim, obter avaliações mais completas.

Nos tempos de 1 min, 5 min e 10 min, o balde coletor de sedimentos era substituído, de modo a individualizar a medição nesses tempos e no tempo final de 20 min, momento em que os ensaios eram encerrados. O material recolhido em cada balde era submetido a um peneiramento úmido no conjunto de peneiras especificado acima, sendo que o material retido em cada peneira era secado em estufa para a quantificação do peso seco. O sedimento passante na peneira #200 era medido indiretamente, a partir da coleta de uma amostra de água com finos, obtida do balde, após cuidadosa homogeneização. O material remanescente da amostra era retirado do anel e secado em estufa para obtenção de seu peso seco.

Os resultados dos ensaios (Figuras 29, 30 e Tabela 14) são apresentados em termos de perda de solo por unidade de área e de tempo de ensaio e também pela tensão cisalhante hidráulica (τ_h) aplicada no ensaio, calculada para condições específicas de fluxo e inclinações de rampa, conforme descrito anteriormente.

De acordo com Bastos (1999), uma grande dúvida pertinente à análise dos resultados é quanto ao mais adequado tempo de ensaio padrão a ser assumido para o cálculo das taxas de erosão. Para o solo em estudo, realizou-se uma análise das curvas de evolução da perda de solo acumulada com o tempo, as quais para os quatro corpos de prova ensaiados, apresentaram um comportamento típico àquele apresentado no gráfico da Figura 26, o qual corresponde ao corpo de prova de número 1. Saliente-se que, nos ensaios, foi utilizado o mesmo equipamento empregado nos estudos de Bastos (1999).

Verificou-se também que, à medida que o tempo cresce, a taxa de perda de solo vai diminuindo. Mesmo assim, entre os tempos de 10 e 20 minutos, ainda se observa a ocorrência de um valor importante de perda, embora numa taxa menor do que nos tempos medidos anteriormente. Conclui-se então que uma diminuição expressiva da taxa de perda de solo ocorreria após os 20 minutos. Por esse motivo, adotou-se 20 minutos como tempo de ensaio padrão a ser assumido para o cálculo das taxas de erosão. Na Tabela 14 e no gráfico da Figura 30, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios. Cabe salientar, no entanto, considerando-se que após pouco tempo de ensaio a forma assumida pela superfície do corpo de prova passa a atuar como inibidora do processo erosivo, que os primeiros minutos passam a ser os mais relevantes nesse ensaio.

Analisando-se o gráfico da Figura 30, verificou-se que o resultado pertinente ao corpo de prova 3 se apresentou fora da linha de tendência representada pelos resultados dos outros três corpos de prova. Como se trata de um solo gráudo, a eventual perda de alguns grãos maiores ou mais densos impacta severamente nos resultados. Por esse motivo, optou-se por desprezar tal ponto quando da inserção da curva de ajuste de dados apresentada no referido gráfico. Assim, essa curva representou uma excelente correlação dos resultados dos corpos de prova remanescentes, traduzida por um coeficiente de correlação (R^2) de 0,9916.

Dessa forma, o valor encontrado para tensão cisalhante crítica τ_{hcrit} , a qual corresponde ao máximo valor de τ_h para erosão nula, foi de 1 Pa. O valor encontrado para o fator de erodibilidade K foi de 0,02 g/cm²/min/Pa. De acordo com o exposto anteriormente, segundo o

critério proposto por Bastos (1999), esse valor fica enquadrado na faixa correspondente a um solo de mediana erodibilidade. Isso converge para a avaliação sob os critérios indiretos expostos nos itens 5.1.1 e 5.1.2, que consideraram o material potencialmente erodível.

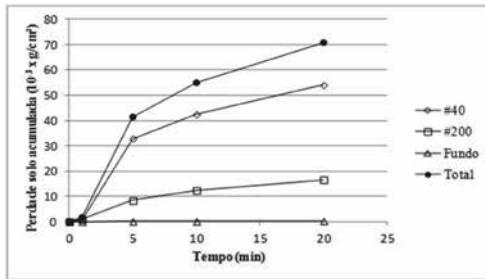


Figura 29. Perda de solo acumulada com tempo de ensaio para o corpo de prova 1 (NERVIS, 2016).

Tabela 14. Resultados obtidos nos ensaios de *Inderbitzen* (modificado de NERVIS, 2016).

Corpo de prova	Índices físicos				Resultados dos ensaios de <i>Inderbitzen</i>			
	γ (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	Δw (%)	GC (%)	i	Q (l/min)	τ_h (Pa)	Perda de solo (10³ x g/cm²/min)
1	2,05	1,85	-1,28	98	10°	3	1,136	3,54
2	2,06	1,83	0,00	97	10°	6	1,393	7,35
3	2,09	1,87	-0,56	99	26°	3	1,710	61,68
4	2,11	1,90	-1,14	101	26°	6	2,018	22,11

Obs.: γ = peso específico natural, γ_d = peso específico aparente seco, Δw = desvio de umidade, GC = grau de compactação, i = inclinação, Q = vazão, τ_h : tensão cisalhante hidráulica.

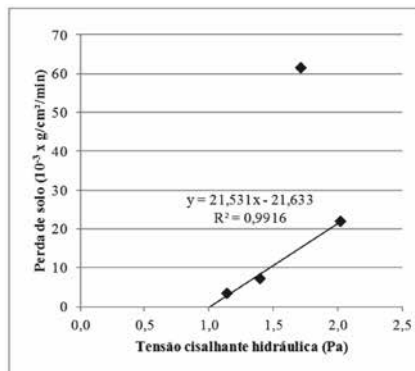


Figura 30. Resultados dos ensaios de *Inderbitzen* (NERVIS, 2016).

5.2.2 Ensaios de cisalhamento direto

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras de saibro remoldadas. Os procedimentos empregados para a realização dos ensaios seguiram as recomendações feitas

por Head (1982), além da Norma ASTM D3080 (*Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*). Uma prensa de cisalhamento direto convencional, do tipo deformação controlada, foi o equipamento utilizado para a realização dos ensaios. O equipamento ensaia corpos de prova com 6,3 cm de diâmetro e 2 cm de altura, os quais são posicionados no centro de uma caixa bipartida.

No total, foram ensaiados nove corpos de prova, sendo três na condição inundada e os demais em dois teores de umidade de interesse. Os corpos de prova foram moldados diretamente nos anéis de 6,3cm de diâmetro e 2cm de altura. Para a realização da moldagem, tomaram-se como base os parâmetros das curvas de compactação obtidas, perseguindo-se a umidade ótima e o grau de compactação máximo para a energia Proctor normal.

As tensões normais aplicadas durante os ensaios de cisalhamento direto foram de 100 kPa, 200 kPa e 500 kPa. Essas tensões foram escolhidas de modo a contemplar os níveis de tensão solicitados nas camadas do pavimento em estudo. As velocidades de execução dos ensaios foram definidas de acordo com as recomendações da ASTM D3080 (ASTM, 2011), sendo de 0,055 mm/min.

A partir dos resultados obtidos, realizou-se uma análise da avaliação indireta da erodibilidade a partir da variação do intercepto de coesão obtido nos ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova na umidade natural e inundados conforme proposta de Bastos (1999), anteriormente apresentada. Verificou-se que o saibro em estudo, por esse critério, não é considerado potencialmente erodível, pois a inundação do corpo de prova não resulta em redução maior do que 85% no intercepto de coesão, chegando a no máximo 53%, mesmo comparando-se com o valor correspondente à condição de umidade de apenas 3,8%. Isso diverge das outras avaliações sob critérios indiretos expostas anteriormente, que consideram o material como um todo e a fração fina do material como potencialmente erodíveis, ao passo que a avaliação direta por meio do ensaio de *Inderbitzen* aponta para um material de mediana erodibilidade. Apesar do fato de que os estudos de Bastos (1999) foram conduzidos em amostras indeformadas coletadas num perfil natural, enquanto que, no presente trabalho, os ensaios foram realizados em amostras compactadas, a divergência sugere a importância de a avaliação se voltar para o mecanismo de desprendimento das partículas, conforme indicado, considerando-se a pressão na fase ar oriunda da infiltração-sucção/capilaridade e a coesão real do solo. Assim, pelo fato de o índice de vazios ser significativamente menor, a capilaridade sendo dele função implica significativas pressões na fase ar e conseqüente desencadeamento do processo erosivo.

5.2.3 Cálculos para a estimativa da erosão do trecho experimental proposto no estudo de caso

Uma estimativa da ocorrência de erosão no pavimento experimental em estudo foi realizada, sendo simuladas as três situações descritas a seguir:

- A. Uma área de contribuição pluviométrica de 2m de largura e comprimento L igual à metade da largura da pista de rolamento, num pavimento plano com abaulamento máximo de 7%, convergindo para um caminho preferencial de fluxo de água formado por uma concavidade de bordas suaves de 5cm de largura (B) e profundidade de aproximadamente 1cm;

- B. Uma área de contribuição pluviométrica de 2m de largura, num pavimento com certa declividade longitudinal, abaulamento máximo de 7% e comprimento L correspondente ao da linha de máxima declividade resultante do centro até a borda da pista de rolamento, convergindo para um caminho preferencial de fluxo de água formado por uma concavidade de bordas suaves de 5cm de largura (B) e profundidade de aproximadamente 1cm;
- C. Pavimento em declive em que já ocorreram deformações permanentes e/ou perda de espessura de revestimento nas trilhas, comprometendo o abaulamento, gerando um caminho longitudinal preferencial de fluxo de água formado por uma concavidade de bordas suaves e baixa profundidade, com largura B estimada de 0,5m, sendo a área de contribuição pluviométrica dada pelo comprimento L do declive multiplicado pela metade da largura da pista de rolamento.

Para as três situações acima consideradas, calculou-se a tensão cisalhante hidráulica τ_h atuante em campo a partir da Equação 1. A altura h da lâmina de fluxo foi calculada a partir da Equação 2. Para tal, tornou-se necessário determinar, para cada caso, o valor da vazão Q e da velocidade de escoamento v. O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) recomenda, para cálculos de vazão Q para bacias pequenas (até 2 km²), o emprego do Método Racional, descrito pela Equação 4.

$$Q = CIA \quad (4)$$

onde:

Q: vazão;

C: coeficiente de escoamento;

I: intensidade de precipitação para um tempo de concentração de 5 minutos;

A: área da bacia de contribuição.

O valor sugerido no Manual de Pavimentação do DNIT (2006) para o coeficiente de escoamento C em superfícies com revestimento primário é de 0,4 a 0,6, sendo adotado, para os cálculos, o segundo valor, considerando-se a pior situação. Para a intensidade de precipitação I, para um tempo de concentração de 5 minutos, adotou-se o valor de 155mm/h, correspondente à região de São Gabriel-RS, obtido a partir dos resultados de estudos publicados por Sampaio (2011).

Para o cálculo da velocidade de escoamento (v), o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) recomenda o emprego da Fórmula de Manning, descrita pela Equação 5.

$$v = \frac{R^{2/3} \sqrt{d}}{n} \quad (5)$$

onde:

v: velocidade de escoamento;

R: raio hidráulico (área molhada/perímetro molhado)

d: declividade da lâmina d'água;

n: coeficiente de rugosidade ou coeficiente de Manning, sendo adotado igual a 0,03.

Como os canais de escoamento considerados nas três situações expostas são formados por concavidades de bordas suaves e baixa profundidade, é possível aproximar o valor do pe-

rímetro molhado pela largura da concavidade sem prejuízos para o cálculo. Assim, foram estimados valores para a altura h da lâmina de fluxo, calculados os valores de R e da velocidade de escoamento e recalculados os valores de h de forma iterativa, até que os valores calculados fossem aproximadamente iguais aos valores estimados.

Obtidos os valores das tensões cisalhantes hidráulicas τ_h para cada situação, vislumbram-se duas possibilidades. Se o valor for menor que a tensão cisalhante crítica τ_{hcrit} de 1 Pa obtida experimentalmente para o material em estudo, então, não há previsão de ocorrência de erosão. Caso esse valor seja superado, calcula-se a perda do solo por erosão pela equação de ajuste obtida a partir dos resultados dos ensaios de laboratório (Figura 31). Os resultados dos cálculos realizados para as três situações estipuladas são expressos na Tabela 15.

Analisando-se os resultados obtidos, verifica-se que, para os subtrechos planos (Situação A – seções B e G) e de baixa declividade longitudinal (Situação B – seções A, C, D e E), a previsão é de não ocorrência de problemas de erosão. Já para o subtrecho mais inclinado (Seção F), os resultados preveem possibilidades de ocorrência de erosão tanto no sentido transversal, através de sulcos inclinados (Situação B), como no sentido longitudinal (Situação C), caso ocorram deformações permanentes ou perda de espessura de revestimento nas trilhas, comprometendo o abaulamento e gerando um caminho preferencial de fluxo d'água. Para essa seção, estima-se que, tomando-se a situação mais extrema (Situação B), cada chuva intensa de duração de 1 hora – considerando-se o caminho preferencial de 5cm de largura e 5,25m de comprimento total – seria suficiente para remover aproximadamente 600g de material, aumentando a profundidade do sulco de erosão em aproximadamente 1 mm.

Tabela 15. Previsão de perda de solo por erosão para a camada superficial (saibro) do pavimento experimental (modificado de NERVIS, 2016).

Situação	Seção	i (°)	d (m/m)	L (m)	B (m)	A (m ²)	Q (m ³ /s)	h_{est} (cm)	R (m)	v (m/s)	h (cm)	τ (Pa)	Perda de solo (10 ⁻³ g/cm ² /min)
A	B/G	4,00	0,0700	2,00	0,05	4,0	0,0001	0,04	0,00040	0,05	0,04	0,28	0,00
	A	4,92	0,0860	2,46	0,05	4,9	0,0001	0,05	0,00045	0,06	0,04	0,39	0,00
B	C	4,15	0,0725	2,07	0,05	4,1	0,0001	0,04	0,00040	0,05	0,04	0,29	0,00
	D	4,15	0,0725	2,07	0,05	4,1	0,0001	0,04	0,00040	0,05	0,04	0,29	0,00
	E	6,50	0,1140	3,26	0,05	6,5	0,0001	0,05	0,00050	0,07	0,05	0,57	0,00
	F	10,4	0,1838	5,25	0,05	10,5	0,0002	0,06	0,00067	0,11	0,05	1,18	3,70
	A	2,86	0,0500	71,00	0,50	142,0	0,0036	0,09	0,00090	0,07	0,11	0,45	0,00
C	C	1,09	0,0190	86,00	0,50	172,0	0,0044	0,14	0,00140	0,06	0,15	0,27	0,00
	D	1,09	0,0190	85,00	0,50	170,0	0,0043	0,14	0,00140	0,06	0,15	0,27	0,00
	E	5,14	0,0900	64,00	0,50	128,0	0,00330	0,07	0,00070	0,08	0,08	0,63	0,00
	F	9,65	0,1700	68,00	0,50	136,0	0,0035	0,06	0,00060	0,10	0,07	1,02	0,33

Obs.: i = inclinação; d = declividade; L = comprimento do caminho d'água; B = largura estimada do sulco; A = área de contribuição; Q = vazão; h_{est} = altura estimada d'água; R = raio hidráulico; h = altura calculada d'água; τ = tensão cisalhante.

5.2.4 Avaliação da erosão ocorrida no trecho experimental

Para a avaliação do desempenho do pavimento experimental em relação à ocorrência de erosão, realizaram-se inspeções de campo, cujos procedimentos empregados, os quais serão descritos a seguir, foram desenvolvidos com base na metodologia da inspeção visual detalhada (*Detailed Visual Inspection – DVI*). Nessas inspeções, foram avaliadas a severidade e a densidade do defeito, quando de sua manifestação. Ao todo, foram realizadas quatro inspeções, conforme exposto na Tabela 16.

Como a ação das chuvas tem efeito direto no eventual surgimento de sulcos de erosão, foram levantados dados referentes às precipitações pluviométricas no período de avaliação do pavimento experimental, por meio de consulta realizada junto ao banco de dados disponível no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação meteorológica de São Gabriel-RS.

Tabela 16. Inspeções realizadas durante o período de avaliação do pavimento experimental (modificado de NERVIS, 2016).

Inspeção	Datas	Tempo transcorrido desde a implantação do pavimento (meses)
1	15/03/14	12
2	12/09/14	18
3	15/03/15	24
4	09/09/15	30

Para a determinação da densidade do defeito, media-se, com a utilização de uma trena, a área atingida em cada uma das seções em que ele se manifestava, calculando-se a correspondente porcentagem em relação à área total da seção.

Para a determinação da severidade do defeito, media-se a profundidade dos sulcos mais acentuados em cada seção, utilizando-se o mesmo método empregado para a determinação do afundamento de trilha de roda, a qual é dada em mm, registrando-se esse valor.

De posse dos pares de dados, densidade e severidade do defeito, obtinha-se, a partir de tabelas específicas da metodologia DVI, a escala e a decorrente classificação da condição da estrada para cada seção. A partir da média dos valores das escalas das seções, obtinha-se a classificação da condição da estrada para o pavimento experimental como um todo.

Na Tabela 17, são apresentadas as precipitações pluviométricas acumuladas desde a data da construção do trecho experimental até a data de cada inspeção realizada e entre uma inspeção e outra. Foram verificados problemas de erosão nas seções F e G, conforme apresentado na Tabela 18 e ilustrado por meio das imagens da Figura 31.

Na seção F, uma primeira área se manifestou quanto à erosão já na primeira inspeção, enquanto na seção G, tal manifestação se deu somente na inspeção 3. Ambas repercutiram na classificação da estrada, de acordo com a metodologia DVI, como falida em tais seções. Na segunda inspeção, surgiu uma segunda área na seção F, agravando-se ainda mais a situação. Pode-se afirmar que, tanto a avaliação direta da erodibilidade do saibro, o qual,

segundo critério proposto por Bastos (1999), fica enquadrado na faixa correspondente a um solo de mediana erodibilidade, como as classificações indiretas que consideraram o material potencialmente erodível – ambas expostas no item 5.1 –, foram adequadas, pois o material se mostrou erodível somente quando submetido a tensões cisalhantes hidráulicas médias. Assim, mostrou-se que é possível estimar-se o comportamento quanto à erodibilidade da camada de saibro em campo por meio do ensaio de *Inderbitzen* (avaliação direta da erodibilidade em laboratório). Identificou-se que os problemas de erosão superficial observados estão vinculados aos seguintes fatores: potencial erodível do material, declividade transversal e longitudinal da via, precipitações pluviométricas (intensidade e frequência) e área de contribuição.

Por fim, observou-se também no estudo de caso que é possível qualificar o saibro, quanto à erodibilidade, por meio das avaliações indiretas baseadas no teor de finos, no Índice de Plasticidade e na Classificação MCT. Entretanto, não se obteve previsões acuradas de erosão quando se empregou o critério da redução da coesão por inundação nos ensaios de cisalhamento direto. Pondera-se, entretanto, que, diferentemente dos valores de referência, que foram obtidos a partir de amostras indeformadas coletadas num perfil natural, no presente trabalho, os ensaios foram realizados em amostras compactadas, além do fato de que o desencadeamento do mecanismo de erosão pode ser mais bem avaliado considerando-se a curva característica do solo, o seu estado hídrico inicial, a porosidade e distribuição de poros, a sua coesão real e a pressão gerada na fase ar em consequência da infiltração da água.

Tabela 17. Precipitações pluviométricas acumuladas (INMET, 2016).

Inspeção	Datas	Tempo transcorrido (meses)	Precipitações pluviométricas acumuladas no período (mm)	Precipitações pluviométricas acumuladas desde a construção (mm)
1	15/03/14	12	1.500	1.500
2	12/09/14	18	778	2.278
3	15/03/15	24	910	3.188
4	09/09/15	30	656	3.844



(a)



(b)

Figura 31. Sulcos de erosão: (a) seção F e (b) Seção G (Foto: NERVIS, 2016).

Tabela 18. Problemas de erosão (NERVIS, 2016).

Inspeção	Tempo (meses)	NUSACE	Grandezas	Seções							Média do trecho experimental	
				A	B	C	D	E	F	G		
0	0	0,00E+00	Severidade (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Área (m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Densidade (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Escala (0-5)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
			Classificação da condição da estrada	E	E	E	E	E	E	E	E	E
1	12	4,80E+03	Severidade (mm)	-	-	-	-	-	65,0	-	-	
			Área (m ²)	-	-	-	-	-	5,0	-	-	
			Densidade (%)	-	-	-	-	-	1,3	-	-	
			Escala (0-5)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,7	
			Classificação da condição da estrada	E	E	E	E	E	F	E	E	
2	18	7,20E+03	Severidade (mm)	-	-	-	-	-	70 60	-	-	
			Área (m ²)	-	-	-	-	-	8 5	-	-	
			Densidade (%)	-	-	-	-	-	2,1	-	-	
			Escala (0-5)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,7	
			Classificação da condição da estrada	E	E	E	E	E	F	E	E	
3	24	9,60E+03	Severidade (mm)	-	-	-	-	-	100 60	300,0	-	
			Área (m ²)	-	-	-	-	-	23 15	43,0	-	
			Densidade (%)	-	-	-	-	-	9,5	10,8	-	
			Escala (0-5)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0	1,4	
			Classificação da condição da estrada	E	E	E	E	E	F	F	B	
4*	30	1,20E+04	Severidade (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	
			Área (m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	
			Densidade (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	
			Escala (0-5)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
			Classificação da condição da estrada	E	E	E	E	E	E	E	E	

Legenda:
 E: excelente; B: boa; RE: regular; RU: ruim; F: falida.

*Foram realizados reparos na estrada no período, sendo eliminados os sulcos de erosão nas seções F e G, tendo em vista que nessa região a mesma se encontrava intransitável.

6 Considerações finais

Com base nas informações apresentadas neste capítulo, conclui-se que a construção de obras de engenharia e vias de acesso junto a reservatórios, bem como a exploração de áreas de empréstimo nessa região e consequente remoção de vegetação poderão gerar processos erosivos e assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Neste capítulo, vários exemplos apresentados ilustraram a existência dessas situações, demonstrando que, nesses casos, elas não foram avaliadas nem durante o projeto e nem durante a execução dessas obras.

Para se evitar tais problemas, ao longo do capítulo, foram apresentadas e discutidas algumas questões que deveriam ser observadas e consideradas nos projetos dessas obras, tais como:

- Escolher um traçado com menor declividade;
- Estudar a erodibilidade dos solos, de modo a, se necessário, adotar medidas preventivas;
- Garantir a qualidade da drenagem das vias;
- Assegurar a revegetação das margens das estradas e das áreas de empréstimo, preferencialmente com as espécies locais;
- Na escolha de material para ser utilizado como revestimento primário de uma via, verificar o uso de especificações adequadas para a sua seleção;
- Para vias não pavimentadas, quando necessário o uso de solos finos, fazer uso da metodologia MCT e, sempre que possível, de análises químicas e mineralógicas, pois estas poderão ser úteis na otimização do projeto;
- Quando o solo sozinho não apresentar os parâmetros necessários, considerar o uso da estabilização química como solução para viabilizar a execução da obra. Nesse caso, é importante verificar se o ganho de resistência não seria em parte devido a aumento da sucção/capilaridade.

Com a adoção dessas medidas, é possível garantir a qualidade e a durabilidade das obras, bem como a preservação do ambiente que as circunda.

Referências

AGRA, F.; LUCENA, F.B.; FERREIRA, H.C. Aproveitamento de finos na pavimentação urbana utilizando aditivos betuminosos. In: **26ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Aracaju, SE, 2: 1183-1203, 1992.

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D3080-90: **Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**. Montgomery County, 1990.

BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 303 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2004. Disponível em: < [>. Acesso em: 28 nov. 2016.](http://sabi.ufrgs.br/F/73HJSEE2B9BPBT2DUHPVLIJ6R2HY5RGH9GNTB1SL2I4MN1UJ38-06130?func=find-b&request=Estudo+Geot%C3%A9cnico+sobre+a+Erodibilidade+de+Solos+Residuais+n%C3%A3o+Saturados&find_code=WRD&adjacent=N&x=0&y=0&filter_code_2=WLN&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=&filter_code_4=WYR&filter_request_4=)

BOTELHO DA COSTA, J.V. Caracterização e constituição do solo. 3ª ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1973, 515 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; DINIZ, N. C. **Cartilha**: erosão. 1ª ed., Brasília, 2005, 34 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N.; LEÃO CARVALHO, E.T. (Orgs.). **Tópicos sobre infiltração**: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. 1ª ed. Brasília: Faculdade de Tecnologia, v. 4, 2012, 644 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A.C. **Cartilha meio ambiente: Erosão**. 1ª ed. Brasília: FINATEC, v. 1, 2006, 28 p.

_____. **Cartilha infiltração**. 1ª ed. Brasília: FT, v. 2, 2010, 36 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N. ; LEÃO CARVALHO, E.T. (Orgs.). **Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro**. 1ª ed. Brasília: FINATEC, 2006, 464 p.

CARDOSO, F. B. F. **Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central brasileiro**. 2002. 357 fl. Tese de Doutorado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Publicação G.TD-009A/02, Brasília, 2002.

CASANOVA, F.J. Fundamentos (mecanismos) da dosagem físico-química do solo-cimento. In: **26ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Aracaju, SE, 1: 87-110, 1992.

CASANOVA, F.J.; RODRIGUES, M.G.M. Um estudo comparativo entre três métodos de dosagem do solo-cimento utilizando solos lateríticos do norte-nordeste. In: **27ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Teresina, PI, 1: 55-64, 1993.

CONCIANI, W.; LORANDI, R.; PRADO, H. Aplicação de mapas pedológicos no planejamento de rodovias. In: **28ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, Cuiabá, MT. 1:321-332. 1995.

CUNHA, J.E.V.; LUCENA, F.B.; FERREIRA, H.C. Solos lateríticos estabilizados com cimento segundo a metodologia modificada da ABCP e do DNER. In: **26ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Aracaju, SE, 1: 387-413, 1992.

DAS, B; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DELGADO, A.K.C. **Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais características do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária**. 2007. 392 fl. Tese de Doutorado em Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Publicação G.TD-045A/07, Brasília, 2007.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-P 08/05: pavimentação: solo arenoso fino laterítico**. Curitiba, 2005, 12p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/015: sub-base ou base de solo arenoso fino de comportamento laterítico – SAFL**. São Paulo, 2005, 19p.

DIAS, C.R.R. Estabilização de solos arenosos da planície costeira do Rio Grande do Sul com emprego de cinza volante. In: **29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Cuiabá, MT, 2: 208-226, 1995.

DIAS, R.D. **Aplicação da pedologia e da geotecnia no projeto de fundações de linhas de transmissão**. 1987. Tese de doutorado apresentada à COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, 1987.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 098: Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço**. 2007, 7p.

_____. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. **Manual de conservação rodoviária**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, 2006. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>>. Acesso em: 02 dez. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília-DF: Embrapa Produção de Informação, 1999, 412 p.

FOGAÇA, B.C.; CERATTI, J.A.P. Análise paramétrica de estruturas de pavimento em camadas de solo estabilizado com cal e cinza volante. In: **30ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Salvador, BA, 1: 390-401, 1996.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press, 1982.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações Automáticas - Gráficos**, 2016, Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf. Acesso em: 28 nov. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Curso de geologia de engenharia aplicado à problemas ambientais**. V. 3. São Paulo: IPT – AGANA – DIGEN, cap. 3.2. 1992.

JESUS, A.S. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares**: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis – GO. 2013. 340 fl. Tese de Doutorado, G.TD – 087/2013, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

LELIS, A.C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Cartilha meio ambiente**: Infiltração. 1ª ed. Brasília: Faculdade de Tecnologia, v. 1, 2011, 47 p.

LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; SILVA, C.H.C. **Estabilização de solos II - técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Universidade Federal de Viçosa - Imprensa Universitária, Viçosa, MG, 1993, 32p.

LUCENA, F.B.; QUEIROZ DE CARVALHO; J.B., DINIZ, A.A.; COSTA, C.R.V.; LIMA, R.C. Estudo dos solos lateríticos: propriedades de solos lateríticos estabilizados com cimento. In: **21ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Salvador, BA, 1:159-175, 1986.

MELFI, A.J. **Lateritas e processos de laterização**. Publicação 093/94, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1994, 29p.

MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos de solo-cimento-fibra**: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. 1999. 131 p. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 1999.

NERVIS, L.O.N. **Identificação e discussão dos mecanismos de degradação dos pavimentos com revestimento primário**. 2016. 268 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2007. Disponível em: < http://sabi.ufrgs.br/F/HXPSIM6EMCP8GPLKJB75JT17V9L-FB1PYR1U2MHBXMMXHQ1D218-02216?func=full-set-set&set_number=028684&set_entry=000001&format=999>. Acesso em: 28 nov. 2016.

NÓBREGA, M.T. **Características e mecanismos de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista experimental**. 1995. 247 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 1995.

NOGAMI, J.S.; CORREA, F.C.; VILLIBOR, D.F. Perspectivas de aplicação do solo-cal em rodovias, exemplos de pistas experimentais. In: **4ª REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DE CAL, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL**. São Paulo - SP, pp. 212-234, 1980.

NOGAMI, J.S.; COZZOLINO, V.M.N.; VILLIBOR, D.F.; QUEIROZ, C.A.V.; GUIMARÃES, J.E.P. **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils – progress report 1982-1985**. Committee on Tropical Soils of the ISSMFE, ABMS. São Paulo - SP, 1985.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. Villibor. São Paulo - SP, 213 p., 1995.

PAIGE-GREEN, P. Draft TRH 20 - **The structural design, construction and maintenance of unpaved roads**. Pretoria, Department of Transport of the Republic South Africa, 1990. Disponível em: < <http://www.nra.co.za/content/Blogin/22.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

PARREIRA, A.B.; OLIVEIRA, J.A.O. Estudo do desempenho de misturas de solo e fosfogesso com vistas a sua utilização em obras rodoviárias. In: **29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Cuiabá, MT, 2: 228-238, 1995.

PRANDINI, F.V. **Erosão e medidas de controle**. São Paulo: IPT, 1998.

REZENDE, L.R. **Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis**. 2003. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2003.

REZENDE, L.R.; CURADO, T.S.; SILVA, M.V.; MASCARENHA, M.M.A.; METOGO, D.A.N.; CORDÃO NETO, M.P.; BERNUCCI, L.L.B. Laboratory study of phosphogypsum, stabilizers and tropical soil mixtures. **Journal of materials in civil engineering**, v. 28, 2016, DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001711.

SAMPAIO, M. V. **Determinação e espacialização das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul**. 2011. 146 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

SILVA, E.A. Uso de escória de aciária em pavimentação viária. In: **28ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, ABPv, Belo Horizonte - MG, 1: 262-283, 1994.

SKEMPTON, A.W. The colloidal activity of clays. Zurich: Proc. **3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING**. V. 1, 1953, p. 57.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo – São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977, 509 p.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

CAPÍTULO 20

Probabilidade de ruptura transiente de taludes não saturados em bordas de reservatórios

André Luís Brasil Cavalcante
José Camapum de Carvalho

Palavras-Chave: Estabilidade de Taludes. Infiltração. Solos Não Saturados. Fator de Segurança Transiente. Probabilidade de Ruptura Transiente.

1 Introdução

O aumento da umidade do solo em maciços de borda de reservatório tem geralmente três origens: infiltração de água de chuva; ascensão capilar a partir do nível freático imposto pelo reservatório em suas proximidades; fluxo de origem hidrogeológica. Neste capítulo se dará ênfase ao aumento de umidade devido à infiltração da água da chuva. No caso de reservatórios artificiais, essa análise assume grande relevância, uma vez que se soma ao efeito oriundo da subida do lençol freático e da conseqüente elevação capilar devido ao enchimento e à existência do reservatório, situação distinta daquela de equilíbrio que antecede a existência do reservatório e que pode propiciar rupturas de taludes, desencadeando processos erosivos de borda.

A infiltração da água de chuvas em taludes nas bordas de reservatórios provoca o aumento do grau de saturação dos solos. O grau de saturação funciona como a principal propriedade geotécnica impulsionadora da instabilidade. Por consequência disso e de um aumento muito provável do nível freático, existe não apenas um aumento do peso específico dos solos do talude, o que em taludes mais inclinados resulta num aumento das forças desestabilizadoras, mas também uma perda de resistência devido à diminuição das poropressões negativas, perceptíveis pelo comportamento da curva característica, causando a eliminação da coesão aparente. As sucções são forças estabilizadoras, sendo que a sua anulação ou simples redução resulta numa diminuição do fator de segurança e no conseqüente aumento da probabilidade de ruptura. O aumento do nível freático pode também causar diferenças significativas de permeabilidade entre materiais de diferentes profundidades, sendo que a permeabilidade aumenta com o aumento do grau de saturação do solo, conforme pode ser observado pela função de condutividade hidráulica não saturada, ressaltando-se, porém, as situações em que ocorre a oclusão da fase ar. Essa condição pode resultar na criação de caminhos de percolação da água entre camadas que provocam erosão interna, cujo principal efeito é a forte diminuição da resistência cisalhante, tornando-a uma superfície potencial de deslizamento. Tem-se ainda que

a infiltração da água da chuva pode provocar instabilizações estruturais, em especial quando, sob efeito da sucção, a penetração da água no solo gera pressão neutra positiva que supere a coesão do solo e as tensões normais nos contatos.

Para o correto controle ou mitigação dos problemas relacionados à proteção dos taludes em bordas de reservatórios, são fundamentais o conhecimento adequado do fenômeno de infiltração e o acoplamento do seu efeito no estudo de estabilidade de taludes. Este capítulo trata sobre o estudo da estabilidade de taludes em bordas de reservatórios em decorrência de processos de infiltração, em condição não saturada e transiente, não se atendo a avaliações de particularidades, como a relacionada ao surgimento de pressão neutra positiva na fase ar. Por fim, propõe-se um estudo estocástico sobre a probabilidade de ruptura transiente do talude, durante o processo de infiltração.

2 Infiltração de água da chuva

A infiltração da água de chuvas em taludes em bordas de reservatórios desempenha um papel fundamental na erosão e na estabilidade do solo. A infiltração é definida como o fenômeno de entrada da água na superfície do solo e é descrita pela Equação de Richards. Essa equação descreve a infiltração através de uma zona não saturada, em regime transiente, e é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \left(\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

onde θ é o teor de umidade volumétrica [L^3L^{-3}], ψ é a sucção total [$ML^{-1}T^{-2}$], ρ_w é a massa específica da água [ML^{-3}], $k_z(\psi)$ é a função de condutividade hidráulica expressa em termos da sucção ψ [LT^{-1}], g é a aceleração da gravidade [LT^{-2}] e t é o tempo [T].

É comum dividir-se a sucção total, ψ , em dois componentes, a sucção mátrica, $u_a - u_w$, e a sucção osmótica, π , devido à concentração de sais na água:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2)$$

Nesse trabalho, considera-se a fase ar contínua e que a pressão de ar do talude na borda do reservatório é igual à pressão atmosférica ($u_a = 0$), e que a sucção osmótica pode ser desprezada embora em situações específicas, o que não é o caso, portanto ela deve ser considerada:

$$\psi = -u_w \quad (3)$$

Vale ressaltar que, em situações em que a água da chuva está contaminada, a consideração da sucção osmótica é recomendada. Também cabe considerar esse efeito no caso de alterações da qualidade do fluido a partir do reservatório, por exemplo, devido à chegada de insumos agrícolas.

Uma outra forma de representar a Equação de Richards é a versão em termos de θ , também conhecida como a Equação de Fokker-Planck (PHILIP, 1960; BEAR, 1979):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial k_z(\theta)}{\partial z} \tag{4}$$

com

$$D_z(\theta) = \frac{k_z(\theta)}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \tag{5}$$

onde D_z é a difusividade não saturada da água na direção z [L^2T^{-1}].

Cavalcante e Zornberg (2017) usaram uma forma modificada da Equação de Fokker-Planck, a qual possibilitou a obtenção de soluções analíticas para o problema de fluxo transiente e condições não saturadas. A forma modificada proposta por Cavalcante e Zornberg (2017) é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - a_s(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \tag{6}$$

com

$$a_s(\theta) = \frac{\partial k_z(\theta)}{\partial \theta}, \tag{7}$$

onde $a_s(\theta)$ é o fluxo advectivo não saturado [LT^{-1}]. Usando essa representação da Equação de Richards e funções hidráulicas específicas, Cavalcante e Zornberg (2017) desenvolveram soluções analíticas para o problema de fluxo não saturado, usando uma variedade de condições inicial e de contorno.

As funções hidráulicas são expressas em termos da curva característica e da função de condutividade hidráulica não saturada. A curva característica para o fluxo não saturado é a representação gráfica de como a sucção varia com o teor de umidade volumétrica. Já a função de condutividade hidráulica não saturada representa graficamente como a variação da sucção impacta a condutividade hidráulica. Cavalcante e Zornberg (2017) apresentaram soluções analíticas para Equação de Richards, para diferentes condições, inicial e de contorno, fazendo uso da curva característica e da função de condutividade hidráulica não saturada definidas, respectivamente, por:

$$\theta(|\psi|) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{-|\psi|^\delta} \tag{8}$$

$$k(|\psi|) = k_s e^{-\delta|\psi|}, \tag{9}$$

onde θ_s é o teor de umidade volumétrica saturado [L^3L^{-3}], θ_r é o teor de umidade volumétrica residual [L^3L^{-3}], δ é um parâmetro de ajuste hidráulico [$M^{-1}LT^2$] e k_s é a condutividade hidráulica saturada do solo [LT^{-1}].

Para as funções hidráulicas descritas pelas Eq. (8) e (9), os parâmetros hidráulicos $D_z(\theta)$ – Eq. (5) – e $a_s(\theta)$ – Eq. (7) – tornam-se constantes e, respectivamente, dados por:

$$\bar{D}_z = \frac{k_s}{\delta(\theta_s - \theta_r) \rho_w g} \tag{10}$$

$$\bar{a}_s = \frac{k_s}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (11)$$

onde \bar{D}_z é a difusividade não saturada constante da água na direção z e \bar{a}_s é o fluxo advectivo não saturado constante, obtidos quando $\psi(\theta)$ e $k_z(\theta)$ são representados pelas Eq. (8) e (9), respectivamente.

O problema foi resolvido para uma coluna de solo de comprimento finito, com uma taxa de infiltração constante imposta no contorno superior. Especificamente, a condição inicial nesse caso é descrita por um teor de umidade inicial uniforme, descrito por:

$$\theta(z, 0) = \theta_i \quad (12)$$

onde θ_i é uma constante.

Uma condição de contorno de Neumann é adotada, a qual envolve uma taxa de infiltração constante imposta no contorno superior do domínio, como segue:

$$\left(\bar{D}_z \frac{\partial \theta}{\partial z} - k_z \right)_{z=0} = v_0 \quad (13)$$

onde v_0 é constante. A taxa de infiltração máxima que pode ser fisicamente imposta corresponde à condutividade hidráulica saturada do solo k_s . Especificamente, a taxa de infiltração máxima imposta é:

$$v_{0,max} = \frac{\theta_s k_s}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (14)$$

Para uma coluna de solo de comprimento finito, L , a condição de contorno inferior adotada neste estudo é descrita por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z}(L, t) = 0 \quad (15)$$

Essa condição de contorno inferior implica que, a uma dada profundidade, o teor de umidade e, conseqüentemente, a sucção, alcançam um valor constante. Isso implica que, em uma dada profundidade, o gradiente hidráulico na direção z iguala-se a um. A solução analítica que corresponde a essa condição inicial e condições de contorno é (CAVALCANTE; ZORNBERG, 2017):

$$\theta(z, t) = \theta_i + \left(\frac{v_0}{k_s} (\theta_s - \theta_r) - \theta_i \right) D(z, t) \quad (16)$$

com

$$D(z, t) = 1 - \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\bar{a}_s L}{\bar{D}_z} \beta_m \left[\beta_m \cos\left(\frac{\beta_m z}{L}\right) + \frac{\bar{a}_s L}{2\bar{D}_z} \sin\left(\frac{\beta_m z}{L}\right) \right] \exp\left(\frac{\bar{a}_s z}{2\bar{D}_z} - \frac{\bar{a}_s^2 t}{4\bar{D}_z} - \frac{\beta_m^2 \bar{D}_z t}{L^2}\right)}{\left[\beta_m^2 + \frac{\bar{a}_s L}{\bar{D}_z} + \left(\frac{\bar{a}_s L}{2\bar{D}_z}\right)^2 \right] \left[\beta_m^2 + \left(\frac{\bar{a}_s L}{2\bar{D}_z}\right)^2 \right]} \quad (17)$$

onde β_m são os autovalores correspondentes às raízes positivas da equação:

$$\beta_m \cot(\beta_m) - \frac{\beta_m^2 \bar{D}_z}{\bar{a}_s L} + \frac{\bar{a}_s L}{4\bar{D}_z} = 0 \quad (18)$$

3 Resistência cisalhante não saturada

A resistência cisalhante da superfície de ruptura de um talude em borda de reservatório, em condição não saturada, pode ser definida em termos das variáveis de estado de tensão (FREDLUND; MORGENSTERN; WIDGER,1978):

$$\tau_{\max} = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (19)$$

onde c' é a coesão efetiva [$ML^{-1}T^{-2}$], ϕ' é o ângulo de atrito efetivo [$^\circ$], ϕ_b é o ângulo de atrito do solo em relação à sucção [$^\circ$], $\sigma_n - u_a$ é a tensão total líquida [$ML^{-1}T^{-2}$] e $u_a - u_w$ é a sucção mátrica [$ML^{-1}T^{-2}$].

Ao se considerar que a pressão de ar do talude na borda do reservatório é igual à pressão atmosférica ($u_a = 0$), pode-se reescrever a Eq. (19) da seguinte forma:

$$\tau_{\max} = c' + \sigma'_n \tan \phi' \quad (20)$$

com

$$\sigma'_n = \sigma_n - u_w \frac{\tan \phi_b}{\tan \phi'} \quad (21)$$

O parâmetro $\tan \phi_b / \tan \phi'$ tem sido associado ao grau de saturação, S_r , sendo descrito da seguinte forma, assim como o fez Bishop (1959) em relação ao parâmetro χ :

$$S_r = \frac{\tan \phi_b}{\tan \phi'} \quad (22)$$

Deve-se esperar que ϕ_b seja próximo a ϕ' quando o solo estiver no campo a baixas sucções matriciais, isto é, o solo encontra-se praticamente saturado, com valores de S_r próximos a 100%. Além disso, ϕ_b deve tender para zero à medida que a sucção matricial aumente e o solo se distancie da sua condição saturada. A redução de ϕ_b com o aumento da sucção se deve em especial ao fato de o número de contatos em que atua diminuir, intervindo na força cisalhante, e como não se considera a área de contato real, isso termina conduzindo a menores valores de ϕ_b . Destaca-se ainda que, no caso dos solos tropicais profundamente intemperizados e agregados, e no caso de uso de agregados artificiais como o resíduo de construção civil e demolição (RCD) em mistura com o solo, quando se dá a entrada de ar nesses agregados em função do aumento da sucção, essa sucção, ao passar de modo predominante a atuar no interior dos agregados, deixa de intervir na resistência propriamente dita. Essa observação complementa as análises apresentadas por CAMAPUM DE CARVALHO (2010), as quais mostram que nem a porosidade dos agregados nem a umidade neles presente interferem de modo direto no comportamento do solo.

Gulhati e Satija (1981) realizaram ensaios triaxiais em amostras em condições naturais e compactadas. Os autores verificaram que o parâmetro $\tan\phi_b/\tan\phi'$ dependia de diversos fatores, como o histórico e a magnitude das tensões aplicadas, a estrutura do solo e a histerese. Foram relatados valores negativos de $\tan\phi_b/\tan\phi'$ para solos colapsíveis, valores distintos para solos com o mesmo grau de saturação e ainda, valores superiores à unidade, contrariando, em princípio, a hipótese inicial de que $\tan\phi_b/\tan\phi'$ é função unicamente do grau de saturação.

4 Estabilidade de talude não saturado

Considerando que o escorregamento do talude na borda do reservatório seja predominantemente translacional, paralelo à superfície do talude, a análise pode ser feita pelo método do talude infinito. Nesse caso, o peso do elemento de solo que sofre a ruptura (Figura 1) pode ser expresso por:

$$W = \gamma_{nat} A.z \cos \beta, \quad (23)$$

onde A é a área correspondente ao plano de ruptura.

Além disso, as forças normal e cisalhante geradas em decorrência do peso próprio do talude são, respectivamente,

$$F'_n = W \cos \beta \quad (24)$$

$$F_s = W \sin \beta, \quad (25)$$

onde, em vista da Eq. (21), tem-se que:

$$F'_n = F_n - u_w A. \frac{\tan \phi_b}{\tan \phi'}. \quad (26)$$

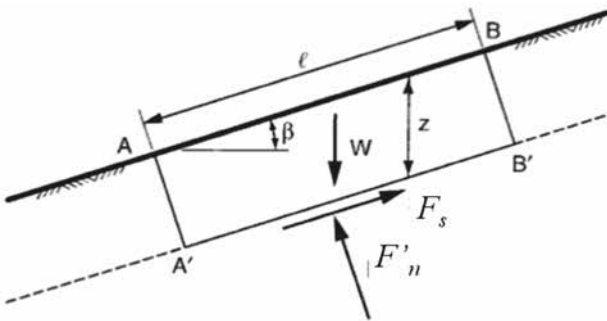


Figura 1. Consideração de talude infinito na borda do reservatório.

Dessa forma, substituindo a Eq. (23) nas Eq. (24) e (25), segue que:

$$F_n = \gamma_{nat} A.z \cos^2 \beta + u_w A. \frac{\tan \phi_b}{\tan \phi'} \quad (27)$$

$$F_s = \gamma_{nat} A.z \cos \beta \sin \beta \quad (28)$$

As tensões normal e cisalhante na superfície de ruptura do talude na borda do reservatório são, por definição, respectivamente,

$$\sigma'_n = \frac{F_n}{A} \tag{29}$$

$$\tau = \frac{F_s}{A} \tag{30}$$

Substituindo a Eq. (27) na Eq. (29) e a Eq. (28) na Eq. (30), segue que:

$$\sigma'_n = \gamma_{nat} \cdot z \cos^2 \beta + u_w \cdot \frac{\tan \phi_b}{\tan \phi'} \tag{31}$$

$$\tau = \gamma_{nat} \cdot z \cos \beta \sin \beta \tag{32}$$

O fator de segurança em relação à ruptura do talude na borda do reservatório é dado por:

$$FS = \frac{\tau_{max}}{\tau} \tag{33}$$

Substituindo a Eq. (20), a (31) e a (32) na Eq. (33), segue que:

$$FS = \frac{c' + \left(\gamma_{nat} \cdot z \cos^2 \beta + u_w \cdot \frac{\tan \phi_b}{\tan \phi'} \right) \tan \phi'}{\gamma_{nat} \cdot z \cos \beta \sin \beta} \tag{34}$$

Como visto anteriormente, o parâmetro $\tan \phi_b / \tan \phi'$ não é função unicamente do grau de saturação; dessa forma, neste trabalho propõe-se a seguinte relação:

$$\frac{\tan \phi_b}{\tan \phi'} = \xi \cdot S_r \tag{35}$$

onde ξ é uma constante positiva que depende do histórico e magnitude das tensões aplicadas ao solo, da estrutura porosa dos solos e da histerese observada durante o umedecimento e a secagem do solo.

Substituindo-se a Eq. (35) na Eq. (34), segue que o fator de segurança transiente relacionado à ruptura do talude da borda do reservatório é dado por:

$$FS(z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{c' - \psi(z, t) \cdot \xi \cdot S_r(z, t) \tan \phi'}{\gamma_{nat} \cdot z \cos \beta \sin \beta} \tag{36}$$

onde

$$\psi(z, t) = -\frac{1}{\delta} \ln \left(\frac{\theta(z, t) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tag{37}$$

$$S_r(z, t) = \frac{\theta(z, t)}{\theta_s} \tag{38}$$

5 Estudo de caso: infiltração e ruptura do talude na borda do reservatório

Considere que o solo do talude na borda do reservatório pode ser descrito pelos parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 1. Tendo em vista que os solos mais intemperizados geralmente apresentam baixo valor de coesão real, adotou-se $c' = 0$. Considere também que a curva característica e a função de condutividade hidráulica não saturada desse solo sejam descritas nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Nessas condições, a imposição de uma taxa de infiltração constante de $5,7 \cdot 10^{-7}$ m/s na fronteira superior do talude na borda do reservatório conduz a uma variação do teor de umidade volumétrica descrita na Figura 4.

Conforme pode ser observado pela Figura 4, à medida que o tempo passa, o teor de umidade volumétrica do solo que se encontrava inicialmente em 13% sofre gradativos aumentos até alcançar o valor de aproximadamente 36%, caracterizando a molhagem do solo. Observa-se pela Figura 4 que, nessas condições, após um período de aproximadamente cinco dias, uma camada de 0,5 metro de espessura atinge o teor de umidade volumétrica máximo.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos e inclinação do talude na borda do reservatório.

c' (kPa)	0
ϕ' ($^\circ$)	35
γ (kN/m ³)	18
k_s (m/s)	$8,2 \cdot 10^{-7}$
θ_s	0,41
θ_r	0,04
β ($^\circ$)	35

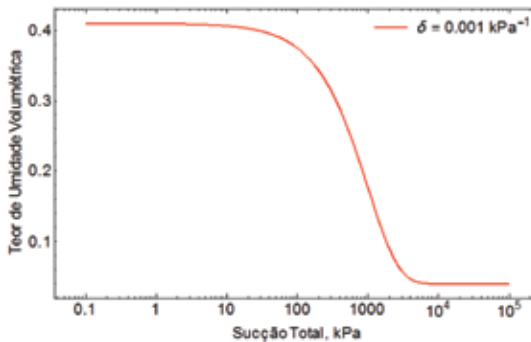


Figura 2. Curva característica do talude na borda do reservatório.

À medida que a umidade volumétrica aumenta, a sucção mátrica do solo diminui, conforme pode ser observado pela Figura 5. Nessas condições, para uma camada de espessura 0,5 metro, quando o teor de umidade volumétrica da camada de solo era de aproximadamente 13%, a sucção mátrica correspondente era de aproximadamente 1.400 kPa. Com a infiltração, a sucção mátrica diminui até atingir o valor de aproximadamente 100 kPa, quando o teor de umidade volumétrica atingiu 36%, após um período de aproximadamente cinco dias.

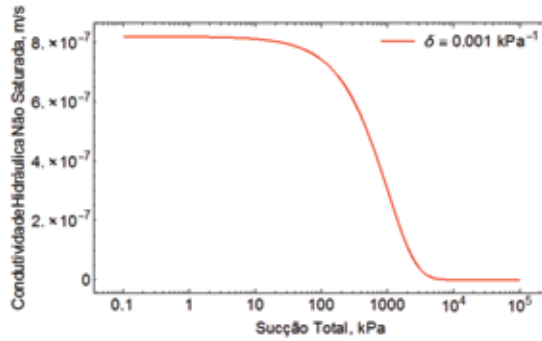


Figura 3. Função de condutividade hidráulica não saturada do talude na borda do reservatório.

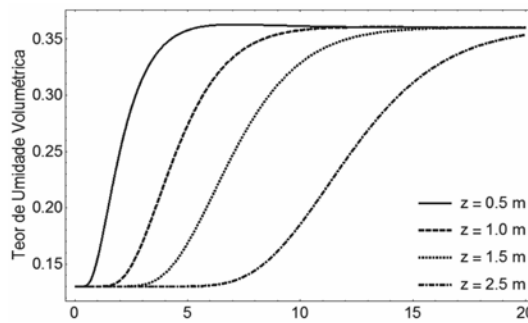


Figura 4. Variação do teor de umidade volumétrica ao longo do tempo, para diferentes espessuras de camada do talude na borda do reservatório.

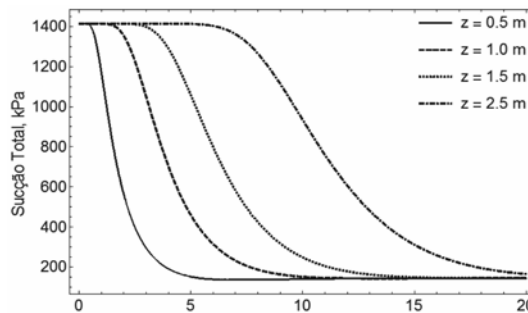


Figura 5. Variação da sucção mátrica ao longo do tempo, para diferentes espessuras de camada do talude na borda do reservatório.

Como o talude aumenta sua umidade em decorrência do processo de infiltração, sua facilidade de percolação também aumenta, como pode ser observado na Figura 6. Nessa figura, a condutividade hidráulica não saturada do solo que inicialmente encontrava-se no valor de $2 \cdot 10^{-7}$ m/s (para altas sucções) tende a um valor de aproximadamente $7 \cdot 10^{-7}$ m/s, com o aumento do teor de umidade volumétrica. Observa-se pela Figura 6 que o valor máximo de condutividade hidráulica não saturada é alcançada também após aproximadamente cinco dias, para uma camada de espessura aproximada de 0,5 metro.

A variação do grau de saturação do solo também pode ser observada durante o processo de infiltração (Figura 7). Como o solo ainda não atingiu seu teor de umidade volumétrica saturado ($\theta_s = 41\%$), observa-se que o grau de saturação atingiu apenas cerca de 87%.

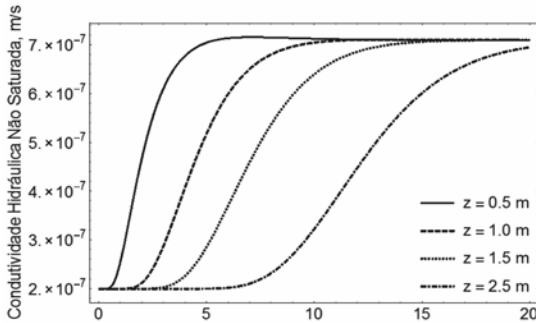


Figura 6. Variação da condutividade hidráulica não saturada ao longo do tempo, para diferentes espessuras de camada do talude na borda do reservatório.

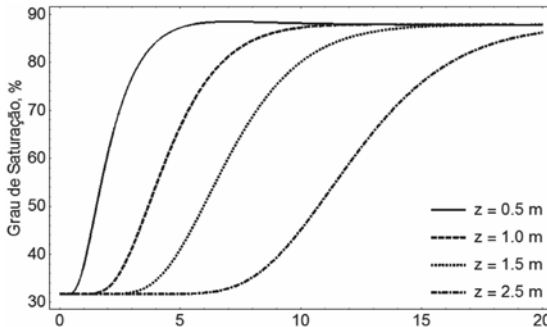


Figura 7. Variação do grau de saturação ao longo do tempo, para diferentes espessuras de camada do talude na borda do reservatório.

A consequência imediata do aumento do grau de saturação do talude da borda do reservatório é a diminuição do fator de segurança, como pode ser observado pela Figura 8.

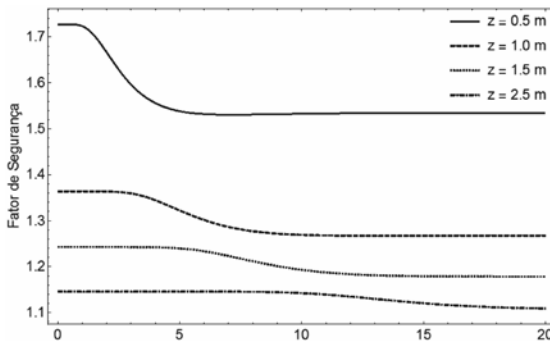


Figura 8. Variação do fator de segurança ao longo do tempo, para diferentes espessuras de camada do talude na borda do reservatório.

6 Análise paramétrica do fator de segurança transiente

Com o intuito de se avaliar a influência da coesão efetiva, do ângulo de atrito efetivo e do peso específico do solo na estabilidade do talude na borda do reservatório, foi realizada uma análise paramétrica, considerando um talude de espessura de 1,5 metro. Também se estudou a influência da inclinação na estabilidade do talude.

Pela Figura 9, observa-se a diminuição do fator de segurança ao longo do tempo, com o avanço da infiltração, para diferentes valores de coesão efetiva do solo do talude na borda do reservatório. Além disso, considerando todos os parâmetros geotécnicos e a inclinação do talude na borda do reservatório constantes, tais como estabelecidos na Tabela 1, quanto maior a coesão efetiva, maior o fator de segurança referente à estabilidade do talude.

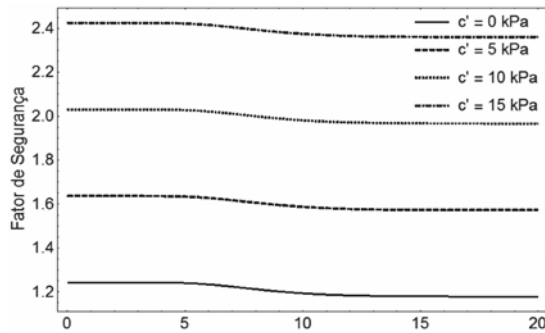


Figura 9. Variação do fator de segurança ao longo do tempo, para diferentes coesões efetivas do talude na borda do reservatório.

A Figura 10 coloca em evidência perdas semelhantes no fator de segurança com o tempo, indicando, assim, que a coesão efetiva apenas translada o fator de segurança, não sendo afetada, como esperado, pela infiltração e, portanto, pela variação de sucção. O mesmo não pode ser dito a respeito da coesão aparente oriunda da sucção, responsável direta no caso de maciços não saturados pelo fator de segurança, aumentando-o ou diminuindo-o respectivamente com o aumento e a redução da sucção atuante no solo, como se depreende da Figura 8, que mostra a redução do fator de segurança com o tempo de infiltração para diferentes espessuras de camada.

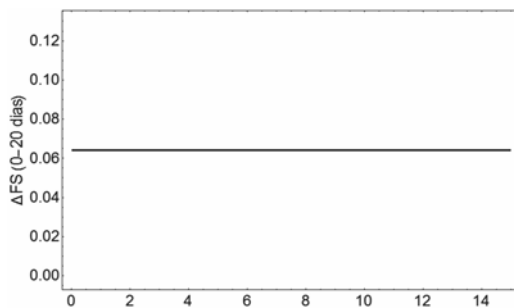


Figura 10. Diferença entre o FS (t = 0 s) e o FS (t = 20 dias) versus coesão efetiva do talude na borda do reservatório.

Pela Figura 11, observa-se a diminuição do fator de segurança ao longo do tempo, com o avanço da infiltração, para diferentes valores de ângulo de atrito efetivo do solo do talude na borda do reservatório. Além disso, considerando todos os parâmetros geotécnicos e a inclinação do talude na borda do reservatório constantes, tais como estabelecidos na Tabela 1, quanto maior o ângulo de atrito efetivo, maior o fator de segurança referente à estabilidade do talude. Observação semelhante à apresentada em relação à influência da variação da coesão efetiva no fator de segurança não pode ser feita em relação ao ângulo de atrito efetivo do solo.

Como pode ser observado pela Figura 12, a contribuição do ângulo de atrito efetivo é afetada, como esperado, pela infiltração e, portanto, pela variação de sucção. Nesse caso, o que se dá é o aumento da resistência do solo em função dos aumentos de tensões normais nos contatos em consequência da atuação da sucção/capilaridade. No caso das argilas, como os contatos se dão por meio da água em estado sólido, embora maiores estudos sejam necessários, há de se esperar que a sucção termine intervindo no próprio atrito.

Observa-se pela Figura 11 a alta influência do ângulo de atrito efetivo na estabilidade do talude na borda do reservatório. Nesse caso foram observados, dependendo do ângulo de atrito efetivo, fatores de segurança menores do que um.

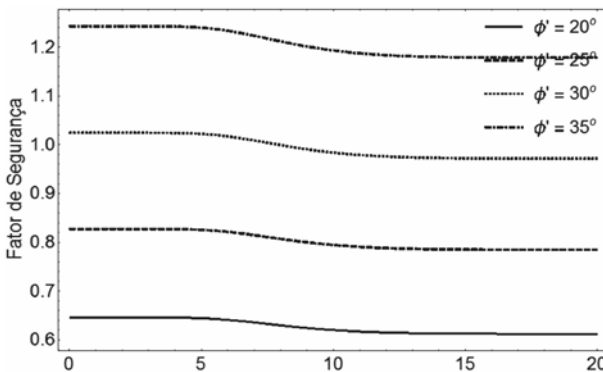


Figura 11. Variação do fator de segurança ao longo do tempo, para diferentes ângulos de atritos efetivos do talude na borda do reservatório.

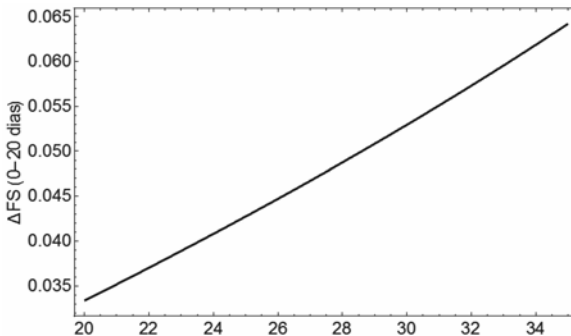


Figura 12. Diferença entre o FS ($t = 0 \text{ s}$) e o FS ($t = 20 \text{ dias}$) versus ângulo de atrito efetivo do talude na borda do reservatório.

Pela Figura 13, observa-se a diminuição do fator de segurança ao longo do tempo, com o avanço da infiltração, para diferentes valores do peso específico do solo do talude na borda do reservatório. Além disso, considerando todos os parâmetros geotécnicos e a inclinação do talude na borda do reservatório constantes, tais como estabelecidos na Tabela 1, quanto menor o peso específico, maior o fator de segurança referente à estabilidade do talude. No entanto, como a porosidade é maior para o menor peso específico, tem-se maior ganho de massa com a infiltração nesse solo, o que conduz a uma maior redução do fator de segurança com o tempo de infiltração (Figura 14).

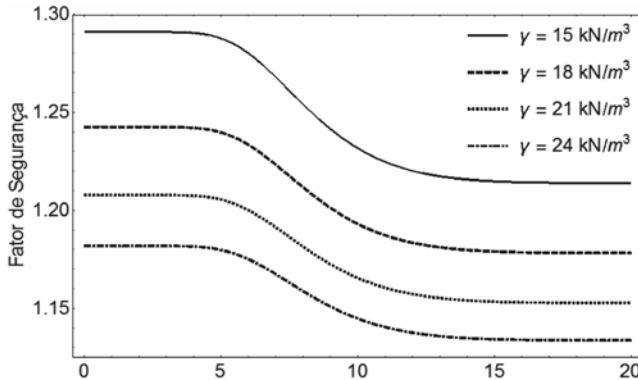


Figura 13. Variação do fator de segurança ao longo do tempo, para diferentes pesos específicos do talude na borda do reservatório.

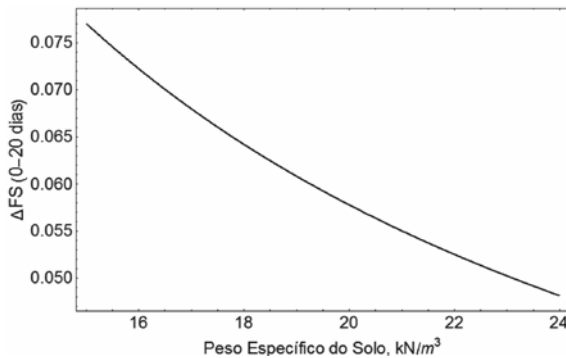


Figura 14. Diferença entre o FS ($t = 0 \text{ s}$) e o FS ($t = 20 \text{ dias}$) versus peso específico do solo do talude na borda do reservatório.

Pela Figura 15, observa-se a diminuição do fator de segurança ao longo do tempo, com o avanço da infiltração, para diferentes valores da inclinação do solo do talude na borda do reservatório. Além disso, considerando todos os parâmetros geotécnicos e a inclinação do talude na borda do reservatório constantes, tais como estabelecidos na Tabela 1, quanto menor a inclinação do talude, maior o fator de segurança referente à estabilidade do talude. Embora não tenha sido considerado nas análises, cabe salientar que normalmente a taxa de infiltração para um mesmo tipo de solo cobertura tende a diminuir com o aumento da inclinação em função do aumento do fluxo laminar de superfície.

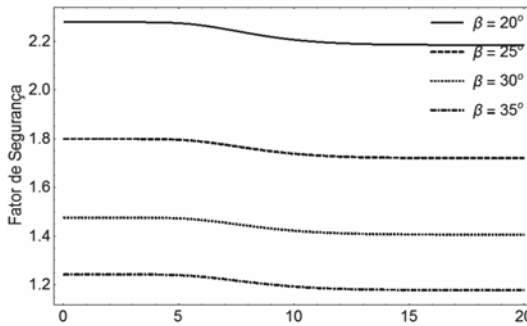


Figura 15. Variação do fator de segurança ao longo do tempo, para diferentes inclinações do talude na borda do reservatório.

7 Método do ponto de estimativa de rosenblueth

Em termos do fator de segurança, a probabilidade de ruptura é definida como a probabilidade na qual o fator de segurança pode ser menor do que 1.0, devido a valores adversos provenientes da variabilidade dos parâmetros envolvida nos cálculos. O método do ponto de estimativa de Rosenblueth (ROSENBLUETH, 1975; HAMMAH; YACOUB, 2008) pode ser usado para avaliar a confiabilidade do talude na borda do reservatório contra o deslizamento.

A essência do método de Estimativa de Rosenblueth é calcular o valor médio (μ) e o desvio-padrão (σ) do fator de segurança (FS). Nesse método, considera-se que dois pontos de estimativa possam ser selecionados como $\mu \pm \sigma$ para uma variável (neste capítulo denominam-se $\mu + \sigma$ and $\mu - \sigma$ os pontos de estimativa positivo e negativo, respectivamente). Como n variáveis estão presentes na expressão de FS – Eq. (36) –, um total de 2^n combinações dos pontos de estimativas é obtido. Assim, 2^n FS s são determinados a partir de cada uma das combinações, das quais a média (μ_{FS}) e o desvio-padrão (σ_{FS}) de FS são determinados matematicamente, respectivamente, pelas expressões:

$$\mu_{FS} = \sum_{i=1}^{2^n} w_i \times f_i \quad (39)$$

$$\sigma_{FS} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{2^n} w_i \times f_i^2 \right) - \mu_{FS}^2}, \quad (40)$$

onde f_i e w_i são, respectivamente, o FS e o peso da i -ésima combinação. A expressão matemática de w_i é dada por:

$$w_i = \frac{1 + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \rho_{jk} \times A}{2^n}, \quad j \neq k, \quad (41)$$

onde ρ_{jk} é a correlação (-1 a 1) entre duas variáveis. A é o determinante igual a 1 ou -1. Para uma dada combinação, quando duas variáveis usam pontos de estimativa positivos ou negativos, A é igual a 1; em outros casos, $A = -1$. Uma vez computados os valores de μ_{FS} e σ_{FS} de FS , a probabilidade de ruptura pode ser computada.

De acordo com o método de Rosenblueth, o fator de segurança segue uma distribuição normal. A distribuição normal de FS com μ_{FS} e σ_{FS} é descrita pela função de densidade de probabilidade (PDF), dada por:

$$P_{FS}(f_i) = \frac{1}{\sigma_{FS}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f_i - \mu_{FS})^2}{2\sigma_{FS}^2}\right], \quad -\infty < f_i < \infty \quad (42)$$

Como os valores dos parâmetros da função de densidade de probabilidade variam para cada possibilidade de combinação de μ_{FS} e σ_{FS} , é necessário calcular a área sobre a curva de distribuição normal cada vez que se deseja calcular probabilidades. Essa área pode ser encontrada relacionando-se a distribuição de qualquer média e desvio-padrão à distribuição normal padronizada ($\mu_{FS} = 0$ e $\sigma_{FS} = 1$). A distribuição normal padronizada é dada por:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right), \quad -\infty < z < \infty \quad (43)$$

com

$$z = \frac{f_i - \mu_{FS}}{\sigma_{FS}}. \quad (44)$$

Conseqüentemente, é possível realizar a integração da distribuição normal padronizada para calcular a área entre dois limites. O risco da ruptura do talude na borda do reservatório é diretamente relacionado à probabilidade de ruptura. A probabilidade de ruptura pode ser entendida como a área obtida pela integração da Eq. (43) de $z_{min} = -\infty$ a $z_{max} = \beta$:

$$\Phi(\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (45)$$

β é denominado índice de confiabilidade e corresponde ao número de desvios-padrão entre o valor mais desejado para o fator de segurança e o fator de segurança mínimo contra a ruptura, ou seja,

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - FS_c}{\sigma_{FS}}, \quad (46)$$

onde FS_c é o fator de segurança mínimo contra a ruptura.

A integral apresentada na Eq. (45) pode ser expressa por:

$$\Phi(\beta) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{\beta}{\sqrt{2}}\right), \quad (47)$$

onde $\operatorname{erfc}(x)$ é a função erro complementar.

Como resultado, quando f_i segue uma distribuição normal, a probabilidade de ruptura (P_f) pode ser estimada como:

$$P_f = P(FS < FS_c) = \Phi\left(\frac{FS_c - \mu_{FS}}{\sigma_{FS}}\right) \quad (48)$$

Finalmente, a confiabilidade da estabilidade do talude na borda do reservatório é dada por:

$$R = 1 - P_f \quad (49)$$

8 Análise estocástica do fator de segurança transiente

A heterogeneidade e a anisotropia do solo, os diferentes tipos de ensaios utilizados na obtenção dos parâmetros e as diferentes técnicas de amostragem contribuem para a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Em geral, o coeficiente de variação da coesão, que é um parâmetro sujeito a uma considerável variação, varia entre 0,1 e 0,4. O coeficiente de variação do ângulo de atrito é um pouco menor e varia entre 0,02 e 0,13. Em contraste, o coeficiente de variação do peso específico do solo do talude é pequeno (0,03 a 0,07), e às vezes pode ser inclusive considerado desprezível (HARR, 1984; KULHAWY, 1992).

Neste estudo, os parâmetros determinísticos δ e β foram considerados constantes: ($\delta = 0,001$ e $\beta = 35^\circ$). A média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos parâmetros c' , ϕ' , e γ_{nat} são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

Propriedade	μ	σ	COV
c'	3 kPa	0,33 kPa	0,11
ϕ'	32°	2,88°	0,09
γ_{nat}	17 kN/m ³	0,85 kN/m ³	0,05

Como as três variáveis (c' , ϕ' , γ_{nat}) estão presentes na expressão que governa o FS – Eq. (36) –, um total de 8 combinações de pontos de estimativa é observada para cada tempo. Considerando uma camada de espessura de 1,5 metro, os valores encontrados para o FS são apresentados para os tempos 1 hora, 3 horas e 24 horas (Tabela 3).

A média, o desvio-padrão, o coeficiente de variação do fator de segurança e o índice de confiabilidade contra a ruptura do talude na borda do reservatório foram calculados usando as Eq. (39), (40) e (46). Esses valores foram calculados e encontram-se apresentados na Tabela 4, considerando as variáveis c' , ϕ' , γ_{nat} independentes (i.e., $\rho_{jk} = 0$), levando em conta uma camada de espessura 1,5 metro, para os tempos 1 hora, 3 horas e 24 horas.

Tabela 3. Fator de segurança contra a ruptura para os pontos de estimativa.

i	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ_{nat} (kN/m ³)	$f_i(t = 1 \text{ h})$	$f_i(t = 3 \text{ h})$	$f_i(t = 24 \text{ h})$
1	$\mu_c + \sigma_c$	$\mu_\phi + \sigma_\phi$	$\mu_\gamma + \sigma_\gamma$	2,03	1,69	1,54
2	$\mu_c + \sigma_c$	$\mu_\phi + \sigma_\phi$	$\mu_\gamma - \sigma_\gamma$	2,14	1,77	1,60
3	$\mu_c - \sigma_c$	$\mu_\phi + \sigma_\phi$	$\mu_\gamma + \sigma_\gamma$	1,67	1,41	1,29
4	$\mu_c - \sigma_c$	$\mu_\phi + \sigma_\phi$	$\mu_\gamma - \sigma_\gamma$	1,77	1,47	1,38
5	$\mu_c + \sigma_c$	$\mu_\phi - \sigma_\phi$	$\mu_\gamma + \sigma_\gamma$	1,97	1,64	1,49
6	$\mu_c + \sigma_c$	$\mu_\phi - \sigma_\phi$	$\mu_\gamma - \sigma_\gamma$	2,08	1,71	1,54
7	$\mu_c - \sigma_c$	$\mu_\phi - \sigma_\phi$	$\mu_\gamma + \sigma_\gamma$	1,62	1,35	1,23
8	$\mu_c - \sigma_c$	$\mu_\phi - \sigma_\phi$	$\mu_\gamma - \sigma_\gamma$	1,71	1,41	1,27

A Figura 16 ilustra funções de distribuição normal para o FS, para taludes de diferentes espessuras, após um período de 20 dias (Tabela 5). À medida que a espessura da camada aumenta, o desvio-padrão diminui e, conseqüentemente, a largura da curva em formato de sino também diminui e a densidade de probabilidade aumenta. As áreas abaixo de cada uma das curvas da Figura 16 são iguais a um, consistente com o fato de que a soma de todas as probabilidades de qualquer distribuição é sempre igual à unidade. Pode ser observado pela Figura 16 e pela Tabela 5 que o valor máximo da densidade de probabilidade corresponde ao menor fator de segurança.

Tabela 4. Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e índice de confiabilidade do fator de segurança para espessura da camada igual a 1,5 m.

Tempo	μ_{FS}	σ_{FS}	COV	β
$t = 1 \text{ h}$	1,87	0,18	0,10	4,60
$t = 3 \text{ h}$	1,56	0,15	0,10	3,66
$t = 24 \text{ h}$	1,41	0,14	0,10	3,06

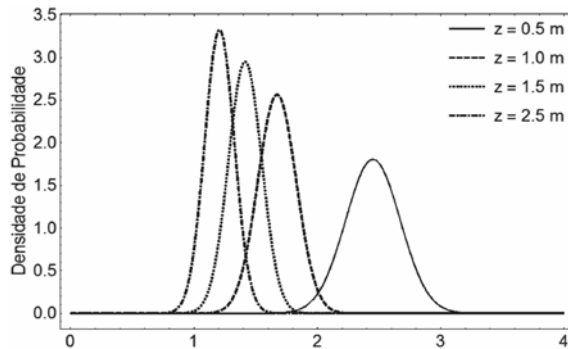


Figura 16 - Distribuição normal para taludes com diferentes espessuras, para $t = 20$ dias.

Tabela 5. Média, desvio-padrão do fator de segurança e probabilidade de ruptura, para $t = 20$ dias, e diferentes espessuras do talude.

Espessura	μ_{FS}	σ_{FS}	p_f	R
$z = 0,5 \text{ m}$	2,45	0,22	$2,7 \cdot 10^{-11}$	100%
$z = 1,0 \text{ m}$	1,67	0,15	$7,6 \cdot 10^{-6}$	99,9%
$z = 1,5 \text{ m}$	1,41	0,13	$1,1 \cdot 10^{-3}$	99,8%
$z = 2,5 \text{ m}$	1,20	0,12	$4,2 \cdot 10^{-2}$	95,7%

A Figura 17 mostra a função de densidade de probabilidade acumulada (CDF) da distribuição normal (PDF) apresentada na Figura 16. CDF é a integral de PDF, ou seja, a área sobre a curva PDF, calculada de menos infinito até o valor máximo mostrado no eixo horizontal. O valor de CDF para cada fator de segurança corresponde à probabilidade de que o FS seja menor do que este valor. Com base na CDF, Figura 17, a probabilidade de que o valor de FS seja

menor do que $FS_c = 1.0$ é apresentada na Tabela 5, para taludes de diferentes espessuras, após um período de 20 dias. Além disso, na Tabela 5, também são apresentados os valores das confiabilidades da estabilidade dos taludes de diferentes espessuras, após um período de 20 dias.

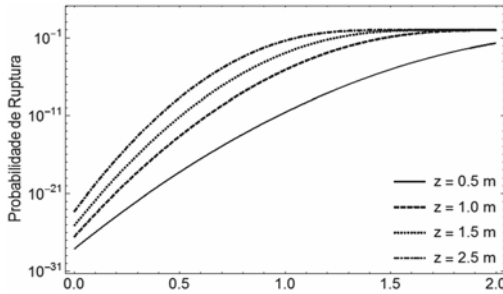


Figura 17 – Distribuição normal acumulada para taludes com diferentes espessuras, para $t = 20$ dias.

Na Figura 18 e Tabela 6 é apresentada a evolução temporal da probabilidade de ruptura para os taludes da borda do reservatório, de diferentes espessuras, para um período de 1.000 minutos. Observa-se que, para um talude de 2,5 metros de espessura, a probabilidade de ruptura do talude aumenta de $7,8 \cdot 10^{-4}$ para $4,2 \cdot 10^{-2}$, em aproximadamente 400 minutos, tornando-se constante a partir desse momento.

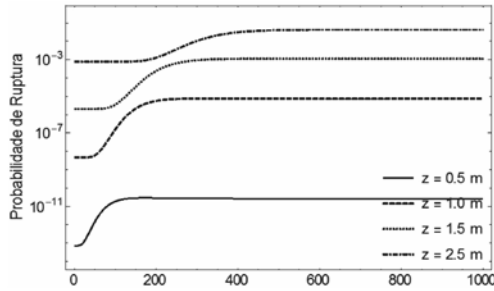


Figura 18 – Evolução temporal da probabilidade de ruptura para taludes com diferentes espessuras.

Tabela 6 – Probabilidade de ruptura para taludes com diferentes espessuras, para $t = 0$ e $t = 1.000$ minutos

Espessura	$p_f(t = 0 \text{ s})$	$p_f(t = 1.000 \text{ min.})$
$z = 0,5 \text{ m}$	$7,3 \cdot 10^{-14}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$
$z = 1,0 \text{ m}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
$z = 1,5 \text{ m}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
$z = 2,5 \text{ m}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$

9 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se uma abordagem analítica para a obtenção da probabilidade de ruptura transiente de taludes não saturados em bordas de reservatórios. Esse modelo ana-

lisado envolve a premissa da ocorrência de uma infiltração por chuva em um talude e a consequência na estabilidade do mesmo, durante o processo de infiltração. Apesar de o modelo adotar algumas simplificações na formulação de suas hipóteses, ele permite uma análise completa e quantitativa do fenômeno físico observado nesse estudo. Os resultados se mostraram interessantes e compatíveis com a observação de casos reais envolvendo o mesmo fenômeno.

Acrescenta-se que este estudo foi realizado para taludes lineares, mas pode ser facilmente adaptado para aplicações em taludes côncavos e convexos, os quais interferem no fluxo e, por consequência, requerem análises tridimensionais. Destaca-se, porém, que a percepção da influência da infiltração aqui observada para taludes lineares nessas outras formas de taludes se mantém, mas em níveis distintos.

Finalmente caberia ainda uma discussão sobre como resolver o problema da instabilização dos taludes em consequência da infiltração da água da chuva. Aumentar a taxa de impermeabilização ou simplesmente favorecer o escoamento superficial, embora possa ser avaliado, não seria em muitos casos a solução, pois desencadearia ou simplesmente ampliaria a erosão superficial. Proteger o talude contra a infiltração usando materiais não erodíveis, como é o caso do concreto, não parece também ser a solução ideal, pois ao impedir a troca de umidade com a atmosfera poderia gerar sua ampliação e consequente instabilização do talude. Mas em nível de engenharia existem evidentes possibilidades, como, por exemplo, de limitar a chegada de fluxos de água de superfície ou ainda proporcionar a ampliação da coesão efetiva por meio de cimentação, inclusive cimentação utilizando bactérias nativas, como mostra González (2009). Também a escolha de cobertura vegetal apropriada pode ser em muitos casos a solução e, em outros, como o que se refere ao plantio de bananeiras, planta com elevado potencial de retenção de umidade no solo, pode vir a ser mais uma causa de instabilização do maciço.

10 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao prof. Jorge Zornberg, da Universidade do Texas em Austin, Estados Unidos, pela sua enriquecedora contribuição no desenvolvimento do modelo analítico de fluxo transiente não saturado utilizado neste trabalho. Os autores também gostariam de expressar seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Projeto 30449420127) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes – Projeto 1431/14-5), e à Universidade de Brasília por financiar essa pesquisa.

Referências

- BEAR, J. *Hydraulics of Groundwater*. New York: McGraw-Hill, 1979. 569 p.
- BISHOP, A. W. The principle of effective stress. *Teknisk Ukebla*, v. 106, p. 859–863, 1959.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. Solo como material de construção. In: ISAIA, G. C. (Org.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. p. 527-563. Cap. 17.

CAVALCANTE, A. L. B.; ZORNBERG, J. G. *Efficient Approach to Solve Transient Unsaturated Flow Problems*. I: Analytical Solutions. *Int. J. Geomech.*, 2017.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The Shear Strength of Unsaturated Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 15, p. 313-321, 1978.

GONZÁLEZ, Y. V. *Influência da biomineralização nas propriedades físicas e mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos*. 2009. 183 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

GULHATI, S. K.; SATIJA, D. J. Shear Strength of Partially Saturated Soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., Stockholm, Sweden, 1981. *Proceedings...* Stockholm, Sweden, 1981.

HAMMAH, R. E.; YACCOUB, T. E. Probabilistic slope analysis with the finite element method. In: US ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 43., Asheville, NC, 2008. *Proceedings...* Asheville, NC, 2008.

HARR, M. E. *Reliability-based design in civil engineering*. Henry M. Shaw Lecture, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, N.C, 1984.

KULHAWY, F. H. On the evaluation of soil properties. *ASCE Geotech. Spec.*, 31, p. 95-115, 1992.

PHILIP, J. R. General method of exact solution of the concentration-dependent diffusion equation. *Aust. J. Phys.*, v. 13, p. 1-12, 1960.

ROSENBLUETH, E. Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 72, 10, p. 3.812-3.814, 1975.

CAPÍTULO 21

Prevenção e controle de processos erosivos de borda de reservatório

Maurício Martines Sales
Eder Carlos Guedes dos Santos
Renato Resende Angelim
Ennio Marques Palmeira

Palavras-chave: Processos Erosivos. Ensaios Geotécnicos. Prevenção. Obras de Recuperação. Geossintéticos.

1 Introdução

Existem diversos métodos para o controle ou prevenção de processos erosivos. Este capítulo apresenta alguns destes métodos, que são usados com mais frequência no controle ou combate a processos erosivos em áreas que margeiam reservatórios. Alguns destes processos erosivos surgem sem a interferência direta do próprio reservatório, mas são resultados da forma de ocupação das áreas lindeiras de lagos. Outras formas de erosões são consequências da criação do reservatório, do seu enchimento e operação. Neste capítulo, são apresentados os ensaios de campo que propiciam uma boa forma de investigação dos parâmetros geotécnicos indispensáveis para: projetos de intervenções e obras de engenharia no combate aos processos erosivos; formas de prevenção e controle de erosões. Destaca-se, também, a aplicação de geossintéticos em tais tipos de intervenções.

A criação de um reservatório altera sempre a dinâmica de ocupação das áreas que o margeiam. Isso pode induzir a instalação de processos erosivos. Na fase de construção do barramento, são necessárias ações como: a abertura de vias de acesso; exploração de áreas de jazidas; construção de instalações provisórias; desvio do curso d'água e outras tantas. Essas ações alteram o meio e podem, com isso, deflagrar processos erosivos.

Após o enchimento do lago, sempre surge o interesse da população em ocupar áreas próximas às suas margens, seja pela disponibilidade de água ou pela possibilidade do uso do reservatório para fins diversos. Usualmente, as fazendas vizinhas se reorganizam pela presença do novo lago e implantam pastos margeando o reservatório, uma vez que os animais terão uma nova fonte de dessedentação de fácil acesso e, em outros casos, são formadas plantações utilizando a água do reservatório para irrigação. A presença da pecuária bovina, em geral, traz danos às margens dos reservatórios pela formação de trilhas e pelo consequente pisoteio (Figura 1); já a presença de plantações com técnicas apropriadas traz uma maior estabilidade do solo, por efeito das raízes e por redução da energia do fluxo superficial das águas da chuva.

Outro fato bastante comum é a aquisição, por parte de empreendedores, de áreas próximas ao lago para a implantação de condomínios de casas ou chácaras, tirando proveito do impacto positivo proporcionado pelo reservatório. A Figura 2 mostra um lançamento das águas pluviais de um desses condomínios, provocando erosão nas margens da UHE Itumbiara (GO). Ainda vale lembrar a frequente necessidade de alteração nas rodovias que existiam na região e que, agora, terão seu greide ou traçado alterados. Todos esses fatos podem induzir o surgimento de processos erosivos nas proximidades do reservatório e, assim, afetá-lo.



Figura 1. Erosão provocada por pisoteio do gado com acesso ao reservatório. Foto: Maurício M. Sales (2015).

A dinâmica de operação do reservatório também pode implicar no aparecimento de novos processos erosivos que se iniciam ou são acelerados pelas ações abaixo, de forma isolada ou combinadas:

- Saturação de solos instáveis: Com o enchimento do reservatório, o nível do lençol será elevado, alterando o equilíbrio das pressões das fases líquida e gasosa no interior dos vazios do solo e causando a redução em sua coesão, o que pode gerar desagregação;
- Solapamento da base de taludes/encostas: Em locais onde as margens são mais íngremes, a saturação da parte inferior do talude pode levar a um escorregamento;
- Efeito de umedecimento e secagem: Este fator é mais intenso em hidrelétricas, onde o consumo do volume armazenado e o período de estiagens podem resultar em grandes oscilações no nível do reservatório num período de poucos meses. Dependendo da coesão do solo, pode ser facilitada a desagregação da camada superficial do solo outrora submerso e que agora estaria sujeito à ação do fluxo superficial de águas pluviais;
- Efeito de ondas: A combinação da velocidade do vento e a extensão em linha reta (“*fetch*”) do reservatório, na mesma direção do vento, podem provocar ondas consideráveis. Estas ondas, atuando sobre um solo mais arenoso e menos resistente, podem resultar em consideráveis erosões nas margens.

A Figura 3 apresenta uma larga faixa de solo exposta pelo rebaixamento da cota do reservatório de Furnas (MG), que está, de um modo geral, resistindo às ações das intempéries, mas com sinais do início de ravinamento. A Figura 4 ilustra dois casos de movimentos de massa de solo por solapamento da base do talude. Na Figura 5, é possível observar um caso de ação das ondas erodindo (retrabalhando) a massa de sedimentos, que já estava depositada na borda do reservatório.



Figura 2. Erosão, com carreamento de sedimentos para o reservatório da UHE-Itumbiara (GO), provocada por lançamento inadequado de águas pluviais oriundas de condomínio às margens do reservatório. Foto: Maurício M. Sales (2015).



Figura 3. Faixa de solo exposta pelo rebaixamento da cota UHE-Furnas(MG). Foto: Maurício M. Sales (2015).



Figura 4. Solapamento da base de taludes provocando movimento de massa e queda de vegetação. UHE-Furnas(MG). Foto: Maurício M. Sales (2015).



Figura 5. Ação de onda removendo camada de solo depositado na borda de reservatório. UHE-Furnas (MG). Foto: Diego Tarley Ferreira Nascimento (2015).

2 Ensaios de campo para o estudo da erodibilidade de solos

Quando se trata de erosões de margens de reservatórios, bem como das erosões contidas nas áreas da bacia do reservatório, geralmente o problema envolve grandes áreas. Isso exige que o profissional envolvido com a recuperação da área atue de uma maneira adequada para estudar os processos erosivos existentes no local.

Às vezes, os problemas são tantos que a abordagem se torna difícil. As dificuldades encontram-se nos processos de: i) cadastramento; ii) monitoramento e acompanhamento do desenvolvimento/retrocesso do caso e iii) seleção dos problemas mais graves, com vistas a propor obras de mitigação e controle.

A tecnologia e as imagens de satélite têm possibilitado e facilitado muito o trabalho de levantamento de pontos de focos erosivos. Como demonstrado por Nascimento et al. (2015), por meio do uso de *softwares* – entre eles, o *Google Earth* – é possível realizar a visualização das imagens da área de estudo, buscando-se registrar a posição dos focos erosivos para planejamento das futuras visitas de campo.

Como os focos erosivos, às vezes, deixam a superfície do solo exposta, a sua coloração típica torna-se perceptível nas imagens de satélite. Mesmo quando há presença de vegetação, o aparecimento de sombras no relevo pode indicar a existência de depressão e, assim, a presença de ravinas e voçorocas. Nesse contexto, a forma, o tamanho, a cor, a existência de sombra, a textura, etc., tornam-se informações-chave de interpretação dos focos erosivos. O *software* ainda permite confrontar imagens antigas do mesmo local e, com isso, favorece a avaliação da evolução do processo erosivo e da velocidade em que ele se desenvolveu. Outras ferramentas do software permitem uma estimativa do perfil e a determinação das dimensões do foco erosivo, que, por sua vez, possibilitam estimar o volume retirado ou escavado pelo processo e, assim, do transportado que causa o assoreamento. É importante o cadastro do foco e o seu levantamento, afinal, só se pode controlar o que se mede.

Outra questão importante na seleção dos processos erosivos é identificar quais solos ou quais porções da área (regiões) possuem os solos mais susceptíveis à erodibilidade. Ocorre que, em regiões extensas, é comum a mudança na geologia, que implica comportamentos diferentes dos solos frente à mesma ação erosiva de ondas, de encurradas e de movimentação do fluxo de água no interior do solo. No tocante aos solos, é possível diagnosticar e selecionar essas regiões mais suscetíveis por meio de ensaios geotécnicos.

Entretanto, cabe salientar que o relevo, a topografia e a presença e o tipo da cobertura vegetal são muito relevantes, pois podem intensificar ou retardar o efeito da ação erosiva. Nesse contexto, dependendo da grandeza da área, pode ser muito útil a elaboração do mapa de erodibilidade e potencialidade a processos erosivos, como proposto por Nascimento et al. (2016), pois nele pode-se agregar a influência de todos os fatores envolvidos (tipo de solo, relevo, topografia e vegetação) sobrepostos, a fim de selecionar as áreas mais suscetíveis.

Também é preciso esclarecer que nenhum ensaio isoladamente será capaz de dar informações geotécnicas necessárias sobre o solo, suas camadas, etc. Assim, sempre se farão necessários ensaios de campo (*in situ*) conjugados com os de laboratório ou *vice-versa*.

Quando se trata de erosões, é comum a coleta de amostras deformadas (Figura 6) e in-deformadas (Figura 7) no local da erosão, para realização de ensaios de laboratório, como, por exemplo, os de massa específica dos sólidos, índices de consistência, análise granulométrica e ensaios mais específicos de erodibilidade dos solos – como os ensaios de ponta de agulha, perda de massa por imersão e *Inderbitzen*. Os ensaios de campo utilizados para a determinação de parâmetros geotécnicos do solo da erosão geralmente são os penetrométricos, complementados com ensaios de medição de densidade e de permeabilidade *in situ*.

Os ensaios penetrométricos são de grande valia, pois visam quantificar a resistência do solo à penetração e sempre antecedem os bons projetos de obras de mitigação ou de intervenção na feição erosiva. Nesse caso, é comum o projetista indicar o uso de sondagens de simples reconhecimento com medição do N_{SPT} , uma vez que se trata de um ensaio tradicional da engenharia de fundações. Esse ensaio traz como vantagem: i) a amostragem do subsolo; ii) a medição do nível d'água e iii) a determinação do parâmetro geotécnico de N_{SPT} .

Cabe salientar que, dependendo da feição erosiva (por exemplo, ravinas e voçorocas) e do seu estado de evolução, às vezes, a amostragem pode ser bem mais simples, estabelecendo pontos de coleta nas paredes (talude de encosta) da erosão; e, muitas vezes, a profundidade do nível d'água pode ser obtida visualmente pelas diversas surgências d'água na base das paredes das voçorocas. A isso cabe destaque, pois, geralmente, quando se preocupa em mitigar as feições erosivas, essas usualmente se encontram em estado de evolução avançado, comprometendo algum bem público ou privado.

Além da sondagem SPT, outros tipos de ensaios são usados quando se trata de investigações mais rasas, como o cone de penetração dinâmica (DCP), muito utilizado para a verificação da infraestrutura de pavimentos, que traz como vantagem a portabilidade e leveza do equipamento, se comparado ao SPT. Os agrônomos utilizam um cone metálico que, pressionado à superfície do solo por uma haste com dinamômetro, mede a resistência à penetração do cone no solo.

A crítica que se faz aos métodos apresentados é quanto à rusticidade da execução e da aquisição de dados, possibilitando a ocorrência de erros de anotação e execução. Dessa forma, neste capítulo, torna-se interessante apresentar um equipamento ainda pouco utilizado no



Figura 6. Retirada de amostras deformadas e acondicionamento em embalagens herméticas para manter umidade natural do solo *in situ*. UHE-Furnas(MG). Foto: Maurício M. Sales (2015).



Figura 7. Retirada de amostras indeformadas por meio de moldes metálicos para ensaios de erodibilidade UHE-Furnas(MG). Foto: Maurício M. Sales (2015).

Brasil, mas uma ferramenta promissora para campanhas de investigação de campo em pequenas e médias profundidades, que atende bem quando se trata de investigação de erosões. O referido equipamento é o PANDA (*Penetrometre Autonome Numerique Dynamique Assisté Par Ordinatur*).

Desenvolvido pelo Dr. Roland Gourvès, em 1991, o PANDA, em sua segunda versão (PANDA2), é um penetrômetro dinâmico, leve e de energia variável (Figura 8).



Figura 8. Execução de ensaio PANDA2. Foto: Maurício M. Sales (2012).

O ensaio PANDA2 consiste na cravação de uma ponteira cônica – que pode ter seção de 2, 4 ou 10 cm² e ângulo da ponta de 90° –, conectada a um conjunto de hastes de 50 cm, cada com uma cabeça de bater (célula de carga) na extremidade superior, responsável em receber os golpes do martelo (energia variável) e transferir a energia para a ponta, que avança a cada impacto.

Como o ensaio só mede a resistência de ponta (q_p) em MPa, ele pode avançar na profundidade até ser notado atrito lateral entre o conjunto de hastes e as paredes do furo. Tal fato pode ser percebido durante a inserção de novo segmento de haste ao conjunto, pois, nesse momento, a fim de verificar o atrito, dá-se um torque no conjunto de hastes. A experiência com pesquisas realizadas pela Universidade Federal de Goiás (UFG) tem recomendado e convencionado a anotação do atrito a cada inserção de haste. Considera-se o atrito como: “inexistente” quando se pode fazer o torque do conjunto com apenas uma das mãos; como “leve” quando se pode fazê-lo somente com o auxílio das 2 mãos; e “moderado” a “elevado” quando só é possível dar o torque com a ajuda da chave de boca padrão – utilizada na troca de hastes – o que indica a necessidade de parada do ensaio.

Dessa forma, para sondar profundidades mais elevadas, torna-se interessante o uso de ponteiros de seções maiores, como as de 4 ou 10 cm² (Figura 9). Cabe salientar que a perda de verticalidade do conjunto também gera atrito prematuro durante a realização do ensaio e, nesses casos, é recomendável repeti-lo.



Figura 9. Ponteiros cônicos do equipamento PANDA2 com 10, 4 e 2 cm². Atrás das ponteiros de 10 e 4 cm² estão os seus conectores de ligação a haste. Foto: Renato R. Angelim (2016).

O equipamento faz a aquisição automática dos dados; o operador ajusta a energia do impacto provocada pelo martelo anti-repique, de tal forma que a ponteira não tenha penetração superior a 20 mm e nem inferior a 1 mm. Nesse último caso, o equipamento emite sinal sonoro e luminoso, avisando que não houve penetração. A capacidade máxima da célula de carga, dentro da “cabeça de bater”, é de 50 MPa.

Durante o ensaio, o “terminal de comunicação” fica ligado e é possível acompanhar no monitor o resultado de cada golpe dado como: tensão q_p ; penetração e profundidade da ponteira cônica. O equipamento indica o momento de se adicionar uma nova haste ao conjunto, por meio de sinal sonoro e luminoso emitido pela central de aquisição.

Terminada a cravação, ao se notar atrito excessivo por meio do torque no conjunto de hastes, conforme já comentado, pode-se interromper o ensaio e retirar as hastes. Se a ponteira usada é a de 2 cm² (menos usual), a retirada é fácil e simples e, no caso das ponteiros de 4 e 10 cm², é mais fácil ainda, já que as ponteiros ficam perdidas no furo – somente as hastes, que possuem menor diâmetro, são recuperadas.

Ao final do ensaio, o operador já pode visualizar os resultados do ensaio no terminal de comunicação, por meio de um gráfico “ q_d versus profundidade”, também chamado de penetrograma (Figura 10).

Os penetrogramas apresentados na Figura 10, para as quatro sondagens alinhadas e distanciadas uma da outra de 0,50m para S1-S2, de 6,50m para S2-S3, e de 2,50m para S3-S4, mostraram uma alta repetibilidade dos resultados obtidos nos ensaios PANDA 2, realizados em furos próximos, e também a sensibilidade do equipamento em perceber a mudança da resistência ao longo das camadas atravessadas do perfil.

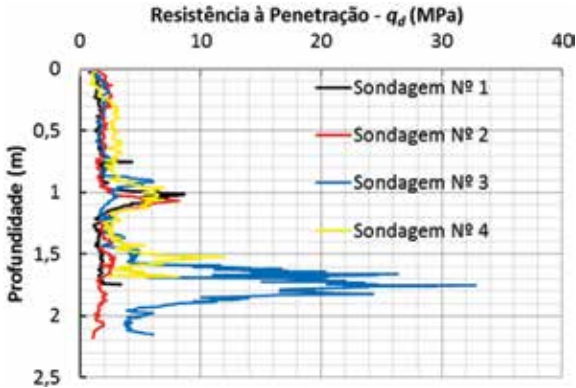


Figura 10. Resultado de quatro ensaios PANDA 2 com ponteira de 2 cm² na margem do reservatório da UHE Itumbiara (GO). Foto: Renato R. Angelim (2016).

Pesquisas pioneiras realizadas com o equipamento PANDA 2 por Camapum de Carvalho (2006), Alves e Silva (2011), Cousineau (2012), Ferreira, Quirino e Soares (2013), Cavalcante e Camapum de Carvalho (2013), Cruz (2014), Diemer, Vargas e Angelim (2014), Azevedo e Rodrigues (2014), Marques, Rezende e Gitirana Jr. (2014), Alves *et al.* (2015) em solos tropicais, ainda restritas a instituições de pesquisas, têm obtido resultados promissores, pois, além da rapidez, leveza, facilidade de operação, menor dependência do operador nos resultados pela aquisição automática de dados, permite a determinação quase contínua da resistência à penetração (q_d) ao longo do perfil de sondagem.

Ensaio de densidade *in situ* pelos métodos do frasco de areia ou do cilindro de cravação, conjugados com ensaios de determinação do teor de umidade pelos métodos da frigideira ou do aparelho Speed, podem ser úteis para determinação do peso específico natural e seco do solo *in situ*. Esses resultados são utilizados de forma comparativa para a estimativa do comportamento do solo, uma vez que, via de regra, os solos menos densos possuem maior índice de vazios, maior permeabilidade, menor resistência, maior probabilidade de serem colapsíveis e potencialmente mais erodíveis. Quando há tempo para ensaios de laboratório, esses complementam conclusivamente os resultados de campo.

A permeabilidade do solo é um parâmetro geotécnico de grande interesse para o estudo da sua erodibilidade. Imagine o seguinte cenário: o processo de saturação de um solo natural não saturado. Inicialmente, o solo começa a receber umidade sobre sua superfície, por meio das gotas da chuva que causam a remoção de partículas; em seguida, de uma forma mais agressiva, também pelo fluxo superficial da água (enxurrada). Nesse momento, a formação de

lâmina d'água provoca uma frente de percolação de água na superfície, causada por pressão da coluna d'água e, para a água entrar nos poros do solo, é preciso que o ar contido nos poros escape para a atmosfera. Entretanto, com a grande extensão coberta pela lâmina d'água e a baixa motilidade do ar nos vazios do solo, é mais comum que o ar seja empurrado para baixo, tendo seu volume reduzido pela pressão exercida sobre ele, o que libera espaço para que a água se infiltre. Dessa forma, uma camada de ar comprimida bloqueia a percolação da água para a camada subjacente, fazendo com que a camada superficial com grau elevado de saturação tenha seu peso reduzido por empuxo, tornando-se mais leve e mais suscetível à perda de partículas do solo por carreamento hidráulico. O fluxo de água com a presença de partículas sólidas torna o processo de escavação (erosão) mais agressivo. A inundação da camada superior, que eleva seu grau de saturação e reduz a sucção, é outro fator que reduz a resistência do solo (perda de coesão). Esses dois processos ocorrem simultaneamente, facilitando o processo de erosão.

Nesse sentido, a determinação da permeabilidade do solo de interesse pode ser realizada por meio de ensaios de laboratório e de campo. O primor dos ensaios de laboratório elimina a interferência de outras variáveis mais comuns em campo. Entretanto, uma vantagem da realização do ensaio de permeabilidade *in situ* (Figura 11) ou ensaio de infiltração, como também pode ser chamado, está no fato de ele envolver um volume de solo maior do que em laboratório, podendo, assim, ser mais representativo.

O conceito básico do ensaio, realizado acima do lençol freático, seria a medição do volume de água infiltrada em função do tempo num furo cilíndrico de dimensões conhecidas. De acordo com Oliveira e Corrêa Filho (1996), entre os fatores condicionantes, a Equação (1) é válida para um regime de escoamento permanente. Dessa forma, por meio do controle *in situ* das medidas de vazão durante a realização do ensaio, é possível perceber quando as vazões se tornam constantes e, assim, perceber que foi atingido o regime de escoamento permanente. Os resultados do ensaio podem ser expressos por meio de um gráfico do volume acumulado ou da vazão *versus* o tempo, que permite a visualização da estabilização da vazão (trecho reto da curva). Essa vazão será utilizada para o cálculo da permeabilidade na Equação (1), proposta por Eletricité¹ (1970) apud Oliveira e Corrêa Filho (1996).



Figura 11. Ensaio de permeabilidade *in situ*. a) escavação de furo cilíndrico; b) ensaio de infiltração de água no furo em função do tempo. Foto: Maurício M. Sales (2012).

1 ELETRICITÉ De France. Essais d'eau sondage-milieu poreux. s.l. Direction de L'Equipe-ment-Division Géologie Geotechnique, 1970.

$$K_{in\ situ} = \frac{Q}{2\pi h D \sqrt{\frac{h}{D} + \frac{1}{4}}} \quad (1)$$

onde:

Q = vazão após estabilização;

h = altura de água no furo mantida constante (sendo $h \leq 2D$);

D = diâmetro do furo.

Os parâmetros geotécnicos do solo determinados pelos ensaios mencionados neste item ajudam na concepção do projeto de recuperação das áreas degradadas pelas erosões, bem como na escolha dos materiais de construção. Enfatiza-se que soluções inteligentes de engenharia são aquelas que envolvem baixo valor econômico, que aproveitam a própria força das águas da chuva como auxílio na correção do problema e que se integram harmoniosamente com a paisagem, com a natureza e com o homem.

3 Intervenções visando à prevenção contra processos erosivos

Diversas ações visando a prevenção contra processos erosivos podem ser desenvolvidas antes ou após a implantação do reservatório. Especialmente, tais intervenções podem ser divididas em três frentes:

a) Região da construção do barramento

Nos locais de construção de barramentos para a formação do reservatório, a abertura de caminhos de trabalho e exploração de jazidas são os maiores vetores de indução de processos erosivos. Em obras que passarão por mais de uma estação chuvosa, deve-se levar sempre em consideração a probabilidade de ocorrência de erosões. Para minimizar a chance do surgimento de processos erosivos, faz-se necessário controlar o fluxo superficial das águas pluviais e águas servidas. As ações listadas abaixo podem ser contempladas no planejamento da obra:

- Desmatar o mínimo possível e de forma programada: só retirar a cobertura vegetal quando a utilização da área for iminente, evitando-se a exposição de solo desprotegido por um tempo maior do que o necessário;
- Execução de caminhos de acesso com traçados compatíveis com a topografia: caminhos com longos trechos de descida seriam um ponto de acumulação de água, que desceria com vazão e energia cada vez maior. A execução de curvas suaves, a retirada da água para a lateral, a construção de bacias de infiltração e a implantação de lombadas suaves são algumas ações para controlar o fluxo de água por estas vias;
- Recuperação das áreas degradadas: após a conclusão da exploração das jazidas, da desmontagem do canteiro de obras e da utilização de vias provisórias, todas essas áreas devem ser recuperadas, de forma a evitar o surgimento de erosões no futuro;
- Planejamento das vias definitivas: os acessos que permanecerão devem ser executados, pensando-se no sistema apropriado de drenagem, incluindo o estudo das formas adequadas de lançamento.

b) Perímetro do lago

O perímetro do reservatório é delineado pela escolha da sua cota máxima de operação. Dessa forma, fica definida a faixa a ser afetada pelo enchimento do reservatório. Com o auxílio de estudo da susceptibilidade a processos erosivos e da instabilização de taludes, na escala compatível com o projeto, medidas preventivas devem ser tomadas. Plantio de vegetação, suavização de taludes, obras de proteção de bordas, etc., são algumas ações preventivas para minimizar a chance de instalação de erosões nesses locais.

c) Áreas de contribuição da bacia

Os estudos de susceptibilidade aos processos de erosão linear e laminares devem ser realizados na fase de planejamento do empreendimento, o que deve nortear o plano de prevenção a processos erosivos. Nessa etapa, o estudo de prevenção a erosões deve avaliar:

- Presença de estradas na bacia: o lançamento de águas pluviais de rodovias, pavimentadas ou não, é causa recorrente de erosões à jusante desses lançamentos e que irão culminar no aporte de sedimentos ao talvegue onde se formará o lago. Como, na grande maioria das vezes, essas estradas não pertencem ao proprietário do reservatório, a solução passa por uma parceria com o respectivo órgão em questão. A Figura 12 ilustra uma erosão provocada por uma rodovia estadual próxima ao barramento da UHE Furnas (MG). O lançamento inadequado das águas pluviais resultou numa voçoroca, cujos sedimentos continuam sendo carregados para o reservatório, criando-se a necessidade de uma ação mitigadora.
- Ausência de curvas de nível em pastagens e lavouras: as atividades agropecuárias na bacia do futuro reservatório devem ser estudadas. Fazendas que não utilizam medidas preventivas aos processos erosivos são responsáveis por um grande número de erosões que afetarão o reservatório. Com o enchimento do reservatório e a respectiva elevação do lençol freático, alguns processos erosivos já instalados poderão ter sua dinâmica acelerada. Para tanto, o cadastro de erosões prévias seria um documento de grande importância. A Figura 13 mostra uma erosão por consequência do escoamento concentrado de água pluvial em propriedade privada, culminando na evolução da erosão que deságua no reservatório da UHE Itumbiara (GO).



Figura 12. Lançamento de água pluvial de uma rodovia causando erosão próxima ao reservatório da UHE-Furnas(MG). Foto: Maurício Martines Sales (2013).

- Criação de gado nas margens dos reservatórios: entre todas as atividades agropecuárias, a criação de gado com acesso ao reservatório é a mais danosa. Os animais criam trilhas em direção ao lago, as quais passam a ser caminhos preferenciais de fluxo superficial, originando ravinas. As margens pisoteadas pelo gado também são locais de problemas contínuos de geração de sedimentos. Em alguns empreendimentos, o programa “Produtor de Água”, numa parceria entre governos federal, municipal e os proprietários do reservatório e da área rural, tem gerado bons resultados. A água do reservatório alimenta, por bombeamento, pontos de dessedentação dos animais, e o proprietário rural constrói e dá manutenção às cercas que impedem a descida dos animais às margens do lago;



Figura 13. Erosão provocada por pastagem sem curvas de nível nas bordas da UHE-Itumbiara (GO).
Foto: Maurício Martines Sales (2013).

- Uso compartilhado do reservatório: a construção de um novo reservatório gera um aumento de interesse e valorização das áreas lindeiras. Novas atividades passam a ser desenvolvidas no entorno do reservatório. Quando se é permitido o uso múltiplo, a convivência de diferentes usos pode implicar vetores geradores de processos erosivos. O lazer é um dos “vilões” entre essas atividades. Se a ocupação das áreas das margens não for acompanhada de um planejamento de engenharia, estradas de acesso e novas casas irão provocar desmatamentos e aumento considerável do fluxo superficial das águas pluviais, que culminarão em novos processos erosivos. A Figura 2, mostrada anteriormente, ilustra o problema descrito. A mitigação desse problema é complexa e certamente deveria passar pela aproximação do proprietário do reservatório, dos órgãos ambientais responsáveis pelo licenciamento e dos municípios envolvidos, a fim de controlarem a aprovação de novos loteamentos e condomínios dentro da bacia do reservatório.

Resumindo, todas as ações de prevenção envolvem diversos atores do problema: empreendedor, população local e órgãos governamentais. Dessa forma, ações de Educação Ambiental devem ser desenvolvidas para conscientizar a todos sobre a importância da preservação da quantidade e qualidade da água do reservatório, bem como da conservação dos solos próximos a ele. Tais ações devem perdurar por médio e longo prazos, e o envolvimento das escolas (em todos os níveis) é um fator fundamental para a difusão dos conhecimentos de preservação. Camapum de Carvalho et al. (2016) e Ribeiro et al. (2016) apresentaram car-

tilha específica sobre o tema para o público técnico e infantil, respectivamente (Figura 14). Materiais assim e outros podem ser utilizados em discussões em escolas, assentamentos ou associações de moradores, para trocas de experiências com os ocupantes e beneficiários da bacia. Esses participantes passam a ser multiplicadores do conceito de preservar o entorno do reservatório contra processos erosivos.



Figura 14. Material didático sobre o tema “Erosão em Borda de Reservatórios”.

4 Ações de controle e recuperação de erosões

Uma vez instalado um processo erosivo, deve-se diagnosticar as causas que o geraram, o que culminará num prognóstico de evolução, caso nenhuma ação seja tomada. Isso irá balizar as ações de controle ou de recuperação do referido processo erosivo.

Salomão e Rocha (1989) e Souza et al. (2006) são alguns dos trabalhos que apresentam sugestões sobre metodologias de cadastramento de erosões, com a finalidade do diagnóstico desses eventos.

Quando as erosões se originam de fatores externos aos reservatórios, ou seja, foram oriundas da ocupação inadequada das áreas da bacia, próximas às margens, as ações de recuperação assemelham-se às ações utilizadas em erosões urbanas. Esse tema já foi bastante abordado por diversos autores. Fendrich et al. (1988) e Sales et al. (2006) descrevem vários métodos de recuperação de erosões de todos os portes. Furnas (2006) e Rodrigues et al. (2007) apresentam um importante trabalho de recuperação de uma erosão de grande porte (600m de voçoroca e área das intervenções de 150 ha), nas proximidades do reservatório da UHE Itumbiara (GO), onde foi executada uma grande variedade de intervenções para controlar o fluxo de águas pluviais que chegava à área da erosão, bem como internamente, na voçoroca, por meio da suavização e proteção dos taludes, construção de dreno de fundo, diques de contenção e revegetação. A Figura 15 apresenta uma vista da obra – realizada na UHE Itumbiara (GO) – sete anos após a sua conclusão.

Com a presença do reservatório cheio, outras formas de processos erosivos e de movimentos de massas podem surgir, como discutido no início deste capítulo. De uma forma geral, nesse caso, as ações poderiam ser divididas em três grupos:

- Estabilização de taludes;
- Proteção das margens;
- Introdução de elementos de contenção de ondas.

a) Estabilização de taludes

Quando a presença do novo reservatório está provocando a instabilidade de alguns taludes ao longo do seu perímetro, a estabilização de tais taludes deve ser estudada. A primeira hipótese considerada é sempre a possibilidade de suavização acompanhada de revegetação. A Figura 16 ilustra um talude sendo suavizado e preparado para plantio de duas espécies de capins.



Figura 15. Vista da erosão-1 recuperada próximo ao reservatório da UHE-Itumbiara (GO). Foto: Maurício Martines Sales (2013).



Figura 16. Suavização de talude na borda do reservatório da UHE-Furnas (MG). Foto: Maurício Martines Sales (2013).

Entretanto, um estudo geotécnico mais detalhado deve ser feito em casos específicos. Vale lembrar que os solos desses taludes estarão sujeitos a um novo equilíbrio de umidade com o enchimento do reservatório e, para alguns solos, isso pode ser suficiente para desagregar suas partículas, o que resultaria na ruptura progressiva do pé do talude, mesmo a baixos ângulos de inclinação. Nesta situação particular, estruturas de contenções ou injeção de caldas com aglomerantes devem ser estudadas.

b) Proteção das margens

Em reservatórios pequenos (lagos artificiais), é possível se pensar em proteção de toda a margem contra efeito das marolas, tocas de peixes, etc. Já para grandes reservatórios, a técnica de proteção das margens surge como alternativa apenas para recuperações pontuais de erosões instaladas. Nesse item, não estão mencionadas as soluções para conter elevadas ener-

gias de ondas, em que as soluções exigem maior inércia ou peso próprio. Diferentes técnicas podem ser empregadas, mas todas devem contemplar o fato de que o nível d'água irá oscilar. Portanto, o sistema de proteção deve conviver com a presença em cota variável do nível d'água e a infiltração e retorno de água do reservatório para o solo. Assim, sempre devem ser atendidas as condições de filtro nesses sistemas.

Vale citar as seguintes alternativas:

- Pedras lançadas (*rip-rap*);
- Elementos pré-moldados de concreto;
- Gabiões ou Colchão-reno;
- Paliçadas;
- Bolsacreto ou bolsas de solo-cimento;
- Crib-wall;
- Geomantas ou geocélulas;
- Reforço de solo superficial com cal;
- etc.

Em várias dessas alternativas, é recomendável o emprego de revegetação, para reintegrar o trecho recuperado à paisagem natural, deixando-a mais duradoura. A Figura 17 ilustra um trecho de proteção de borda no reservatório da UHE-Furnas (MG) com o emprego de geomanta e dos capins Vetiver e Elefante.



(a) Aplicação da geomanta

(b) situação 2 anos depois

Figura 17. Proteção da margem com uso de geomanta e plantio de capins na UHE-Furnas(MG). Foto: Maurício Martines Sales (2013, 2015).

c) Contenção de ondas

Para os casos de erosões provocados por impacto de ondas, o problema torna-se mais complicado devido à grande energia transferida pelo agente causador. As ondas resultam de um processo de transmissão de energia, mas sem movimentação de massa. As ondas formadas em lagos possuem características distintas de ondas marinhas em todos os seus aspectos: amplitude, comprimento, frequência e velocidade. O estudo das ondas existentes em um reservatório é apresentado de forma detalhada em outro capítulo deste livro.

Azevedo e Franco (2010) e Azevedo e Duarte (2013) apresentaram um extenso relato de obras empregadas, em várias partes do mundo, para o combate de erosões provocadas por efeito de ondas, bem como um interessante estudo realizado no IPT, para avaliar a eficiência de novas alternativas empregadas no controle das erosões na UHE-Sérgio Motta (SP).

Para fazer frente à energia das ondas, são empregadas estruturas submersas para reduzir a energia de chegada da onda (espigões, bolsas preenchidas com areia, etc.), bem como estruturas de contenções para suportar o impacto das ondas nas bordas. Para esse último caso, existe uma diversidade enorme de materiais empregados e formas na construção de contenções (estacas, pedra, concreto pré-moldado, madeira, pneus, geossintéticos, etc.), cuja resistência e inércia devem ser compatíveis com a energia das ondas existentes. Observa-se que os melhores resultados são das estruturas que possuem certa flexibilidade e que contemplam a condição de filtro para a entrada e saída de água do maciço da borda. Com a dificuldade inerente ao tema, a previsão de eventos extremos não é tarefa fácil. Portanto, seja qual for a estrutura escolhida para a contenção das bordas, ela deverá ser monitorada nos primeiros anos e, se necessário, medidas corretivas devem ser tomadas antes da perda total da solução empregada.

5 Aplicação de geossintéticos em recuperação e prevenção de erosões

De acordo com a Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*), na norma ISO 10318-1:2015, os geossintéticos são “produtos com ao menos um de seus componentes feito de polímero sintético ou natural, em forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, usados em contato com solo e/ou outros materiais em aplicações geotécnicas e de engenharia civil”. Os geossintéticos são produtos que desempenham uma ou mais funções, entre as quais, destacam-se: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial.

Em decorrência da grande versatilidade dos geossintéticos, a sua aplicação pode ser considerada nos diversos tipos de obras empregadas para a prevenção, controle e correção de processos erosivos, seja como elemento principal constituinte da obra ou como elemento capaz de conferir melhor desempenho a ela.

Segundo Carroll *et al.* (1992), o primeiro uso de geossintéticos no controle de erosão ocorreu no final da década de 1960 e início da década de 1970, quando pesquisas realizadas em universidades mostraram que alguns materiais têxteis sintéticos poderiam ser utilizados para substituir filtros granulares (de areia). A primeira aplicação de geotêxtil para a prevenção de erosão foi realizada com a instalação desses materiais, abaixo de uma camada de enrocamento. Quando selecionados por critérios apropriados e instalados adequadamente, os geotêxteis abaixo de enrocamento provaram ser pelo menos tão efetivos quanto os filtros granulares (CARROLL *et al.* 1992).

A prevenção de processos erosivos consiste basicamente em implantar sistemas de proteção de áreas (terrenos ou taludes) suscetíveis à erosão e/ou em disciplinar o fluxo de água – por meio de sistema de drenagem – com potencial erosivo no terreno. Segundo Marques e Geroto (2015), a prevenção dos processos erosivos é sempre recomendada, uma vez que as dificuldades e custos normalmente envolvidos para o combate e correção dos problemas deles decorrentes são superiores.

Já o controle e a correção dos processos erosivos exigem a adoção de medidas mais complexas do ponto de vista de engenharia e, conseqüentemente, mais onerosas. Tais medidas devem considerar, além dos aspectos relacionados com as cargas decorrentes de solicitações envolvidas (massas de terra, variação do nível d'água, etc.), os fatores relacionados com: i) o regime de precipitação e o escoamento de água superficial; ii) a erodibilidade do solo; iii) a topografia do terreno ou talude e iv) o uso e manejo do solo.

c) Uso de geossintéticos em medidas de proteção

As medidas de proteção consideram a implantação de elementos capazes de atuar como uma barreira contra o destacamento ou desagregação das partículas de solo, provocados pelo impacto das gotas de água da chuva, e contra o arrancamento por arraste, provocado pela tensão cisalhante hidráulica decorrente do escoamento de água superficial.

Usualmente, as medidas de proteção contemplam a fixação de vegetação na superfície do terreno ou talude. Nessa ação, o uso de geomantas e geocompostos pode atuar como barreira e como material de suporte e fixação da vegetação. Nesse caso, em obras com caráter temporário, a escolha do geossintético mais adequado é feita em função da inclinação do terreno ou talude. Recomenda-se que geomantas (fibras naturais) de baixa resistência à tração sejam utilizadas para baixas inclinações ($i < 20^\circ$) e geocompostos (constituídos de fibras naturais e sintéticas) de alta resistência à tração sejam empregados para inclinações mais acentuadas ($i > 30^\circ$). A especificidade de cada obra pode exigir a aplicação de geocompostos – geossintéticos formados da união de dois ou mais tipos de geossintéticos (geomantas, georedes, geogrelhas, etc.). A Figura 18 apresenta imagens de geomantas (fibras naturais), geocompostos (fibras naturais e sintéticas) – empregados em medidas de proteção contra processos erosivos – e de geogrelha de alta resistência.

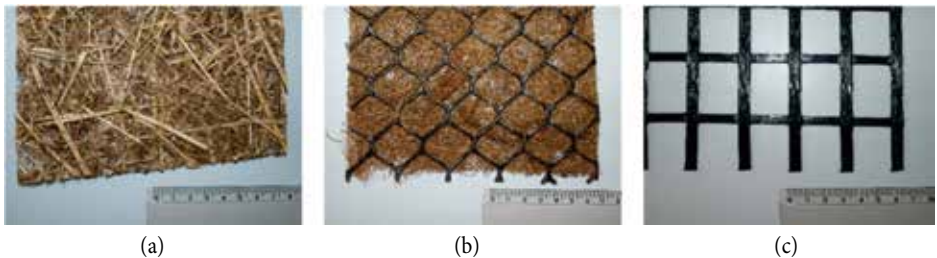


Figura 18. Geossintéticos empregados em medidas de proteção contra processos erosivos: (a) geomanta (fibra natural); (b) geocomposto (fibras natural e sintética); e (c) geogrelha (fibra sintética). Foto: Eder C. G. Santos (2016).

No caso da proteção das margens de reservatórios, quando a medida de proteção contempla o uso de pedra lançada (rip-rap) ou colchão-reno, o uso geossintético é feito com o objetivo de contar com a sua função de separação e filtração. Dessa forma, geotêxteis não tecidos são instalados na superfície do terreno, de forma que não haja fuga (do material fino) e cravamento (do material grosso). Outra alternativa que considera o uso de geotêxteis não tecidos com a função de separação e filtração consiste no uso desses elementos abaixo de geocélulas preenchidas como brita. A Figura 19 mostra imagens de geotêxtil não tecido e de geocélula normalmente utilizados em obras de proteção contra processos de erosão.

b) Uso de geossintéticos em medidas de controle e recuperação

Uma vez que o processo de erosão esteja instalado, o emprego de geossintéticos em medidas de controle e recuperação se dá por meio da associação desses materiais com ações usualmente empregadas na regularização do terreno e/ou por meio do seu uso em obras de caráter permanente. Nesses casos, o emprego de geossintéticos pode estar associado à vegetação ou a materiais inertes. Outra forma de emprego desses materiais consiste na confecção de barreiras de contenção de sedimentos.

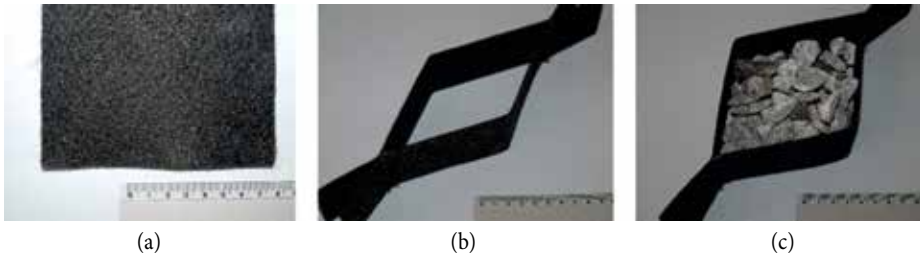


Figura 19. Geossintéticos empregados em medidas de proteção contra processos erosivos: (a) geotêxtil não tecido (fibra sintética); (b) geocélula; e (c) geocélula preenchida com brita. Foto: Eder C. G. Santos (2016).

Os geossintéticos utilizados em associação à vegetação são constituídos de materiais sintéticos, com o objetivo de reforçar a vegetação, conferindo um suporte para a sua fixação. Entre os geossintéticos aplicados com essa função, podem ser citados: geomantas (fibras sintéticas), geotêxteis e geocélulas preenchidas com solo (MARQUES e GEROTO, 2015). A avaliação da sollicitação mecânica à qual os geossintéticos estarão submetidos deve ser feita, uma vez que as geomantas, por apresentarem menores resistências à tração, podem ser associadas a uma geogrelha – formando um geocomposto – ou tela metálica e, assim, obter uma maior resistência para o conjunto. As geogrelhas podem ainda ser aplicadas no talude como reforço da camada de solo vegetal sobrejacente. A Figura 20 apresenta exemplos de geomantas (fibras sintéticas) e geogrelha.

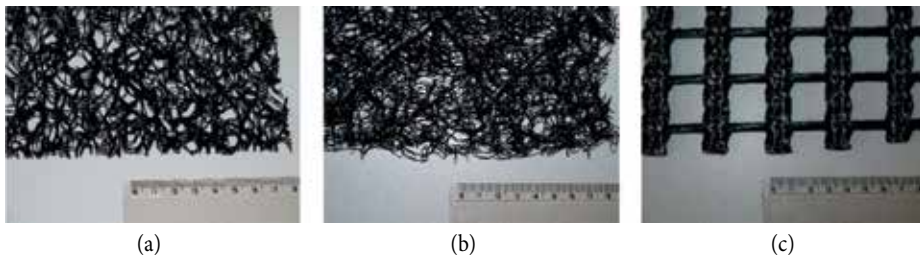


Figura 20. Geossintéticos empregados em medidas de proteção contra processos erosivos: (a) geomanta (fibra sintética); (b) geomanta (fibra sintética) reforçada com tela (metálica); e (c) geogrelha (fibra sintética) usada como elemento de reforço em taludes. Foto: Eder C. G. Santos (2016).

O emprego de geossintéticos associados a materiais inertes (brita, argamassa ou concreto) é realizado por meio do uso de geocélulas (preenchidas com tais materiais) ou de geotêxteis em forma de colchões ou bolsas. Devido às sollicitações existentes em tais aplicações e ao seu caráter permanente, os geossintéticos, nesses casos, devem apresentar elevada resistência contra os esforços mecânicos de tração e punção e contra a degradação, sem, contudo, perderem as suas propriedades hidráulicas de permissividade (permitir o fluxo de água numa direção normal ao plano do geossintético) e de contenção de finos.

Em muitos casos, a contenção de sedimentos se faz necessária para o controle e recuperação de processo erosivo e sempre que há a necessidade de proteger terrenos e obras à jusante. As barreiras podem ser constituídas pela aplicação de geossintéticos em formatos planares ou tridimensionais. No caso do emprego de geossintéticos em formatos planares, a barreira é constituída por geotêxteis tecidos ou não tecidos de fibras sintéticas, dispostos

no terreno por meio da sua fixação em estacas cravadas no terreno. A aplicação de geossintéticos em arranjos tridimensionais é realizada pela disposição de elementos cilíndricos de geotêxteis – tubos geotêxteis – (tecidos ou não tecidos) ou geofornas preenchidas com solo e dispostas na superfície do terreno em uma orientação ortogonal ao sentido do fluxo de água superficial. A Figura 21 apresenta a instalação de um geotêxtil não tecido em uma barreira de contenção planar.



Figura 21. Instalação de geotêxtil não tecido em barreira de contenção planar (Foto: FARIAS, 2005).

6 Comentários finais

Os processos erosivos em bordas de reservatórios são recorrentes, uma vez que o reservatório ocupa a região mais baixa da bacia, para onde migram as águas de chuva. A presença dos reservatórios induz uma grande ocupação das áreas lindeiras a eles, o que representa um fato produtor de novas erosões. Este capítulo abordou formas de prevenção e recuperação de erosões instaladas. As erosões podem ser divididas por diferentes causas e localidades: algumas se instalam em terra nas proximidades das bordas e outras são consequências do contato da linha d'água e ventos com estas mesmas bordas.

Alguns conceitos necessitam ser revistos, como o que prega que todo sedimento que chega aos reservatórios irá se depositar na região do volume morto e, portanto, afetaria pouco a vida útil dos reservatórios. Vários exemplos, como ilustrado pelas Figuras 2 e 5, mostram que um grande volume de sedimentos será depositado próximo às margens, reduzindo assim diretamente o volume útil daquele reservatório.

Para combater o problema, os autores acreditam que a técnica deve se aliar à educação ambiental, para que toda a comunidade envolvida passe a colaborar rumo à redução dos processos erosivos, antes que soluções muito onerosas sejam necessárias.

Referências

ALVES, D.H. C., SILVA, A. P. da. **Penetrômetro PANDA - Uma nova alternativa de investigação para fundações rasas de Goiânia**. 90p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2009.

ALVES, T. C.; LARA, J. A. M.; PARRODE, F. R.; ANGELIM, R. R.; SALES, M. M. **Estudo da Influência da Sucção nos Resultados dos Ensaios In Situ Realizados com Penetrômetro Leve de Energia Variável PANDA 2 em Solos Tropicais.** In: Congresso de Solos Não-Saturados, Fortaleza, 2015

ANGELIM, R.R. **Desempenho de Ensaios Pressiométricos em Aterros Compactados de Barragens de Terra na Estimativa de Parâmetros Geotécnicos.** 291p. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2011.

AZEVEDO, A.A.; DUARTE, H. Estudo de alternativas de proteção para o controle de erosão nas margens do reservatório da UHE Eng. Sérgio Motta, Porto Primavera. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, **Anais...**, Rio de Janeiro, 2013. 11p.

AZEVEDO, A.A.; FRANCO, N. Erosões em margens de reservatórios. In: **VII SIMPÓSIO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.** Palestra Convidada, CBDB, São Paulo, 2010.

AZEVEDO, F. H. B.; RODRIGUES, I. R. de S. **Estudo Comparativo entre os Ensaios SPT e Panda 2 em Solos Tropicais.** Trabalho Conclusão do Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2014.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; FERNANDES, A. J. C.; OLIVEIRA, J. C. de; GOURVÈS, R. P. H., REZENDE, L. R. de. **Avaliação do Pressiômetro Pencil e do Penetrômetro Panda para Uso em Pavimentação.** In: 37ª Reunião Anual de Pavimentação / 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (37ª RAPv / 11º ENACOR). Goiânia, 2006.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LELIS, A.C.; SALES, M. M.; MASCARENHA, M. M. A.; ANGELIM, R. R.; LUZ, M. P. **Cartilha erosão em borda de reservatório,** Série GECON UFG, v. 1, 2016. 56p.

CARROLL, R. G.; RODENCAL, J.; COLLIN, J. G. **Geosynthetics in erosion control - the principles.** Geotextiles and Geomembranes. International Geotextile Society, vol. 11 (4-6), pp. 523-534. 1992.

COUSINEAU, C. **The use of Panda test in tropical soils and in weathered soils near points of initiation to erosion.** (Uso do Panda nos solos tropicais e solos alterados próximos à erosões). Polytech' Clermont-Ferrand (ex - CUST)- Civil Engineering Department - Report for Engineer Degree Graduating, 2012

CRUZ Jr., A. J.; GITIRANA Jr., G. F. N.; SALES, M. M.; VIANA, P. M. F. **Determinação do Perfil de Sucções a Partir de Amostras de SPT, e Verificação de Correlações entre Sucção, NSPT, e PANDA para Solos Argilosos Superficiais da Cidade de Goiânia.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Goiânia, 2014.

DIEMER, F.; VARGAS, C. A. L.; ANGELIM, R. R. **Comparação do número Nd (qd/σ_v0) dinâmico com o ângulo de atrito de um solo compactado.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Goiânia, 2014.

FARIAS, R. J. C. **Utilização de geossintéticos em sistemas de controle de erosões**. 2005. 188 p. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-026/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental -- Universidade de Brasília. Brasília - DF. 2005.

FERREIRA, I.P., QUIRINO, R. e SOARES, T.M. **Estudo Comparativo entre os Ensaios SPT e PANDA 2 em Aterros Compactados de Barragem de Terra**. 76p, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2013.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. Recuperação de erosão na margem direita – ações implementadas para recuperação da erosão 1. **Relatório técnico**. Ibiraci/MG, 2006. 35p.

MARQUES, A.C.M.; GEROTO, R.E. Aplicações em controle e erosão superficial. In: VERTE-MATTI, José Carlos (coord.). **Manual brasileiro de geossintéticos**, 2. ed.. São Paulo: Blucher, 2015.

MARQUES, M de O.; REZENDE, L. R. de; GITIRANA Jr., G. de F. N. Análise comparativa entre resultados do Dynamic Cone Penetrometer (DCP) e do Penetrometre Autonome Numérique Dynamique Assisté par Ordinateur (PANDA) em trechos de pavimentos experimentais. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Goiânia, 2014.

NASCIMENTO, D.T.F.; ROMÃO, P.A.; SALES, M.M.; VARGAS, C.A.L.; AMARAL, C.S. Mapeamento da suscetibilidade e potencialidade a processos erosivos laminares e lineares ao longo do duto OSBRA da Petrobras. **Revista geociências**. São Paulo. 2016.

NASCIMENTO, D.T.F.; ROMÃO, P.A.; SILVA, S.B.; SALES, M.M.; VARGAS, C.A.L.; LUZ, M.P. Emprego do google earth no cadastramento de processos erosivos lineares e laminares. In: XV ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA, 2015, Havana, Cuba. **Anais ... v. 1. p. 1-12**. 2015.

OLIVEIRA, A. M. S; CORRÊA FILHO, Diogo. **Ensaio de Permeabilidade em Solos – Orientações para sua execução**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), Boletim nº 04 (3ª Edição Revisada), São Paulo, 1996.

RIBEIRO, P.A.; CRUZ, J.S.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; MASCARENHA, M.M.A.; LUZ, M.P.; ANGELIM, R.R. **Cartilha meio ambiente: erosão em borda de reservatório**, Série GECON UFG, v. 2. 2016. 36p.

RODRIGUES, A.A.; RIBEIRO, C.H.D.; CORRÊA, W.S.; RAMIDAN, M.A.S. Recuperação ambiental de áreas sob a influência de erosões de grande porte. In: **XXVII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**. Comitê Brasileiro de Barragens, Belém. 2007.

SALOMÃO, M.M.; ROCHA, G.A. **Controle de erosão**: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de voçorocas urbanas. São Paulo, DAEE/IPT, 1989.

SOUZA, N.M.; MARTINS, E.O.; SALES, M.M.; NASCIMENTO, M.A.L.S.; OLIVEIRA, M.F.M. Cadastro de erosões. In: CAMAPUM DE CARVALHO et al. (editores). **Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro**. Brasília: Editora Finatec, 2006. 464 p.

CAPÍTULO 22

Infiltração de águas pluviais para o controle de erosão e assoreamento de reservatórios de hidrelétricas

Eufrosina Terezinha Leão Carvalho
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
Arlam Carneiro Silva Júnior
Sofia Leão Carvalho
Karlla Kristina Silva Cavalcante

Palavras chaves: Precipitação. Infiltração. Sistemas de infiltração. Erosão. Assoreamento.

1 Introdução

O escoamento superficial nas áreas contíguas aos reservatórios, formados para a geração de energia nas hidrelétricas, pode provocar erosão das margens desses reservatórios, com acúmulo de sedimentos nos lagos, reduzindo o seu volume útil e pode prejudicar o desempenho do sistema elétrico. As regiões do entorno desses reservatórios frequentemente contam com áreas rurais de pastagem, vegetadas ou de agricultura, todas sob variados tipos de topografia. Existem também situações em que o entorno dos reservatórios apresenta ocupação urbana já que a presença desses lagos é um atrativo para o lazer. A ocupação do solo nessas áreas, muitas vezes é implementada sem um planejamento adequado que avalie todos os riscos da presença urbanística próxima aos reservatórios. Outro importante fator que contribui para o escoamento superficial é a elevação do nível do lençol freático em regiões próximas às bordas do reservatório. Com a elevação do lençol, tem-se uma redução na capacidade de armazenamento de água do perfil de solo e conseqüente diminuição da infiltração. Assim, tem-se a soma de escoamento superficial com características rural e urbana no entorno dos reservatórios, associada a uma elevação do nível do lençol, criando a necessidade de entender o cenário antes de propor soluções para o gerenciamento e controle do escoamento superficial para os dois casos.

O gerenciamento e manejo das águas pluviais representa um aspecto importante no controle dos escoamentos superficiais. Toda forma potencial de prevenção de enchentes e erosões numa localidade deve ser explorada. Para tanto, podem ser utilizados diferentes métodos disponíveis de controle das águas pluviais, geralmente, conjugando a reservação e a infiltração. Em contraste aos métodos convencionais que coletam e conduzem a água com descarga em cursos d'água à jusante, produzindo volumes de água consideráveis, a técnica da reservação e da infiltração de água de chuva permite minimizar esses problemas, reduzindo o escoamento superficial além de restaurar o ciclo hidrológico natural, melhorando o suplemento de água no subsolo da região. Entre as vantagens da infiltração da água de chuva pode-se citar: recarga

da água subterrânea, preservação e/ou valorização da vegetação natural, redução da poluição transportada para os corpos hídricos receptores, redução dos picos à jusante, redução de galerias e de custo de implantação dos sistemas de drenagem.

Nesse capítulo serão apresentados alguns princípios básicos e essenciais para projetos de gerenciamento de água de chuva, por meio de reservação e infiltração, que podem minimizar as erosões desenvolvidas nas margens dos cursos d'água e reservatórios, entre outros. Algumas técnicas do uso de infiltração serão apresentadas, destacando os estudos necessários que antecedem o projeto, tais como tamanho da área de drenagem, volume de aporte considerando o tempo de retorno e tempo de duração da precipitação, nível do lençol freático e os parâmetros geotécnicos como perfil de permeabilidade e infiltração em relação ao solo envolvido no processo, ensaios de caracterização do material e perfil de umidade e outras condições específicas relacionadas à estabilidade do perfil do solo se julgado necessário. Muitas dessas técnicas, já utilizadas em regiões áridas e semiáridas do planeta, são apropriadas para uma grande parte das regiões de solos intemperizados no Brasil. Além disso, será mostrado como a água de chuva pode ser reservada e utilizada para fins domésticos e aplicação na agricultura ou áreas vegetadas.

2 O papel da infiltração de água no controle de erosão

Para se compreender o papel da infiltração de água no controle da erosão superficial é essencial considerar o ciclo hidrológico. Para descrever o ciclo hidrológico básico de uma superfície foi tomada uma área não urbanizada, onde se considerou também o relevo e a presença de um corpo hídrico, como mostra a Figura 1. Na figura pode ser observado o ciclo hidrológico, onde estão identificadas a precipitação, a presença de pequenas depressões que possibilitam a infiltração de água no solo, e um curso d'água principal que recebe a contribuição de uma nascente próxima. No interior do maciço observa-se o movimento da água infiltrada que abastece o lençol freático, e os caminhos curvos (linhas de fluxo) que levam a água a emergir no curso d'água mais próximo.

Gribbin (2014) descreve que a natureza é uma grande recicladora e a água é um importante exemplo disso. A água que escoar superficialmente vem em grande parte do oceano e a ele retorna, em um constante ciclo chamado ciclo hidrológico. No balanço do ciclo hidrológico, o escoamento superficial ou deflúvio corresponde à parcela da água precipitada que permanece na superfície do terreno e que escoar superficialmente pode iniciar processo erosivos ao longo do percurso. Regiões em cotas mais baixas são geralmente mais atingidas, na medida em que são regiões com maior área de contribuição, com volumes de escoamento proporcionalmente maiores. A força erosiva, obviamente, pode se tornar maior dependendo da combinação de volume escoado e declividade do terreno. Bordas de reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos frequentemente são sujeitas à tais condições desfavoráveis.

Os diversos componentes do ciclo hidrológico, dentre os quais figura o escoamento superficial, são bem conhecidos pelo homem, há muitas décadas. Fitts (1953), por exemplo, descreve que o escoamento superficial depende das características hidráulicas dos solos e das rochas, da cobertura vegetal e das estruturas biológicas, assim como da forma da bacia de dre-

nagem, da declividade de sua superfície e do teor de umidade do solo. Nas regiões ocupadas pelo homem, deve-se ainda considerar as diversas formas de uso do solo que intensificam ou atenuam o escoamento superficial.

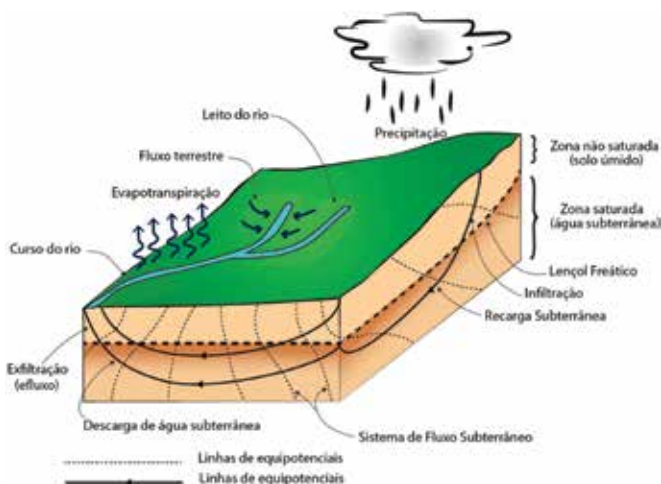


Figura 1. Ciclo hidrológico básico de área não urbanizada. (modificado de Freeze e Cherry, 1979).

O conhecimento do escoamento superficial e seu comportamento é um parâmetro importante para o dimensionamento de obras hidráulicas como as barragens para fins de abastecimento, geração de energia elétrica, irrigação, controle de cheias, navegação, lazer e também para retenções que antecedem a infiltração da água no solo.

Outra parcela importante do ciclo hidrológico é a infiltração, que é definida como a passagem de água da superfície para o interior do maciço de solo. A entrada da água no solo por infiltração, se dá naturalmente pela superfície do terreno na interface solo e atmosfera. Depois dessa transposição o processo segue com a denominação de percolação da água no maciço. O processo de infiltração depende da disponibilidade de água, da natureza do terreno, do estado da superfície drenante, da cobertura vegetal e do teor de umidade (ABGE, 1998). Vários fatores são necessários para que a água de superfície se infiltre no solo. O processo de infiltração é favorecido pela existência de solos (ou rochas) porosos e permeáveis e topografia plana (Fitts, 1953). Diversos modelos de comportamento utilizados na reprodução do processo de infiltração podem ser encontrados na literatura, sendo aqueles baseados na análise da equação de Richards considerados relativamente rigorosos. Uma implementação numérica de tal abordagem, considerando condições atmosféricas e diversas variáveis do ciclo hidrológico pode ser encontrada em Silva Jr. (2015).

ABGE (1998) define que a capacidade de infiltração de um solo é dada como sendo a taxa máxima pela qual a água pode ser absorvida pelo solo. Os solos mais permeáveis apresentam maior capacidade de infiltração, favorecendo a rápida percolação da água para o lençol subterrâneo e reduzindo o escoamento superficial direto. No entanto, outros fatores devem ser considerados, como a estratigrafia, anisotropia do solo e o grau de saturação inicial antes do evento de precipitação. A capacidade de infiltração, em última instância, é o resultado de uma complexa combinação de fatores e características dos materiais geotécnicos.

À medida que as superfícies se tornam mais impermeáveis, a parcela da infiltração fica cada vez mais comprometida e os volumes não infiltrados são transferidos para o escoamento superficial, podendo comprometer a estrutura superficial do solo com contínua perda de partículas, partículas que sedimentam nos cursos d'água como rios, lagos entre outros. A falta do gerenciamento adequado para o escoamento superficial dá início ao processo erosivo superficial, podendo evoluir para grandes erosões e intensos assoreamentos dos cursos d'água, lagos e reservatórios, receptores dos sedimentos produzidos. Esse tipo de problema tem atingido também os reservatórios das usinas hidrelétricas e tem preocupado os técnicos quanto ao bom desempenho dos lagos em todas as regiões do Brasil. O processo de infiltração, ao reduzir os volumes de escoamento superficial, influencia beneficiando as características dos cursos d'água à jusante, promovendo a manutenção do volume do reservatório.

A compreensão do processo de infiltração da água no solo vem desde 1930, com as primeiras observações feitas por Horton. Em suas análises, Horton observou atentamente os mecanismos de movimento da água da superfície para dentro do maciço de solo. A infiltração da água, sendo um fenômeno de superfície, conta sempre com o empoçamento da água seguido de sua penetração para o interior do solo. O movimento de entrada da água no solo envolve também o deslocamento de ar, em um processo de fluxo acoplado das duas fases fluidas, água e ar. A dinâmica desse processo conta com a irregularidade da superfície do solo, como depressões, presença de macroporosidade provocada pelas raízes das plantas e fauna terrestre e, também, com o movimento do ar, vapor d'água no solo que saem do mesmo enquanto a água entra. O processo de infiltração pode ocorrer no terreno natural através da formação de empoçamento ou pode ser facilitado por estruturas que promovam a reservação, para posterior infiltração de água no perfil de solo.

A preservação ou a restituição da capacidade de infiltração de um local contribui sensivelmente para a manutenção do ciclo hidrológico. No ciclo hidrológico, a infiltração é a uma das parcelas mais sensíveis e mais comprometidas pelas ações humanas em uma região. O processo de infiltração pode ainda ser fortemente influenciado no meio rural pelas atividades rurais, como a formação de pastagem e agricultura quando não planejados para não agredir o balanço do ciclo hidrológico natural. No meio urbano tem-se a impermeabilização generalizada das superfícies (pavimentos de rolagem, calçadas, edificações) como importante fator. Assim, o uso de técnicas que possam gerenciar o escoamento superficial ou que crie meios artificiais para infiltrar a água no solo tem sido utilizado, restituindo a capacidade inicial do solo de infiltrar água, como ocorria na sua condição natural. A correta aplicação desses métodos tem sido um desafio para os profissionais que estudam o assunto.

Mesmo em condições naturais da superfície do solo pode ocorrer, devido as intempéries, alguns riscos de erosões em determinadas regiões, menos estáveis ou de topografia acentuada. No entanto, diante da intervenção humana para satisfazer suas necessidades, seja urbanizando ou na prática da agricultura ou formação de pastagem, frequentemente, ocorre a impermeabilização da superfície por obras e pavimentação no caso da urbanização, ou por pisoteio de animais nas pastagens e/ou o selamento das superfícies descobertas quando há a redução das superfícies de infiltração e, assim, o ciclo hidrológico inicial sofre modificações importantes. Essas modificações podem impactar a capacidade de infiltração do solo em até 90% se comparado com sua capacidade de infiltração inicial, antes da intervenção humana. Em situações especiais para áreas altamente adensadas e/ou impermeabi-

lizadas a capacidade de infiltração no solo poderá ficar reduzida a 0% ou muito próximo disso em determinadas áreas.

Novas tecnologias têm sido adotadas na implementação de sistemas de infiltração de água de chuva, baseadas em duas premissas: a) a determinação da demanda do sistema e b) a quantificação do processo de infiltração. A demanda do sistema é tradicional objeto de estudo da hidrologia. Nesse caso, deve-se conhecer o volume de aporte que incide na área levando em conta o tempo de retorno e a duração da chuva, possibilitando a realização de projetos viáveis e econômicos. No segundo caso, em termos de características físicas associadas com o processo de infiltração, é de suma importância entender a dinâmica da água no solo, associada às particularidades do perfil, sejam elas características dos materiais (textura, grau de intemperismo, entre outros), sejam variáveis de estado ou sazonais, como presença de raízes e/ou canalículos provocados pela fauna terrestre. Outro parâmetro importante para a integridade do solo utilizado para infiltração é a qualidade da água infiltrada; no caso de águas poluídas pode haver a alteração na microestrutura do perfil de solo, como ocorre com a infiltração de esgoto sanitário.

Para um controle satisfatório de águas pluviais, independentemente do que exige a legislação, é recomendável como complemento para a proteção dos reservatórios das hidrelétricas, algum sistema de controle de águas pluviais por reservação, com reaproveitamento ou não e, sistemas de infiltração, isso evitará o escoamento superficial e o carreamento de partículas que tem como consequência o assoreamento dos reservatórios das hidrelétricas que atualmente já apresenta em estágio importante de perda de sua capacidade inicial.

Esses sistemas podem ser instalados nas faixas do terreno próximo às margens dos reservatórios ou em áreas públicas dos centros urbanizados próximos (ruas, canteiros centrais de avenidas, praças, pátios, estacionamentos, entre outros) e em obras privadas das regiões urbanizadas à beira desses lagos. Em todos os casos deve-se preocupar em manter afastamentos adequados das estruturas existentes ou outras condições especiais onde a infiltração pode interferir indesejavelmente no meio. Também deve ser implementada uma política de conservação dos reservatórios, de forma que toda intervenção que possa ocorrer na área de influência desses reservatórios ocorra de forma bem planejada com vistas a evitar erosões e depósito de sedimentos nos lagos.

3 Sistemas mais utilizados para o controle das água pluviais

Muitos parâmetros devem ser observados na implementação de sistemas de infiltração, tais como não exceder a 3,0 m de profundidade. No intemperismo dos solos brasileiros essa profundidade forma a zona ativa do solo, zona que passa pelo processo contínuo de encharcamento e secagem dependendo da estação seca ou chuvosa do ano. Para todas as alternativas de sistema de infiltração há necessidade de investigação geotécnica para determinar apropriadamente os parâmetros de projeto local.

Em seu trabalho, Leão Carvalho (2008) relaciona vários sistemas utilizados para o controle da água de chuva, como os poços, trincheiras, bacias de retenção e detenção, valas ou valos. Todos estes podem atuar como elementos de infiltração, reservatório de amortecimento ou sistemas associados, conforme será descrito a seguir.

3.1 Poços de infiltração

Os poços de infiltração são sistemas cilíndricos cuja profundidade máxima adotada depende do perfil de solo e do nível do lençol freático, recomenda-se que sua profundidade não seja superior à profundidade da zona ativa do intemperismo do solo. Os poços são estruturas pontuais que utilizam áreas relativamente pequenas de implantação e dão liberdade para aproveitar a profundidade máxima que conserva a estruturação do perfil não devendo ultrapassar 2 ou 3 m de profundidade. Para situações especiais, a execução de poços de infiltração mais profundos requer estudos mais detalhados e distância adequada do lençol freático, de acordo com a legislação. Os poços devem ser escavados com afastamento seguro entre eles e entre um poço e as estruturas de obras civis vizinhas, principalmente arrimos e fundações, levando em conta as condições de fuste e de base das fundações, a área de influência da infiltração, e também o nível do lençol freático na sua condição mais elevada da estação chuvosa.

Os poços permitem o armazenamento de um importante volume de água e oferece boas condições de infiltração devido à carga hidráulica atuante, principalmente quando o poço está cheio. Portanto, os poços de infiltração desempenham um papel simultâneo na reservação e na infiltração de água.

Os poços de infiltração devem ser revestidos com manta geotêxtil em toda a sua geometria (parede e fundo do poço). Esta tem a função de filtro nos dois sentidos do fluxo, devendo ser colocada entre o solo e o revestimento de sustentação das paredes do poço. Entre os materiais de revestimento, os mais utilizados são os tubos de concreto pré-moldados, considerados o revestimento mais adequado para obras de maior porte. A construção de poços com este tipo de acabamento facilita a mecanização, tanto na escavação como na colocação do revestimento. Outros revestimentos podem ser utilizados, como o revestimento com tijolos assentados em crivo ou mesmo o uso de pneus descartados. Estes últimos são indicados para utilização em lotes com construções de poucos poços, pois facilitam a execução e a técnica é de domínio popular. Os poços podem ainda ser completamente preenchidos com materiais reciclados ou material britado, lembrando que nesse caso há a perda de aproximadamente 70% de sua capacidade de reservação. Atualmente já existem no mercado de materiais reciclados manufaturados de elevada capacidade de armazenamento e drenagem com vazios superiores a 97% do poço, confeccionados com material de polipropileno, não nocivo ao meio ambiente, de alta resistência mecânica e aos ataques químicos do solo. De acordo com os fabricantes, esses produtos podem ser oferecidos em padrões de capacidade de carga diferentes ou sob encomenda para a carga necessária do projeto.

Para situação simples, numa residência, por exemplo, um único poço pode ser necessário e suficiente para infiltrar o volume de água oriundo das precipitações que incidem sobre o lote, considerando a área impermeabilizada e o excedente da infiltração nas áreas preservadas ou vegetadas. A quantidade necessária e dimensão dos poços sempre depende, obviamente, da capacidade de infiltração do solo local.

A Figura 2 apresenta um sistema simples de infiltração previsto para um lote; nesse caso os fluxos excedentes são encaminhados para a via ou rede pública, por gravidade, utilizando um coletor ligado ao sistema convencional de drenagem. Nesse caso, é necessária apenas a inclusão de uma caixa de pré-tratamento com coleta dos resíduos sólidos. Com o intuito de

facilitar a manutenção dos poços deve ser colocada uma camada de material granular no fundo do poço (aproximadamente 30 cm de material granular), que deve ser substituído de tempo em tempos.

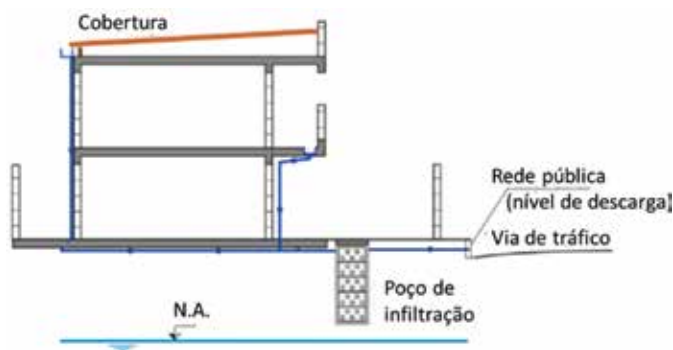


Figura 2. Modelo de poço de infiltração instalado em unidade habitacional.

3.2 Trincheiras de infiltração

Uma trincheira de infiltração tem tipicamente profundidade adequada de maneira a garantir uma distância segura do lençol freático, atendendo a legislação e garantia na estabilidade da escavação. Assim como no caso dos poços, esta nunca deverá ter profundidade superior a zona ativa de intemperismo do solo. Uma trincheira funciona como um reservatório subterrâneo linear que infiltra água a partir de sua base e até à meia altura da parede vertical. A trincheira deve ser envelopada com manta geotêxtil como pode ser observado na Figura 4. Para o bom funcionamento da trincheira ela deve ser construída com a base nivelada evitando escoamento ao longo de sua direção longitudinal, conforme ilustrado na Fig. 4. Para tal, sempre que preciso busca-se uma nova profundidade, obedecendo as cotas máximas e mínimas do projeto. Estas estruturas geralmente são projetadas sobre o traçado no perfil das ruas e avenidas envolvidas ou em obediência à inclinação do terreno para zonas não urbanizadas. As trincheiras podem ser projetadas para infiltrar pequenos volumes de chuva como relativas a um telhado, situação na qual se confundem com um poço de infiltração ou, para uma sequência de superfícies adjacentes, como ocorre ao longo de uma via, podendo reservar e infiltrar grandes volumes e também atingir comprimentos relativos ao longo dessas vias. Para facilidade de execução a largura da trincheira deve coincidir com a largura da lâmina de corte das máquinas de escavação. Para as trincheiras de grandes comprimentos os fluxos são encaminhados a elas por meio de bocas-de-lobo com saída d'água no topo da boca-de-lobo ou outro mecanismo estabelecido que garanta o envio da água para o interior da trincheira.

As trincheiras devem ser dotadas de sistemas de pré-tratamento com a finalidade de remover sedimentos e óleos, principalmente, esse pré-tratamento pode ocorrer na própria boca-de-lobo, se viável.

A Figura 3 mostra uma seção longitudinal e transversal de uma trincheira construída ao longo de uma via e tem a profundidade adaptada com a inclinação do terreno, mantendo sempre a base nivelada no fundo da escavação.

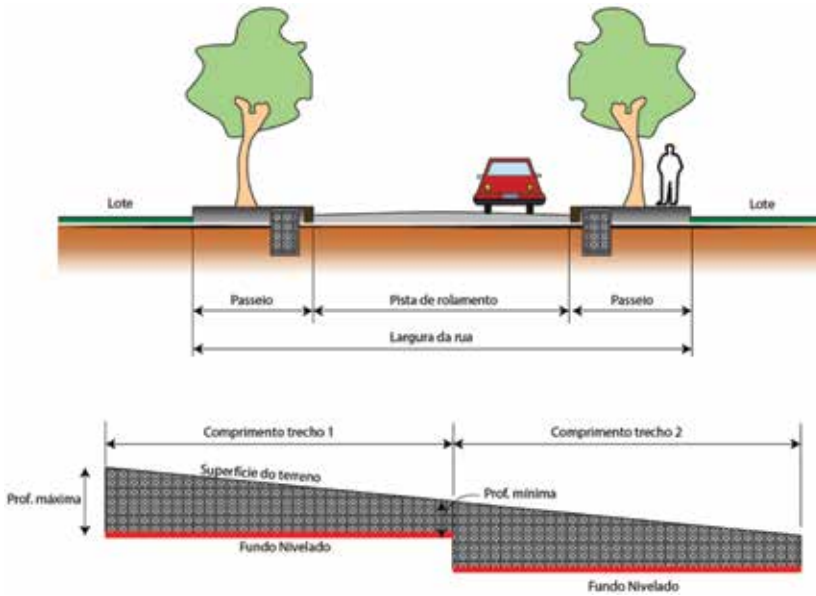


Figura 3. Vista de uma seção transversal e longitudinal de projeto de trincheira.

Na sequência de fotografias da Figura 4 são apresentados o passo-a-passo de quatro etapas da construção de trincheiras utilizando a mecanização do serviço. Tem-se como principais etapas, a escavação, a instalação de manta geotêxtil para filtro, o preenchimento, o envelopamento e, finalmente, a ligação da trincheira aos elementos de coleta da água de superfície, como as bocas-de-lobo.



Figura 4. Detalhe das etapas de construção de trincheiras: (a) escavação da vala, (b) colocação de manta para proteger o material drenante da trincheira, (c) preenchimento da trincheira com material poroso e em (d) envelopamento da trincheira pronta.

Principalmente para os sistemas de poço e trincheira de infiltração apresentados, é recomendável a pré-filtragem da água de modo a evitar a colmatação do material de enchimento do poço ou da trincheira e promover um maior espaçamento entre o período de limpeza do sistema.

3.3 *Bacia de retenção e bacias de detenção*

Bacias de detenção ou amortecimento podem também ser dimensionadas para funcionar como elemento de infiltração. São estruturas que podem ter as funções de reter sem infiltrar, servindo apenas como amortecedoras de fluxos pluviais, ou reter e infiltrar, como ocorre com os poços de infiltração. Pode ser utilizada apenas as vazões de pico ou ser equipadas com elementos de saída que irão determinar o tempo de detenção do volume de chuva na bacia. As bacias de detenção, na estação seca, podem ter outros destinos, como área de lazer para a comunidade, exemplo das bacias instaladas em cidades do estado de São Paulo, os chamados “piscinões”, cujos detalhes esquemáticos são apresentados na Figura 5.



Figura 5. a) Vista panorâmica de uma bacia de detenção; b) Configuração típica de uma bacia de detenção (Leão Carvalho, 2008, modificado de RICHMAN et. al. 1999).

A Figura 6 (a) mostra uma bacia de retenção ou espelhos d’água, estrutura muito semelhante às bacias de detenção. O fator que difere tais estruturas é o fato da a bacia de retenção ser impermeabilizada, impedindo a infiltração. Por isso, trata-se de um dispositivo que favorece a evapotranspiração e abriga a fauna e a flora aquáticas. Pode possuir dispositivo de fuga para pequenas vazões para manter o nível satisfatório do reservatório como apresenta a Figura 6 (b). As bacias de retenção podem funcionar como detenção durante as chuvas e liberar lentamente os fluxos de água em momentos posterior às enchentes. O tratamento ocorre por sedimentação e por processos biológicos. As bacias de retenção possuem uma boa capacidade de remoção de poluentes como: sedimentos, lixo, nutrientes, bactérias, óleos e graxas e substâncias orgânicas. Acima do nível permanente para o controle de poluentes,

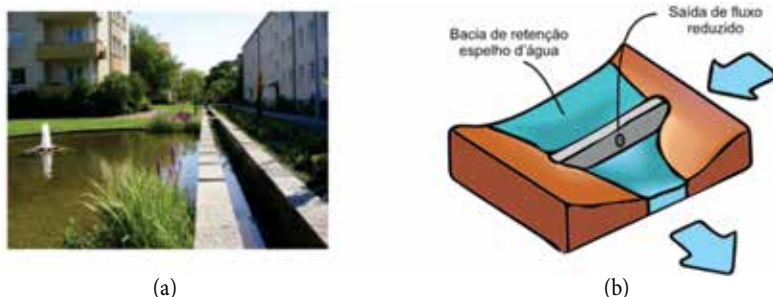


Figura 6. a) Espelho d’água geralmente impermeabilizado; b) Modelo esquemático de espelho d’água (Leão Carvalho, 2008, modificado de RICHMAN et. al. 1999).

a bacia possui tempo de retorno de 2 anos e quando utilizada para controle de alagamentos possui período de retorno variável podendo variar entre 5 e 100 anos dependendo da regulamentação municipal.

3.4 Valos ou valas de infiltração

Com pequena profundidade, as valas ou valos de infiltração são estruturas abertas e construídas geralmente ao longo de áreas impermeabilizadas, como estradas e estacionamentos; essas estruturas são um importante instrumento para a drenagem de água ao longo de uma rodovia construída em região plana ou pantanosa. Com a instalação desses valos, de forma linear, pode-se evitar a necessidade de elevar o leito da estrada com espessas camadas de aterro numa sensível economia para implantação da via, principalmente se a locação da área de empréstimo coincidir com o projeto dos valos, porque a escavação poderá ser feita em função da geometria da futura estrutura de retenção e drenagem. Os valos de infiltração podem ser associados com planos de infiltração e podem ser também chamados biofiltros, quando são vegetados, conforme (a) da Figura 7; (b) vista panorâmica de valos de infiltração; e, (c) configuração típica de um valo de infiltração vegetado. Como mostra a Figura 7 (c) os valos ou valas tanto podem tanto infiltrar como promover escoamento ao longo da vala ou valo.

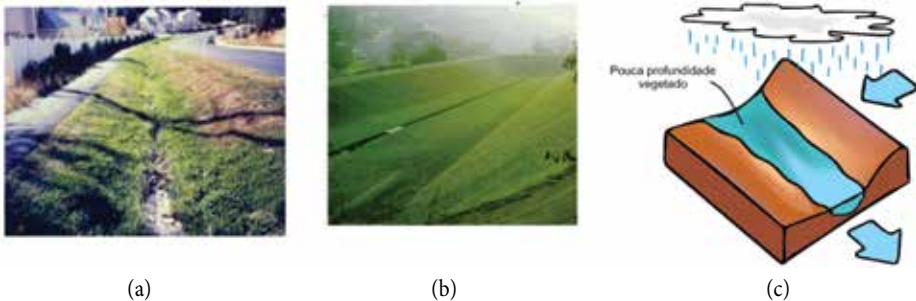


Figura 7. Em a) e b) vista panorâmica de valos de infiltração; c) Configuração típica de um valo de infiltração (Leão Carvalho, 2008, modificado de RICHMAN et. al 1999).

3.5 Reservatórios de amortecimento

Tratam-se de reservatórios de armazenamento temporários, muito utilizados para amortecimento de cheias. Esses reservatórios têm capacidade de armazenagem rápida nos picos das enchentes e depois, lentamente, vão deixando escapar a água armazenada para o próprio curso d'água. Os reservatórios de amortecimento podem ser instalados na linha de fluxo ou fora dela; são os chamados reservatórios online e offline, respectivamente como mostra a Figura 8 (a) e (b). Esses modelos de reservatórios podem ser úteis ao retardamento da chegada da água aos reservatórios ao serem instalados em cursos d'água tributários dos cursos d'água ou mesmo próximos aos reservatórios das hidrelétricas. Podem também ser conjugados com outros sistemas de infiltração ou retenção de água e fazer a retenção de sedimentos.

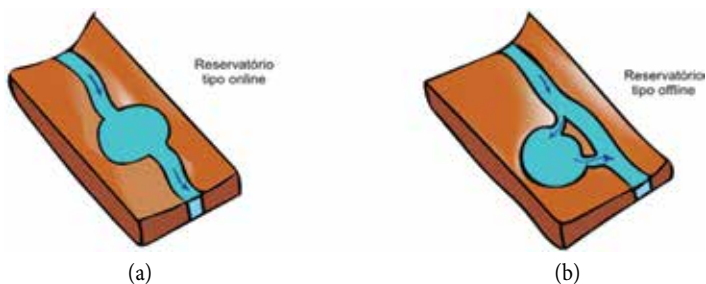


Figura 8. Modelo esquemático de reservatórios: a) tipo online e, b) tipo off-line (Leão Carvalho, 2008).

3.6 Estruturas associadas

A maioria dos sistemas de retenção e infiltração podem ser instalados de forma associada, como mostra o croqui da Figura 9, composto por uma bateria de poços de infiltração interligados com trincheiras para infiltrar águas de chuva, coletadas do telhado e das superfícies impermeabilizadas de edificações isoladas ou contíguas.

De acordo com esse sistema, os fluxos coletados dos telhados e pavimentos são encaminhados para uma série de poços interligados por trincheiras, todos infiltrantes. É importante observar que as águas mais suscetíveis à contaminação, como água de lavagem de piso de garagem, devem ser encaminhadas para um poço de água servida, que será bombeada para fora dos limites da edificação e não infiltrada no solo. O mesmo cuidado deverá ser dispensado aos demais fluxos das áreas impermeabilizadas, como pátios e sacadas. Se esses fluxos forem considerados pelo projetista como de alto risco para a contaminação do solo e do lençol freático, também devem ser direcionados para um poço de água servida ou deve ser adotado algum pré-tratamento antes de ser encaminhados ao sistema de infiltração.

Em um sistema de poços e trincheiras, a trincheira é composta por material drenante que, ao mesmo tempo, faz a adução dos fluxos de um poço para o outro e promove a infiltração no solo. A combinação de sistemas retenção e infiltração pode ser com estruturas variadas de forma que os fluxos encaminhados ao corpo d'água da jusante ficam bastante reduzidos e o abastecimento do lençol freático fica garantido. A Figura 9 apresenta um sistema esquemático de projeto adotando essa concepção, que pode reduzir consideravelmente o volume de

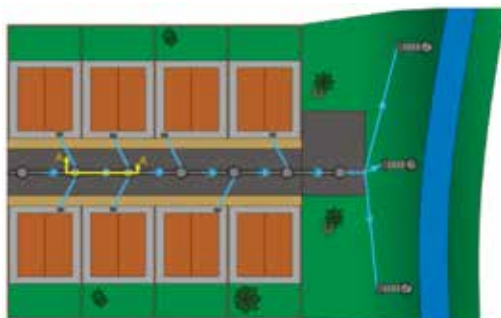


Figura 9. Layout de um sistema de infiltração composto por poços e trincheiras instalados em condomínio horizontal, Leão Carvalho (2013).

lançamento à jusante. A Figura 10 mostra o corte AA; esse corte detalha o sistema integrado de poços e trincheiras de infiltração. Alguns cuidados devem ser tomados para que não haja interferência da água nos pavimentos, seja por acumulação ou ascensão capilar.

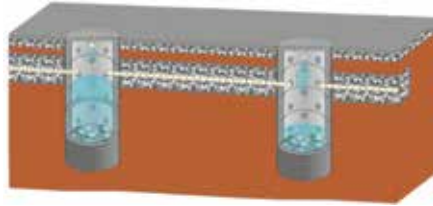


Figura 10. Corte AA com detalhe de poços e trincheiras, Leão Carvalho (2013).

Para o meio rural há registro de práticas simples de retenção de água de chuva com reaproveitamento em áreas plantadas ou simplesmente para manter um volume retido até que as chuvas de maiores picos cessem. Esses sistemas de retenção com infiltração podem ser construídos por pequenas barragens perpendiculares ao fluxo ou podem ainda ser redirecionados por divisão e subdivisão do fluxo, pela redução da velocidade de escoamento ou por encaminhamento para pontos adequados que possam satisfazer algum serviço implantado ou por simplesmente reduzir o volume de escoamento da água. Além disso todos os outros sistemas de retenção e infiltração citados anteriormente podem ser convenientes para uma determinada região.

Meinzinger (2006) descreve, em perfil topográfico do solo, alguns sistemas simples para a retenção de água das regiões áridas e semiáridas da Tunísia. Esses sistemas são utilizados no meio rural para o reaproveitamento da água de chuva em áreas de plantio ou mesmo para o redirecionamento do escoamento superficial para outras áreas de interesse. Os sistemas fazem a retenção e a infiltração de água na vegetação por meio dos terraplenos para reter água ou para encaminhar a água para a vegetação natural ou para áreas de plantio. Esses sistemas podem ser utilizados simplesmente para a retenção temporária e infiltração no solo.

Para identificar os perfis do solo e os sistemas viáveis para o controle de águas pluviais, Meinzinger (2006) descreve primeiro a condição do escoamento superficial do perfil considerando a impermeabilização gerada pela construção e como os fluxos naturalmente são encaminhados para o cursos d'água à jusante, situações idênticas às condições dos reservatórios das hidrelétricas como mostra a Figura 11.

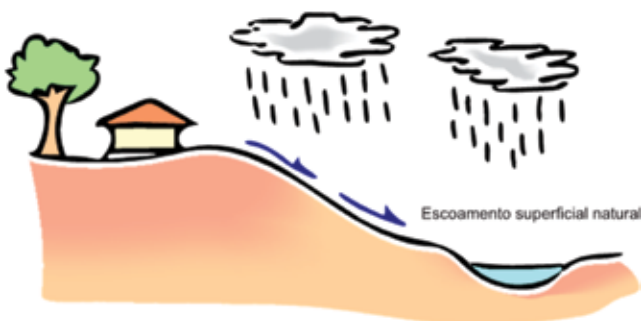


Figura 11. Escoamento superficial para o terreno natural.

Um dos processos mais simples e eficientes de controle rural da infiltração é o encaminha-mento da água para a região de plantio fazendo a contenção da água por meio de terraple- nos. Os caminhos criados para os fluxos podem ser divididos ou subdivididos de acordo com as necessidades e o melhor aproveitamento da água disponível do escoamento superficial, nesse caso a infiltração é facilitada pela presença das raízes das plantas, os detalhes desse mo- delo é apresentado na Figura 12.

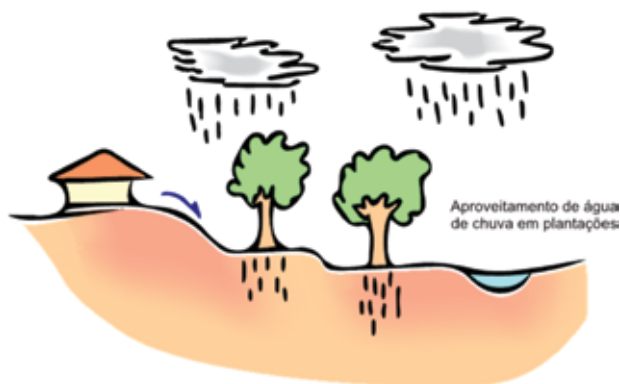


Figura 12. Controle do escoamento superficial em áreas vegetadas por meio de terraplenos com direciona-mento da água para as áreas vegetadas.

A interceptação dos fluxos por meio de um reservatório de retenção também pode ser um modelo adaptável a uma condição de escoamento superficial que pode influenciar nega- tivamente em um reservatório para produção de energia. Esses reservatórios são indicados para locais onde a infiltração não seja possível e podem ser instalados ao longo do escoamento superficial podendo estar mais próximo ou mais distante do reservatório das hidrelétricas. Detalhe desse sistema é apresentado na Figura 13.

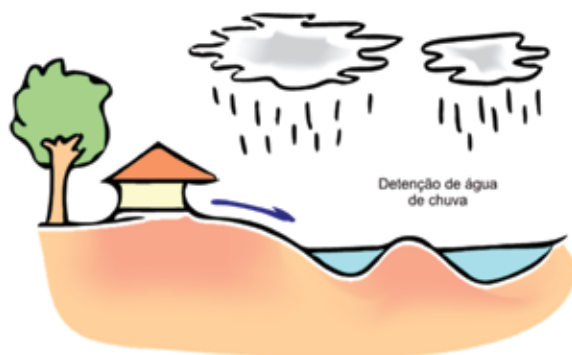


Figura 13. Sistemas de retenção de água de chuva para retardar os picos de cheias e reter sedimentos, geral- mente acompanham as curvas de níveis do terreno.

Os sistemas de controle com infiltração são os sistemas mais apropriados para o con- trole de águas pluviais pois esses tanto reservam como infiltram a água protegendo os ma- nanciais e promovendo a recarga hidráulica. A Figura 14 apresenta dois sistemas de reten-

ção e infiltração construídos ao longo do plano inclinado que pode conter à jusante um reservatório de hidrelétrica. Nessa figura há uma bacia de retenção e uma trincheira, ambas com infiltração.



Figura 14. Sistemas de retenção com infiltração de água de chuva.

3.7 Remoção de poluentes

De modo geral, embora não existam muitos estudos para identificar e mensurar a capacidade de remoção de poluente pelo solo envolvido na infiltração, por qualquer um dos sistemas de infiltração, sabe-se que solos com algum grau de argila ou húmus tornam-se poderosos filtros que protegem os aquíferos de contaminação (Meinzing, 2010).

O *Urban Best Management Practices for Nonpoint Source Pollution* (1999) em português “Melhores práticas de gestão urbana para poluição difusa”, descreve que embora muitos estudos ainda não tenham sido realizados, as trincheiras de infiltração possuem um grande potencial para remoção de poluentes difusos através de seus mecanismos de absorção, esforços pela movimentação dos fluxos no interior da trincheira, decomposição microbióticas, retenção de partículas e as filtrações pelos gramados que geralmente dão acabamento superficial às trincheiras. Dentre os poluentes, estima-se que há uma redução de até 90% de metais, matéria orgânica e coliformes fecais. Em relação aos nitratos e fósforo a remoção é de 60%.

Para o bom desempenho de remoção de poluentes pelas trincheiras, relaciona-se como fatores positivos o processo de lavagem dos agregados que preenchem a trincheira pela circulação da água do escoamento superficial, a retenção de sedimentos, a remoção de matéria orgânica pelo teor de argila no subsolo de infiltração, captura de uma grande fração do volume de escoamento superficial anual e os pré-tratamentos de sedimentos, óleos e graxas. Os sistemas de pré-tratamento físico geralmente fazem parte do projeto da trincheira.

Entre os fatores negativos para a remoção de poluentes pode-se citar a presença de solos arenosos no maciço de infiltração que não tem poder de reter o poluente, a colmatagem da trincheira, elevação do nível do lençol freático na trincheira e os longos períodos sem chuva.

4. Controle de erosão próximo aos reservatórios

Assim como os sistemas de infiltração são utilizados para o controle de escoamento superficial para áreas antropizadas urbanas também poderão ser utilizados para o controle das águas superficiais que ocorrem naturalmente ou por intervenção, e são direcionadas para os reservatórios das hidrelétricas.

Qualquer sistema que intercepta o fluxo e o conduz a um sistema de reservação e/ou infiltração pode ser utilizado para o controle do escoamento superficial no entorno desses reservatórios, evitando erosões de superfície e assoreamento dos lagos.

5. Parâmetros de dimensionamento para os sistemas de infiltração

No dimensionamento de projetos para o controle do escoamento superficial por infiltração são considerados vários parâmetros, tais como:

- a) volume de aporte obtido pelo tempo de retorno e duração da chuva;
- b) avaliação da permeabilidade e infiltração da água no solo obtido de ensaio de infiltração em campo;
- c) ensaios de amostras do solo em laboratório como os ensaios de granulometria comparando o grau de desagregação das partículas defloculadas com o ensaio do solo no seu estado natural;

Além desses fatores, deve-se determinar a distância segura entre o do nível do lençol freático na sua condição mais desfavorável, estação das chuvas e o fundo dos sistemas de infiltração. Alguns municípios regulamentam esse afastamento, geralmente acima de 1,0 m do nível d'água máximo e o fundo dos sistemas de infiltração. No entanto, o mais indicado é um estudo prévio por parte do engenheiro geotécnico, para determinar a profundidade segura para a infiltração e não contaminação do lençol freático.

5.1 Volume de aporte

O coeficiente de escoamento superficial é um dos parâmetros importantes no dimensionamento dos sistemas para controle do escoamento superficial e é dado em função das características da bacia, podendo ser tão elevado para uma região variando entre terrenos natural e ondulado, terreno natural e montanhoso e região impermeável cujo valor varia entre 50 a 95%, respectivamente. Para as áreas de declividade moderada e com boa cobertura natural ou cultivada, o coeficiente de escoamento superficial pode ser mínimo, variando entre 10 a 40%. Além da escolha do parâmetro de escoamento superficial adequado deve ser considerado o tamanho da área de captação para o dimensionamento dos projetos de água pluviais tanto para os sistemas convencionais como para os sistemas de reservação com infiltração.

A intensidade e a frequência da chuva são dados, pelo tempo de retorno e período de duração da chuva geralmente normatizados para variados tipos de projetos. A formulação da Equação 1, a seguir, avalia a vazão de projeto e é dada em função coeficiente de escoamento,

intensidade pluviométrica para o período de retorno e tempo de duração da chuva, escolhidos para cada projeto de acordo com a norma:

$$Q = C I_T A \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão de projeto (l/min);

C = coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

I_T = intensidade pluviométrica (mm/h), para um tempo de retorno T e um tempo de duração da chuva t;

A = tamanho da área de captação (m^2).

Atualmente, a intensidade de chuva adotada para avaliar o volume de aporte de um local é obtida por meio das equações de chuva criadas para atender cada região. Para o estado de Goiás, por exemplo, são utilizadas as equações de chuva proposta por Costa e Prado (2003) aplicadas também para Sul do Tocantins e Alto Garças no Mato Grosso. Costa e Prado (2003) propôs a Equação 2, válida para as condições de tempo de retorno que varia entre 1 ano a 8 anos inclusive, e a Equação 3, válida para tempos de retorno superior a 8 anos, até 100 anos.

$$I(mm / dia) = \frac{B_1 T^{\alpha + \frac{\beta}{T^\gamma}}}{(t + c)^b} \quad (2)$$

$$I(mm / dia) = \frac{B_2 T^\alpha}{(t + c)^b} \quad (3)$$

Em ambas T representa o tempo de retorno, t é o tempo de duração das chuvas e os parâmetros B_1 , B_2 , β , γ , b e c são constantes.

Os valores constantes são tabelados de acordo com os parâmetros locais de 126 localidades em municípios dos estados estudados. Como exemplo do cálculo da intensidade de chuva para Goiânia-GO para uma chuva de 5 minutos de duração, tem-se:

- Coordenadas geográficas: latitude – 16° 40' e longitude 49° 16';
- Parâmetros locais: $b = 0,974711$; $B_1 = 56,7928$; $c = 24,8$; $B_2 = 64,3044$;
- Os parâmetros α , β , γ e δ são regionais constantes aplicadas a toda a região e que dependem do período de retorno: $\alpha = 0,14710$; $\beta = 0,22$; $\gamma = 0,09$ e $\delta = 0,62740$.

Costa e Prado (2003) recomendam que para redes de drenagem urbana o período de retorno pode variar entre $T = 2$ anos para bairros com baixa densidade populacional e de 15 a 20 anos para regiões centrais da cidade. O tempo de retorno de 2 anos, também pode ser considerado para as áreas de entorno dos reservatórios das hidrelétricas no caso de áreas rurais e nos centros urbanos de baixa densidade.

5.2 Taxa de infiltração

O uso de sistemas de infiltração representa uma oportunidade atrativa para contribuir com a recarga subterrânea e minimizar interferência no ciclo natural da água. A infiltração de

água de chuva retorna os fluxos da superfície ao maciço do solo, reduz os picos de enchentes além disso uma porção importante de poluição que são geralmente direcionadas para os cursos d'água à jusante pode ser removida por processo de tratamento secundário.

A taxa de infiltração da água no solo pode ser obtida por meios de ensaios de infiltração em campo, tendo o ensaio do poço infiltração como o que melhor avalia a infiltração de um perfil de solo. Esse ensaio considera o volume infiltrado por unidade de área disponível para infiltração em um dado período de tempo. O parâmetro que mais influencia a infiltração é a carga hidráulica e apresenta alta no início do processo e vai diminuindo até um valor desprezível.

A medida de variação da água no poço pode ser avaliada ao longo de todo o poço, possibilitando a geração de uma curva de infiltração cujo valor médio é utilizado para o dimensionamento das estruturas de infiltração. A Equação 4 calcula a taxa de infiltração em cada ponto no poço de infiltração.

$$I_e = \frac{V}{A \Delta t} \quad (4)$$

Onde:

I_e = taxa de infiltração da estrutura, igual ao volume de água que transpõe a superfície de infiltração por unidade de tempo ($l/m^2 s$);

A = área considerada para a infiltração (m^2);

Δt = variação de tempo para ocorrer a infiltração (segundos).

5.3 Ensaios de laboratório

Os principais ensaios de laboratório utilizados para avaliar o perfil de solo são os ensaios de granulometria floculado e defloculado e o perfil de umidade do solo ou outros que possam ser necessários dependendo das condições de cada local. Embora o ensaio de infiltração seja o mais indicado para avaliar a capacidade de infiltração do terreno, em alguns casos podem ser recomendados ensaios de permeabilidade de carga constante e carga variável em laboratório.

5.4 Nível do lençol freático

O nível do lençol freático deve ser avaliado considerando a estação mais desfavorável que é a estação de chuva. Em Goiânia isso ocorre no mês de abril, podendo variar de local para local. Sua identificação pode ser feita por meio de furos de sondagem ou por escavação até atingir o lençol freático.

5.5 Interpretação dos resultados

De posse de todos os dados dos ensaios de campo e laboratório é possível identificar o perfil de solo e entender melhor o comportamento, a dinâmica da água no solo e o com-

portamento de infiltração ou até mesmo identificar quais os riscos envolvidos no processo de infiltração para aquele local. Pode ainda identificar a necessidade de outros ensaios para avaliar outros parâmetros que identifique colapso ou outro comportamento importante do solo para o projeto.

5.6 Dimensionamento dos sistemas de infiltração

O dimensionamento dos sistemas de infiltração baseia-se na geometria do sistema e no balanço entre o volume de aporte da área considerada menos a capacidade de infiltração do solo dado em volume e menos a capacidade de reserva do sistema proposto, considerando os coeficientes de segurança utilizados na engenharia, geralmente aplicado à taxa de infiltração do sistema e gira em torno de 2 a 3. Como resumido na Equação 5:

$$V_{\text{controlado}} = V_{\text{aporte}} - (V_{\text{reservado}} + V_{\text{infiltrado}}) \quad (5)$$

Onde:

$V_{\text{controlado}}$ = volume controlado pelo sistema de infiltração;

V_{aporte} = volume de aporte da área considerada;

$V_{\text{reservado}}$ = volume reservado no sistema de infiltração

$V_{\text{infiltrado}}$ = volume infiltrado pelo sistema.

O sistema de retenção e infiltração será tão mais eficiente quanto menor for o $V_{\text{controlado}}$, volume controlado. O volume de reserva e a capacidade de infiltração do solo envolvido dependem da área disponível para implantação do sistema e profundidade adequada com distância mínima do nível do lençol freático, adequada para garantir a infiltração e evitar contaminação direta do lençol e a capacidade de infiltrar água do solo. Alguns municípios possuem suas legislações próprias que estabelecem profundidades mínimas para os sistemas de infiltração.

6 Considerações finais

Estudos mostram que o uso da infiltração para o controle do escoamento superficial é viável mesmo no caso dos solos que apresentem menores taxas de infiltração. Para os solos com menores taxas de infiltração o próprio volume da estrutura de infiltração pode sobrepor a capacidade de infiltração e ser suficiente para reservar um volume considerável de água promovendo o equilíbrio proposto na Equação 5, apresentada anteriormente. Desta forma à medida que os solos apresentam maior capacidade de infiltração menos necessário são os volumes de reserva na estrutura.

Numa visão global que envolvem os reservatórios da hidrelétricas e áreas que o circundam vários tipos de sistemas de reserva e infiltração podem ser utilizados, individualmente, ou conjugados para realizar controle satisfatório dos escoamentos superficial das áreas de entorno desses reservatórios, minimizando os danos causados pelo escoamento superficial que geram erosões e acúmulos de sedimentos nos mesmos.

Uma análise detalhada deve ser feita nas vertentes dos reservatórios, preferencialmente até o divisor de água da bacia com a finalidade de observar todos os fluxos com potencial de desequilíbrio das vertentes, propondo uma correção o mais abrangente possível. Nas vertentes devem ser observados as áreas urbanizadas, estradas, acessos, áreas agricultáveis entre outras.

Dentre os sistemas para o controle de águas superficiais também foram apresentados sistemas bem simplificados que podem ser implementados a baixo custo como o terracamento em curvas de nível para retenção da água ou o encaminhamento adequado para o uso em áreas vegetadas ou áreas de plantio. De todo modo a manutenção da vegetação local é sempre benéfico, tanto para a retenção de água como para a infiltração e também para evitar erosões.

Para qualquer uma das opções há necessidade de estudos que antecedem o projeto para conhecer os parâmetros de infiltrabilidade do solo bem como os ensaios para caracterizar o solo e verificar a variação de umidade do perfil. Todos esses ensaios que antecedem o projeto facilitam o entendimento da infiltração da água no perfil e sua percolação no maciço do solo. Outro parâmetro importante a ser identificados são a profundidade do lençol freático e manter uma distância segura em relação sua cota máxima do lençol freático na estação chuvosa e o fundo do sistema de infiltração, cuja distância pode ser estabelecida pela legislação ambiental local.

Para realizar um controle efetivo, minimizando os impactos das erosões e do assoreamento dos reservatórios das hidrelétricas serão relacionados a seguir as principais observações e pesquisas antes de propor o dimensionamento ou projeto de um sistema de infiltração para o controle das águas pluviais, como se segue:

- a) identificar inicialmente quais as condições de topografia local;
- b) identificar as características do solo e monitorar seu perfil de umidade, analisando amostras do solo local;
- c) identificar as taxas de infiltração e permeabilidade do perfil solo por meios dos ensaios de infiltração sendo o mais indicado o ensaio de poço com monitoramento da perda d'água por infiltração;
- d) identificar a variação do lençol freático e sua máxima elevação na estação da chuva;
- e) analisar os resultados obtidos, escolher o sistema mais adequado, observar particularidades locais, principalmente as relacionadas ao período chuvoso;
- f) identificar a área de influência e calcular o volume de aporte dessa área;
- g) dimensionar os sistema de infiltração fazendo o equilíbrio entre o volume de aporte do escoamento, o volume de reservação do sistema de infiltração, e o volume que o sistema será capaz de absorver;
- h) adotar coeficientes de segurança adequados.

Bibliografia

COSTA, A R.; PRADO, L. A. Especialização de chuvas intensas para o estado de Goiás e o sul de Tocantins. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP, 2003. v. 23, n.2, p. 268-276.

FITTS, C. R. Águas subterrâneas. Tradução da 2 Ed. Revisão técnica: Marcelo Ribeiro Barison. Tradução: Daniel Vieira. Rio de Janeiro. ISBN 978-85-352-7744-9. 1953. 578p.

GRIBBIN, J. E. Introdução a hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais. Título original: Introduction to hydraulics and hydrology with applications for stormwater management. 4. Ed. Norte-americana. Revisor técnico: Marcelo Libânio; Tradutora: Andreia Pisan. São Paulo: Cengage Learning. ISBN 978-85-221-1634-8. 2014. 526p.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **“Groundwater”** Prentice Hall, Inc., New Jersey, USA, 1979. 604p.

LEÃO CARVALHO, E. T. Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na zona norte de Goiânia. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia GO. 2008. 229p.

LEÃO CARVALHO, E. T. Avaliação geotécnica de poços de infiltração de águas pluviais. Tese de doutorado, Publicação G. TD-084/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013. 316p.

Manual Urban best management practices for nonpoint source pollution. Produced by the Point and Nonpoint source programs water quality division, Wyoming Department of Environmental Quality. Washington, USA. 1999. 139p.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. Vários autores e vários consultores. Patrocínio: CNPq, Fapesp. ISBN 85-7270-002-1. 1998.

RICHMAN T.E ASSOCIATES. Start at the Source – Desing Guidance Manual for Stormwater Quality Protection. Califórnia, USA, 1999. 254p.

MEINZINGER, F. Lesson B2: Rainwater harvesting. Notas de aula da Prof. Franziska Meinzingger of Institute of Wastewater Management. Hamburg University of Technology. 2006. 32p.

SILVA JR., A. C. Abordagem probabilística aplicada em análise de fluxo e estabilidade. Tese de doutorado. Publicação G. TD – 109/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2015. 137p.

CAPÍTULO 23

Estudo de casos de reservatórios no estado da Paraíba

Jonny Dantas Patricio
Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Saul Barbosa Guedes
Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Silvio Romero Melo Ferreira

Palavras-chave: Barragens. Nordeste. Estudo de caso. Características visuais.

1 Introdução

Tradicionalmente, as barragens são construídas para armazenamento de água, para fins de agricultura e abastecimento, geração de energia elétrica, controle de assoreamentos e de erosões provocados pela chuva, proteção contra inundação, turismo, melhoria das condições de navegação e contenção de rejeitos industriais ou de mineração.

No final do século XX, no mundo, existiam aproximadamente 45 mil grandes barragens, somando uma superfície total do reservatório de cerca de 500 mil quilômetros quadrados (WILDI, 2010), as quais eram exploradas principalmente para hidreletricidade, irrigação e reservatórios de água potável.

Segundo Andriolo (2015), considerando os reservatórios com superfícies superiores a 20 hectares (200 mil metros quadrados), o que totaliza 13.529 barragens no país, o uso destes pode ser distribuído da seguinte forma: rejeitos industriais (2%), rejeitos minerais (2%), hidrelétricas (9%) e múltiplos usos (87%). Das barragens de água, Mendonça (2013) estimou que 61% têm como função a produção de energia, 32% proporcionar a irrigação e o abastecimento e 7% têm outros fins.

Os tipos de barragens mais utilizadas são as de terra, enrocamento e as de concreto, sendo a escolha condicionada às características locais (por exemplo, forma e dimensões do vale) e da fundação, materiais disponíveis nas áreas de empréstimo, custos do investimento, finalidade da barragem, tempo de construção e aspectos ambientais. As barragens de terra e de enrocamento correspondem a 75% da totalidade existente no mundo, sendo 90% relacionadas a barragens de terra (CALDEIRA, 2008).

As barragens de terra são construídas com materiais selecionados, transportados, lançados e compactados com equipamentos apropriados e podem ser do tipo zoneada ou homogênea. Barragens zoneadas são constituídas de materiais de diferentes características e composições (núcleo impermeável e duas zonas externas mais permeáveis, formadas por material mais grosseiro, que evita deslizamentos), enquanto a homogênea é composta em toda a sua seção de um mesmo material, geralmente solos argilosos, e é pouco permeável (ZINGANO,

2005). Segundo Foster, Fell e Spannagle (1998), na distribuição percentual de solos usados em núcleos de barragens estudadas pelo autor, 432 barragens e 669 tipos de solos, argilas de baixa plasticidade (CL) são aplicadas em aproximadamente 34,2% das barragens, e silte e areias siltosas (SM, SC), em aproximadamente 35,1% das barragens.

Processos de erosão juntamente com eventos de galgamentos são as principais causas de rupturas de barragens no mundo (PIMENTA FILHO, 2013). Esse fenômeno ocorre quando as partículas de um solo sofrem carregamentos excessivos devido ao fluxo da percolação existente no maciço, o que pode vir a aumentar a salinização do solo (CAUSE, 2001) e o assoreamento dos rios (MAIA, 2006), além de afetar as margens dos rios (PALMIERI; SHAH; DINAR, 2001) e até as construções próximas a elas, como pontes (DOUTRIAUX, 2006) e sítios arqueológicos (SOARES, 2015).

O material erodido da barragem, devido à ação principalmente do intemperismo físico (água, vento, gravidade ou ainda, em alguns casos, devido ao gelo que se acumula na superfície) não é lançado diretamente no leito do rio, sendo que parte pode ficar retida em depressões naturais ou ser interceptada pela vegetação ou obstáculos existentes na região. Entre os fatores que podem interferir nesse processo destacam-se: intensidade de chuva, tipo de solo e formação geológica, cobertura vegetal, ocupação e uso do solo, topografia e características fisiográficas da rede de drenagem (MAIA, 2006).

No Brasil, principalmente na região Nordeste, existe um elevado número de barragens que se encontram expostas a possibilidades de acidentes. Essas barragens são geralmente localizadas em propriedades particulares e foram construídas, muitas vezes, sem um adequado acompanhamento e não contam com monitoramento. Estima-se ser grande o número de barragens que necessitam de uma série de reparos indispensáveis à sua correta manutenção (OLIVEIRA, 2008). As construídas com recursos, federais ou estaduais, geralmente atendem a demandas eleitoreiras e, após entregues à população, não recebem manutenção adequada.

O Nordeste concentra uma parcela significativa das barragens existentes no Brasil em função de suas características hídricas e climáticas. A baixa incidência pluviométrica, aliada a um clima árido e semiárido, torna necessário o estoque de água para os fins supracitados. Embora o Nordeste brasileiro possua uma disponibilidade hídrica anual de 700 bilhões de metros cúbicos, apenas 24 bilhões permanecem realmente disponíveis – o restante, 97%, é consumido pelo fenômeno da evaporação e pelo escoamento superficial (REBOUÇAS; MARINHO, 1972 apud BRITO et al., 1999). O clima semiárido no interior da região Nordeste apresenta, em média, precipitação acumulada inferior a 600 milímetros ao ano e chuvas intensas mal distribuídas (MARENGO et al., 2011).

A Figura 1 mostra o balanço anual entre precipitação e evaporação para a região Nordeste, indicando que, na média anual, os totais pluviométricos aproximadamente igualam a evaporação sobre toda a porção semiárida do Nordeste, desde o norte de Minas Gerais até o Ceará e Rio Grande do Norte (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2012). Esta Figura demonstra a seca que vem sendo registrada, nos últimos anos, na região e no estado da Paraíba.

Na Paraíba, o número de reservatórios artificiais é de cerca de 432, sendo 36 de domínio da União e 396 de domínio estadual, sendo todos destinados a usos múltiplos (BRASIL, 2013). Destes, 124 são monitorados pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (Aesa), dos quais 6 encontram-se atualmente sangrando (localizados no litoral do Estado), 36 têm capacidade armazenada superior a 20% do seu volume total, 32 estão em ob-

servação (menor que 20% do seu volume total) e 51 encontram-se em situação crítica (menor que 5% do seu volume total).

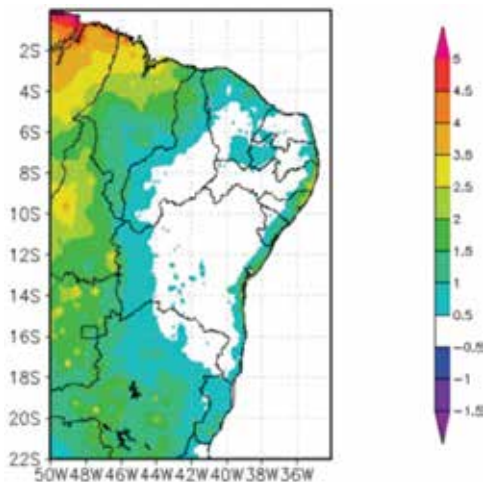


Figura 1. Balanço anual entre precipitação e evaporação para a região Nordeste.

Fonte: projeto PROCLIMA INPE/ CPTEC (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2012 [adaptado]).

Ainda na Paraíba, o Governo do Estado lançou o Programa de Recuperação de Barragens Públicas com o objetivo de recuperar as barragens sob sua responsabilidade. Na primeira etapa foram liberados recursos na ordem de 2,7 milhões para a realização da recuperação de 14 barragens. A segunda etapa irá contemplar 27 barragens, cujos principais problemas verificados consistiam em erosões profundas nas suas estruturas, devido a ações do ambiente e à falta de manutenção durante anos (ESTADO DA PARAÍBA, 2014).

Essa ação corretiva vem ao encontro da Lei de Segurança de Barragens, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB) por meio da Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010.

A Lei 12.334/2010 tem como objetivos principais garantir o estabelecimento de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, de maneira a atenuar a possibilidade de acidentes e suas consequências (BRASIL, 2013). Portanto, torna-se um instrumento facilitador para tratar da segurança de tais empreendimentos de forma integrada.

A Agência Nacional de Águas (ANA) reconhece que antes da lei supracitada existia a necessidade de um avanço na legislação de segurança de barragens, e afirma: “o que se percebe, no exame do arcabouço jurídico-institucional [...] é que não havia a indicação direta de responsabilidades, em âmbito nacional, pela fiscalização da segurança das barragens” (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2012).

Apesar das incipientes tentativas dos governos federal e estadual em estabelecer diretrizes para manutenção das barragens, a maioria destas encontra-se abandonada e entregue a condições adversas. Nesse sentido, foram selecionadas cinco barragens situadas no Agreste do estado da Paraíba, para verificar as condições de cada uma referentes à erosão em bordas de reservatório.

2 Área de estudo

Para desenvolver o capítulo com o tema proposto, foram adotados critérios que contribuíssem para a realização das atividades de maneira mais eficaz. Os critérios adotados foram:

- 1) escolha de reservatórios pertencentes apenas ao estado da Paraíba;
- 2) os reservatórios escolhidos consistiam apenas de barragens com maciços de terra;
- 3) o critério temporal foi adotado como mecanismo de seleção das barragens para este estudo. Foram selecionadas barragens com doze, dezesseis, dezenove e oitenta anos de construção, cujo objetivo era verificar a influência do tempo e do tipo de material do corpo da barragem.

As visitas técnicas às barragens escolhidas para o estudo foram realizadas entre os dias 29 de abril de 2016 a 6 de maio de 2016. Na Tabela 1 apresenta-se o resumo das barragens escolhidas para o estudo, bem como suas principais características geométricas.

Tabela 1. Principais características geométricas das barragens estudadas.

Barragem	Saulo Maia	José Rodrigues	Vaca Brava	Milhã	Sindô Ribeiro
Altura Máxima (m)	24,3	30,9	-	13,2	21,3
Largura de coroamento (m)	6	7,0	-	4,0	7,0
Talude de Montante	2,5:1	2,5:1	-	2:1	2,5:1
Talude de Jusante	2,5:1	2:1	-	2:1	2:1

2.1 Barragem Saulo Maia – Areia

Localizada no Agreste Paraibano, mais precisamente no sítio Caiana de Cima, entre as cidades de Areia (5,9 quilômetros), Pilões (8,4 quilômetros) e Arara (13,4 quilômetros), distâncias em linha reta, com coordenadas geográficas de 06°55'01,0"S e 35°40'33,8"W no Datum Horizontal SAD-69. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2015 a população de Areia era estimada em 23.110 habitantes e a área territorial era de 266,59 quilômetros quadrados. A barragem possui uma capacidade máxima de armazenamento de 4.402.601 metros cúbicos com área de bacia hidrográfica de 55,54 quilômetros quadrados e teve sua construção iniciada no ano de 2002 (Figuras 2 e 3), sendo concluída em 2004. A sua construção não seguiu, entretanto, as mesmas recomendações do anteprojeto, principalmente no que se refere ao posicionamento do eixo desta e do sangradouro, assim como as definições de coroamento e sistemas de proteção dos taludes de montante e jusante.



Figura 2. Construção do talude de montante, Barragem Saulo Maia.

Após uma paralisação ocorrida no início do ano de 2004 e devido às fortes chuvas acontecidas na época, surgiram grandes erosões no maciço e a preocupação quanto à possibilidade de o sangradouro, até então de emergência, não suportar as descargas advindas de sua bacia hidrográfica. Dessa forma, foi executada uma ampliação no sangradouro de emergência, mas no mesmo local onde ficaria o sangradouro definitivo.

Essa ampliação que se deu no sangradouro, já no segundo semestre do ano de 2004, deixou o mesmo com um canal de sangria com largura média de 15 metros, e uma revanche (diferença entre a cota do coroamento e o fundo do canal de sangria) na ordem de 3 metros, ampliando a sua capacidade de descarga em relação à situação anterior, mas não atingindo a largura recomendada pelo anteprojeto.



Figura 3. Barragem Saulo Maia.

2.2 Barragem José Rodrigues - Campina Grande

Localizada no distrito de Galante, pertencente ao município de Campina Grande (Figura 4). Situa-se no planalto do Borborema, em uma região de superfície de ondulações suaves e médias, com altitudes em torno de 605 metros. De acordo com o IBGE, no ano de 2015 a população de Campina Grande era estimada em 405.072 habitantes e área territorial de 594,18 quilômetros quadrados. A barragem possui uma capacidade máxima de armazenamento de 22.332.348 metros cúbicos, com área de bacia hidrográfica de 63,31 quilômetros quadrados.

Na fase de pré-construção foram realizados quinze furos de sondagem no eixo da barragem e dez furos no sangradouro. De forma geral, o perfil de solo encontrado era composto de uma camada de argila arenosa/pouco arenosa com uma profundidade variável de 0,40 metro a 5,00 metros, seguida por uma camada de rocha decomposta. O projeto para a construção da barragem foi idealizado em 1992 e a obra foi inaugurada em 2000.



Figura 4. Barragem José Rodrigues.

2.3 Barragem de Vaca Brava – Areia

A bacia hidrográfica de Vaca Brava, localizada na região entre os municípios de Areia e Remígio, possui uma área de 14,04 quilômetros quadrados e capacidade máxima de armazenamento de 3.783.556 metros cúbicos. Predominam na região a presença de rochas friáveis, com solos argilosos vermelho-amarelados. Em 9 de março de 1939 foi realizada a inauguração do abastecimento de água e esgoto de Campina Grande, provindos da Barragem de Vaca Brava (Figura 5 e 6).

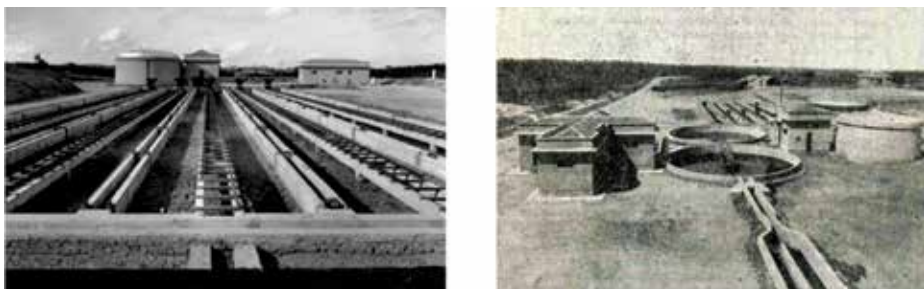


Figura 5. Estação de tratamento da água oriunda da Barragem de Vaca Brava (1939). Fotos: *Retalhos de Campina*, 2016.



Figura 6. Barragem de Vaca Brava.

2.4 Barragem de Milhã – Puxinanã

Localizada no município de Puxinanã, região metropolitana de Campina Grande (Figura 7). De acordo com o IBGE, no ano de 2015 a população estimada de Puxinanã era de 13.557 habitantes e área territorial de 72,68 quilômetros quadrados. O clima da região é temperado, com máximas em torno de 28 °C e mínimas de 16 °C. A barragem possui uma capacidade máxima de armazenamento de 802.684 metros cúbicos, com área de bacia hidrográfica de 33,6 quilômetros quadrados.

Na fase de pré-construção foram realizados seis furos de sondagem no eixo da barragem e seis furos no sangradouro. De forma geral, foi verificado que a camada impenetrável ao trépano apresentou uma variação significativa em função da localização do furo no eixo da barragem, dentro de um intervalo de 0,0 (ombreiras) a 3,60 metros (estaca 5). O projeto para

a construção da barragem foi idealizado em 1985 e a obra teve início em 1993, com a inauguração realizada em 1997.



Figura 7. Barragem Milhã.

2.5 Barragem Sindô Ribeiro – Massaranduba

Localizada no município de Massaranduba, região metropolitana de Campina Grande (Figura 8). De acordo com o IBGE, no ano de 2015 a população de Massaranduba era estimada em 13.654 habitantes e área territorial de 205,957 quilômetros quadrados. A cidade possui um clima tropical com chuvas irregulares durante todo ano e temperatura média de 28 °C.

A construção da barragem foi iniciada de acordo com o seu projeto original, tendo sido paralisada a execução quando o maciço estava com uma altura de 8,90 metros na sua seção máxima, o que corresponde a um volume armazenado da ordem de 321.440 metros cúbicos. Em virtude das chuvas torrenciais acontecidas durante a paralisação dos serviços de execução da barragem e devido ao fato de não existir um sangradouro de emergência que tornasse possível o escoamento das águas de chuva, houve o galgamento do maciço da barragem, ocasionando seu rompimento na ombreira esquerda e causando estragos no talude de jusante, inclusive destruindo uma grande porção do “rock-fill” já executado.

Como consequência do acontecido foi elaborado um novo projeto executivo, em 2004, com modificações sugeridas ao projeto original, visando proporcionar uma maior segurança às etapas já executadas e à conclusão da obra. No projeto final a barragem possui uma capacidade máxima de armazenamento de 3.022.715 metros cúbicos, com área de bacia hidrográfica de 8,7 quilômetros quadrados.



Figura 8. Barragem Sindô Ribeiro.

3 Diagnóstico visual da erodibilidade e possíveis impactos ambientais

Serão descritas as características observadas nos reservatórios durante a visita técnica.

3.1 Características Gerais

Em se tratando das características gerais, para os cinco reservatórios analisados obtivemos as seguintes conclusões:

- a) **existência de vegetação excessiva:** foi verificado que as barragens de Saulo Maia, José Rodrigues e Vaca Brava apresentam excesso de vegetação tanto nas bordas quanto no talude de jusante. Na barragem de Sindô Ribeiro o excesso de vegetação foi verificado apenas nos locais próximos ao talude de jusante e na barragem de Milhã não foi verificado excesso de vegetação.
- b) **existência de raízes profundas:** foi verificado que a maioria dos reservatórios apresentou existência de raízes profundas no maciço do talude de jusante. Apenas na barragem do município de Milhã não se constatou vegetação com raízes profundas.
- c) **existência de resíduos no entorno (despejos):** não foram observados quaisquer resíduos de despejos nos locais próximos aos reservatórios analisados.
- d) **existência de formigueiros:** não foi constatada presença de formigueiros nos taludes de montante e jusante das barragens.
- e) **existência de tráfego de animais:** não foi presenciado o tráfego de animais no entorno das barragens.
- f) **existência de cavas abertas por animais:** foi observada uma cava, de profundidade em torno de 40 centímetros e diâmetro próximo dos 50 centímetros, localizada no talude de jusante da barragem José Rodrigues. As demais barragens não apresentam valas em seus taludes.
- g) **liberação de poluentes químicos constituídos por nutrientes vegetais e agrotóxicos:** as barragens analisadas funcionam como reservatórios de água para consumo humano. Portanto, não foi constatada a ocorrência de liberação de poluentes químicos, seja devido a nutrientes vegetais e/ou agrotóxicos para o interior dos reservatórios.
- h) **deterioração das condições físicas para desenvolvimento da vegetação:** foi verificado que os taludes de jusante dos reservatórios visitados necessitam de manutenção, no que diz respeito à limpeza da vegetação, pois, de modo geral, a vegetação encontra-se cobrindo todo o talude, e até mesmo impedindo o acesso ao mesmo. Apenas a barragem de Milhã apresentou em seu talude de jusante uma vegetação escassa, de modo que a mesma deveria ser modificada para proteger o solo. Foram verificados indícios de erosão por água da chuva.

3.2 Características de proteção

Em se tratando das características de proteção, podemos observar nos reservatórios analisados as seguintes ocorrências:

- a) **existência de assoreamento local:** não foram observados indícios de assoreamento nos locais próximos às barragens dos reservatórios.
- b) **existência de produção de sedimentos:** para as barragens que continham água em seus reservatórios (Saulo Maia, José Rodrigues e Sindô Ribeiro) não foi observada essa ocorrência, e as barragens de Vaca Brava e Milhã estavam com seus reservatórios praticamente secos.
- c) **existência de desabamento:** para as barragens que continham água em seus reservatórios, não foram observados indícios de desabamento nas bordas dos reservatórios e no talude de montante.
- d) **característica do rip-rap quanto ao rompimento, deslocamento e manutenção:** apenas a barragem de Milhã apresentou pouco deslocamento; entretanto, não foi verificado comprometimento da estrutura da barragem. As demais apresentam o rip-rap protegendo de maneira eficiente o talude de montante.
- e) **condições do sumidouro:** apresentam boas condições do sumidouro.
- f) **característica da água (turbidez):** as barragens de Vaca Brava e Milhã encontram-se com seus reservatórios praticamente secos, portanto, a água existente não pode ser bombeada devido ao seu baixo nível e é imprópria para o consumo humano.
- g) **condições da estrutura:** na análise visual realizada não foi verificado comprometimento da estrutura em nenhuma das barragens.
- h) **características geológicas, geotécnicas, estruturais e hidráulicas dos estratos presentes:** visualmente, todas as barragens apresentam boas características geológicas, geotécnicas, estruturais e hidráulicas dos seus substratos.
- i) **características do sistema de proteção:** de maneira geral, todas as barragens apresentam, visualmente, boas condições no que diz respeito ao sistema de proteção. Apenas o talude de jusante da barragem de Milhã necessita de pequenas intervenções no que se refere ao fenômeno da erosão.
- j) **condições das canaletas de drenagem:** em se tratando das canaletas de drenagem, não foi observado, em nenhuma barragem, desgaste das mesmas. Apenas algumas canaletas do talude de jusante das barragens de Saulo Maia e Sindô Ribeiro encontram-se obstruídas devido à presença de vegetação.
- k) **proteção dos taludes:** com exceção do talude de jusante da barragem de Milhã, o qual deveria melhorar a vegetação na sua proteção contra a erosão, os taludes das demais barragens estão satisfatoriamente protegidos.
- l) **condições do filtro de pé:** embora não tenha sido desenvolvida nenhuma modelagem do fluxo hidráulico pelo maciço das barragens analisadas, acredita-se que o filtro de pé esteja funcionando de maneira satisfatória.

3.3 Características estruturais

Em se tratando das características estruturais, podemos observar nos reservatórios analisados as seguintes ocorrências:

- a) **formas de relevo e condições das encostas:** as barragens Saulo Maia, José Rodrigues e Vaca Brava encontram-se construídas em locais que apresentam um relevo do tipo ondulado, cuja declividade das encostas encontra-se entre 2% e 20%. A barragem de

Milhã encontra-se construída em um local de relevo plano, cuja encosta possui declividade entre 0% e 3%. A barragem de Sindô Ribeiro está localizada em um relevo do tipo forte ondulado, cuja declividade de suas encostas está entre o intervalo de 20% a 45%.

- b) posição relativa do nível d'água do reservatório na superfície do talude:** a barragem de Saulo Maia é a única que apresenta nível d'água máximo em relação à superfície do talude, pois a mesma encontra-se com seu reservatório na capacidade máxima de armazenamento. O nível d'água da barragem José Rodrigues está próximo à base (baixo volume). As barragens de Vaca Brava e Milhã estão com seus reservatórios vazios. A barragem de Sindô Ribeiro encontra-se com nível d'água baixo.
- c) posição relativa do nível d'água subterrânea em relação ao talude:** não foram realizados ensaios *in situ* para determinação do nível d'água subterrânea.
- d) existência de erosão superficial na crista do talude:** foram observados na barragem de Milhã pequenos indícios de erosão provocada pela água das chuvas. As demais barragens não apresentaram o referido fenômeno.
- e) existência de trincas transversais no maciço, trincas longitudinais nos taludes de montante e jusante, rachaduras por ressecamento na crista do maciço, erosão no "pé" da barragem provocado pela saída de água, deslizamento ou afundamento da estrutura de montante, deslizamento do talude abatimento da crista do talude, desalinhamento da crista do talude, predominância de área molhada no talude de jusante:** não foram observadas quaisquer dessas ocorrências.

4 Aspectos físicos

A composição granulométrica, plasticidade, estrutura e mineralogia dos solos apresentam dependência da textura e química da rocha que lhe deu origem. Tratando-se de solos do tipo saprolítico, esses fatores são determinantes para o comportamento erosivo destes.

4.1 Textura

Os solos classificados como tropicais, típicos do Brasil, recebem essa denominação após sofrerem processos geológicos e pedológicos de regiões de clima tropical úmido. Dentre estes destacam-se duas categorias: solos saprolíticos e lateríticos (NOGAMI; VILLIBOR,1995). A Paraíba apresenta predominância de solos do tipo saprolítico (regiões Agreste e Sertão), em função da baixa incidência pluviométrica, e apenas em algumas regiões do litoral verifica-se a existência de solos lateríticos.

Solos saprolíticos resultam da decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha matriz pela ação das intempéries (chuvas e insolação), mantendo ainda de maneira nítida a estrutura da rocha que lhe deu origem. Ou seja, o comportamento do solo saprolítico está condicionado às características das rochas de origem e ao intemperismo por elas sofrido (SILVA, 2015).

Por meio de estudos realizados por Jacintho (2005) foi possível observar pouca variação nas curvas granulométricas, obtidas com e sem o uso do defloculante hexametáfosfato de só-

dio, de solo proveniente do Aproveitamento Múltiplo Manso. Indicando que solos desse tipo são, quanto ao aspecto químico, de fácil deflocação. Comportamento parecido ao encontrado pelos autores supracitados foi verificado para os solos das barragens de Sindô Ribeiro, Saulo Maia e José Rodrigues (Figuras 9, 10 e 12), com diferenças de aproximadamente 10%-15% entre as curvas com e sem uso do defloculante.

As curvas granulométricas das barragens de Vaca Brava e Milhã (Figuras 11 e 13) apresentaram diferenças significativas quando analisadas pelos dois métodos, cerca de 30%-40%. Esse comportamento é típico de solos que têm mais de 50% da fração argila e são altamente intemperizados, o que não foi o caso em estudo. Entretanto, Guimarães (2008) explica que a fração argila forma microagregados arenosiltosos, com permeabilidade condizente com solos arenosos.

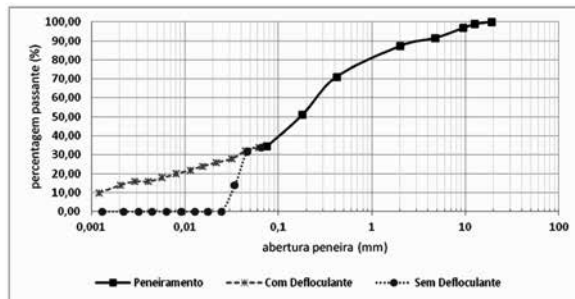


Figura 9. Curvas granulométricas com e sem defloculante, Barragem Sindô Ribeiro.

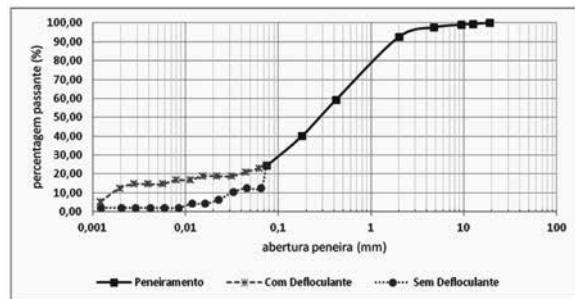


Figura 10. Curvas granulométricas com e sem defloculante, Barragem José Rodrigues.

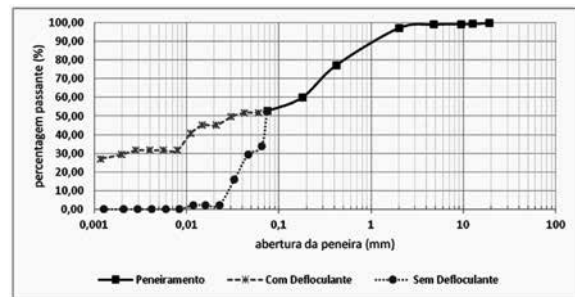


Figura 11. Curvas granulométricas com e sem defloculante, Barragem Vaca Brava.

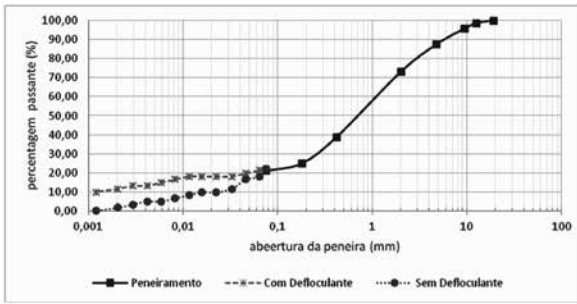


Figura 12. Curvas granulométricas com e sem defloculante, Barragem Saulo Maia.

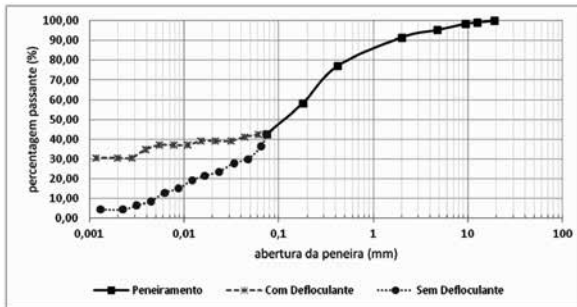


Figura 13. Curvas granulométricas com e sem defloculante, Barragem Milhã.

4.2 Plasticidade

Os limites de consistência obtidos para os solos das barragens estão apresentados na Tabela 1, juntamente com os valores da atividade (IA) e a classificação desses solos. Verifica-se que as barragens são constituídas por solos de baixa plasticidade e atividade, em virtude da baixa proporção de materiais finos. Os solos, com exceção do proveniente da barragem de Galante – areia argilosa –, são classificados como areia siltosa mal graduada.

Essa baixa plasticidade deve-se ao fato de a sua constituição ser basicamente quartzo e feldspatos, minerais de difícil decomposição e baixa área de superfície específica.

Tabela 2. Limites de consistência e atividade do solo.

Local	W_L (%)	W_p (%)	IP (%)	A	Classificação (UCS)
Sindô Ribeiro	46	36	10	0,29	SM
Milhã	38	24	14	0,32	SM
Vaca Brava	51	38	13	0,29	SM
Saulo Maia	26	-	-	-	SM
José Rodrigues	26	17	9	0,37	SC

4.3 Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação verificou a estabilidade das amostras de solos coletadas na barragem frente à imersão em água destilada, independente da dispersão do material.

O método de ensaio utilizado é baseado na proposta de Bastos (1999), na qual as amostras dos solos coletados na barragem foram submetidas à submersão total, por período de 24 horas. O resultado do ensaio é puramente qualitativo, conforme ilustram as Figuras 14A e 14B.



Figura 14. Amostras antes (A) e após 24 horas (B) de imersão.

Conforme observado na Figura 14, as amostras de solos estudadas apresentaram desagregação nítida ao serem submetidas à imersão durante o período de 24 horas. Como referência, a Figura 15 ilustra uma amostra de solo submetida a um processo semelhante, mas em que não se constatou desagregação da amostra.



Figura 15. Amostra resistente à desagregação.

Fonte: Bastos, 1999.

5 Considerações finais

As barragens, principalmente na região em estudo, são negligenciadas pelo Poder Público e não passam por manutenções preventivas, estando submetidas às intempéries e ações antrópicas.

Apesar de o ensaio físico de desagregação, com os solos provenientes das barragens estudadas, apresentar tendência destes à erosão, esse comportamento não foi observado *in situ*. As

barragens existentes na Paraíba e em grande parte do Nordeste são construídas, geralmente, com solos saprolíticos arenosos pouco intemperizados e com baixa atividade de argila. Esses fatos, aliados à baixa incidência pluviométrica da região, fazem que as barragens desse estado apresentem estabilidade e pouca suscetibilidade erosiva.

Entretanto, destaca-se que, apesar da baixa pluviosidade registrada na região, principalmente nos últimos anos, as barragens supracitadas datam de mais de uma década, ou seja, no interim da construção até a data atual, estas passaram por épocas de alta volumetria em curto espaço de tempo (elevando o nível do reservatório até o máximo), alternadas com período de seca. Portanto, apesar da influência do clima no comportamento erosivo das barragens, este não é decisivo.

O retrato das barragens da Paraíba revela uma baixa tendência à erodibilidade, mesmo com a inexistência de manutenções preventivas e épocas de elevado índice pluviométrico, inferindo a influência benéfica dos solos saprolíticos arenosos com relação ao critério de erodibilidade.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *A questão da água no Nordeste*. Brasília, DF: CGEE, 2012. 436 p.

ANDRIOLO, F. R. *Aspectos sobre o uso do CCR em barragens brasileiras*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) DAMS, 7., 2015, Chengdu, China. *Proceedings...* Chengdu, 109 p.

BASTOS, C. A. B. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. 1999. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Relatório de segurança de barragens 2011*. Brasília: ANA, 2013. 95 p.

BRITO, L. T. L. B.; SILVA, D. A.; CAVALCANTI, N. B.; ANJOS, J. B.; REGO, M. M. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 111-115, 1999.

CALDEIRA, L. M. M. S. *Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro*. Lisboa: LNEC, 2008. 248 p.

CAUSE, D. S. *Aswan High Dam: Construction, effects on Egyptian Life and Agriculture, and environmental impacts*, 2001.

DOUTRIAUX, E. Aménagements hydrauliques dans le cours du Rhône français. *Archives des Sciences*, 59, p. 151-161, 2006.

ESTADO DA PARAÍBA. *Condições das barragens paraibanas*. 2014. Disponível em: <<http://paraiba.pb.gov.br/governo-do-estado-recupera-mais-onze-barragens-com-estruturas-com-prometidas/>>. Acesso em: 9 ago. 2016.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. Analysis of embankment dam incidents. *UNICIV Report*, n. R-374 - UNSW, Sydney, Australia, 1998.

GUIMARÃES, L. J. R. *Levantamento das áreas potenciais ao assoreamento da barragem Piraquara*. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

JACINTHO, E. C. *Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens*. 2005. 160 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

MAIA, A. G. *As consequências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens*. 2006. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MERENGO, J.A.; ALVES, L.M.; BESERRA, E.A.; LACERDA, F.F. *Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Campina Grande: [s.n.], 2011. 410 p.

MENDONÇA, M. B. de. *Obras de Terra*. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Villibor, 1995. 240 p.

OLIVEIRA, J. R. C. *Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra*. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

PALMIERI, A.; SHAH, F.; DINAR, A. Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of Environmental Management*, 61, p. 149-163, 2001.

PIMENTA FILHO, M. A. *Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios*. 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

RETALHOS DE CAMPINA. Inauguração do abastecimento d'água de Campina Grande, via Vaca Brava. Disponível em: < <http://cgretalhos.blogspot.com.br/2016/03/inauguracao-do-abastecimento-dagua-de.html#.V7Rp0pgrIdU>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

SANTOS, R.; CALDEIRA, L. Processos de erosão interna em barragens de aterro e suas Fundações. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 11., Coimbra, Portugal, 2007. *Anais...* Coimbra: CNG, 2007.

SILVA, A. M. Estudo de parâmetros de compactação proctor no comportamento mecânico do solo. 2015. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande, 2015.

SOARES, M. S. *Erosão em margens de reservatório e avaliação geoarqueológica: estudo da área de depleção da UHE Capivari-Cachoeira, PR-Brasil*. 2015. 123 p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2015.

ZINGANO, A. C. *Barragens: geologia de Engenharia III*. Porto Alegre: [s.n.], 2005.

WILDI, W. Near Curriculum in Natural Environmental Science. *Terre et Environnement*, v. 88, p. 187-197, 2010.

CAPÍTULO 24

Processo erosivo em borda de reservatório de UHE – Estudo de Caso

Marcelo Buras
Rodrigo Moraes da Silveira

Palavras-chave: Erosão. Ensaios de laboratório. Bordas de reservatório de UHEs

1 Introdução

Este capítulo apresenta os procedimentos e resultados de ensaios de caracterização geotécnica e de ensaios para avaliação do potencial erosivo de solos amostrados nas bordas do reservatório da UHE Barra Bonita, no Município de Barra Bonita – SP. Tais ensaios foram realizados como escopo do programa experimental pertinente ao P&D Aneel, intitulado “Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação, Quantificação e Controle de Baixo Custo de Erosão em Bordas de Reservatório” (Despacho ANEEL nº 158 de 25 de janeiro de 2010), desenvolvido pelos Institutos Lactec, com apoio da AES Tietê.

Mais especificamente, os ensaios de caracterização geotécnica consistiram em ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, massa específica dos grãos e limites de liquidez e plasticidade. Os ensaios para avaliação do potencial erosivo consistiram nos procedimentos para avaliação da dispersibilidade de solos argilosos (ensaio de furo de agulha ou *pinhole test*, ensaio de torrão ou *crumb test* e ensaio de dispersão SCS) e ensaio de *Inderbitzen* para avaliar o potencial erosivo do solo da área de estudo. A área de estudo compreendeu o reservatório da barragem da UHE Barra Bonita, localizada no Município de Barra Bonita (SP).

2 Área de estudo

O presente item apresenta a área de estudo, incluindo aspectos físicos da bacia hidrográfica em que se localiza a área estudada, além de características quanto à erosão na área em questão.

2.1 Localização da área de estudo e aspectos físicos da bacia hidrográfica

A região que compreende a barragem e o reservatório de Barra Bonita, local de onde foram amostrados solos para os ensaios geotécnicos apresentados neste capítulo, encontra-se

apresentada na Figura 1. O curso d'água que abastece o reservatório é o rio Tietê, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Paraná, com área de 32.330 km² (Figura 2).

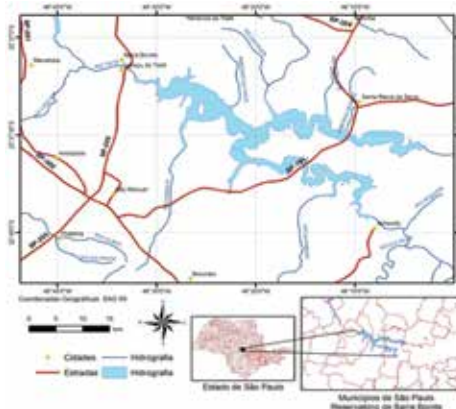


Figura 1. Localização do Reservatório de Barra Bonita – São Paulo.

O início das obras para a implantação da Usina Barra Bonita (UHE BAB) ocorreu em 1957, com o início de sua operação em 20 de maio de 1963. As vazões observadas na usina apresentaram a máxima média diária em 07/06/1983 (4.011,00 m³/s) e a mínima média diária equivaleu a 29,70 m³/s. A vazão média anual (MLT) equivaleu a 416,00 m³/s, sendo a vazão regularizada equivalente a 22,00 m³/s.

Quanto às principais características da montante da barragem, o nível da água (N.A.) atinge sua máxima cota em 451,50m. A cota mínima que o N.A. atinge é de 439,50m. O perímetro do reservatório equivale a 56 km, com comprimento de 788 km. Para a implantação do reservatório, foram desapropriadas 289 propriedades, totalizando a área de 32.964,51 ha.



Figura 2. Vista aérea do reservatório da UHE Barra Bonita. Imagem Google Earth de 23/10/2006 e 20/07/2007.

2.2 Características quanto à erosão

A formação de reservatórios, devido à presença de barramentos, traz normalmente variações das condições naturais de equilíbrio do meio. Entre essas variações, a erosão apresenta uma posição relevante, que deve ser analisada durante a operação do empreendimento.

Na faixa marginal do reservatório de Barra Bonita, os principais processos erosivos registrados são do tipo de escorregamento e solapamento com tombamento por descalço (Figura 3). Também ocorrem voçorocas (Figura 4) e erosão laminar nas áreas contíguas às margens do reservatório. Os escorregamentos e solapamentos ocorrem principalmente nas encostas agredidas por ondas, formadas por solos mais friáveis e que apresentam um grande desnível entre a lâmina d'água e o topo do talude. As voçorocas e erosões em sulco, por sua vez, ocorrem nas áreas de campo formadas por solos mais arenosos e com declividades mais acentuadas MRS (2001).



Figura 3. Escorregamento verificado nas margens do reservatório de Barra Bonita (Fonte: MRS, 2001).



Figura 4. Erosão em sulco verificada nas margens do reservatório de Barra Bonita (Fonte: MRS, 2001).

A Figura 5 apresenta a suscetibilidade parcial da bacia afluente do reservatório de Barra Bonita à erosão. Outro fator importante para a análise da erodibilidade é a ocupação do solo. Na Figura 6, é apresentado o mapa de uso do solo para a região no entorno do reservatório. Nessa figura, pode-se ver que predominam os usos Pastagem e Área de Cultivo na área visualizada.

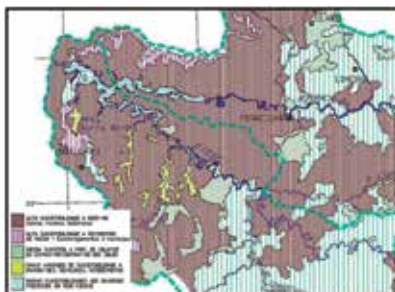


Figura 5. Suscetibilidade à erosão na bacia do Tietê em Barra Bonita. (Fonte: IPT, 1989).

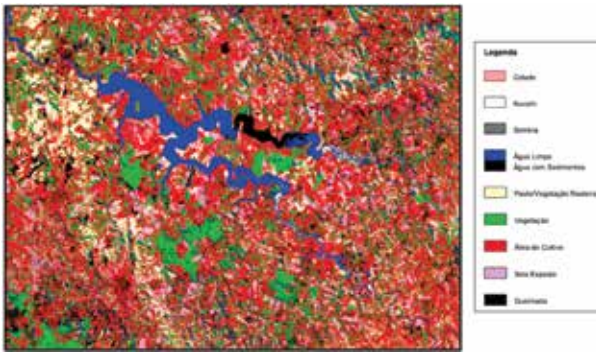


Figura 6. Mapa de uso e ocupação do solo no entorno do reservatório de Barra Bonita (Fonte: MRS, 2001).

3 Inspeção de campo

A etapa referente à inspeção de campo contou com o reconhecimento prévio de locais que apresentavam problemas geotécnicos de erosão e instabilidade ao longo das bordas do reservatório da UHE. Todos os locais inspecionados foram acessados com o auxílio de um barco, o que possibilitou a observação de quase a totalidade das bordas das margens do reservatório da barragem Barra Bonita, em um período de tempo inferior ao que se levaria para acessar os mesmos locais via rodovias vicinais da região. O acesso via barco se realizou a partir dos condomínios Santa Vitória e Vale Verde, situados à margem direita do reservatório.

Foram realizadas amostragens de solo deformado e indeformado para ensaios de laboratório nos principais locais identificados como suscetíveis a erosão e instabilidade de taludes durante os trabalhos de campo. Os locais amostrados totalizaram nove pontos distintos, denominados de P1 a P9. Os locais que apenas foram inspecionados e não constituíram amostragens de solo totalizaram sete pontos e foram identificados como I1 a I7 (pontos de inspeção). Na Figura 7, estão apresentados, além dos pontos de amostragem e pontos de inspeção, a localização dos condomínios Santa Vitória e Vale Verde, utilizados para o acesso ao reservatório da barragem. Foram integradas às informações de campo, informações advindas do mapa pedológico, conforme a Figura 8, e também do reconhecimento das unidades geológicas locais.

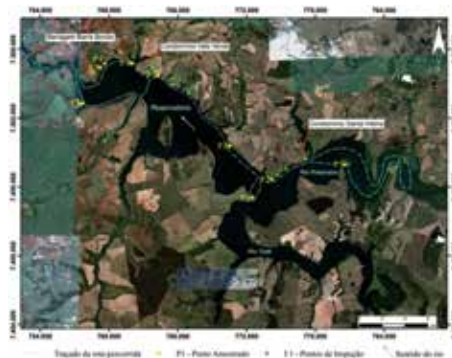


Figura 7. Identificação dos pontos amostrados, pontos de inspeção, trajeto percorrido e condomínios utilizados para acesso ao reservatório (Modificado do Google Earth, 2015).

Foram identificadas três unidades estratigráficas, que são a Formação Piramboia, do Grupo Passa Dois e as Formações Botucatu e Serra Geral, do Grupo São Bento (Figura 9). A Formação Piramboia é constituída por litologias quase exclusivamente arenosas, sempre friáveis. Predominam arenitos muito finos a finos, siltsosos, com seleção regular a baixa, estratificações cruzadas acanaladas de baixo ângulo, estratificações sigmoidais, além de laminações plano-paralelas. No topo da formação, localmente, ocorrem bolas de argila plástica arroxeadada, que sugerem uma composição de rocha básica alterada.

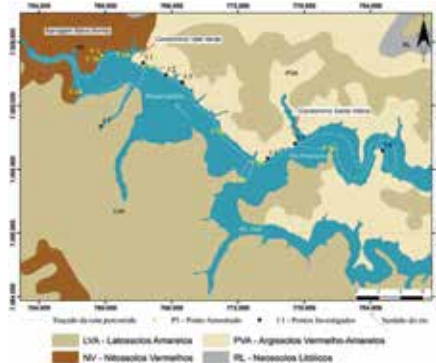


Figura 8. Mapa de solos da região do entorno da barragem de Barra Bonita com a indicação dos pontos amostrados e investigados (Fonte: MRS, 2001).

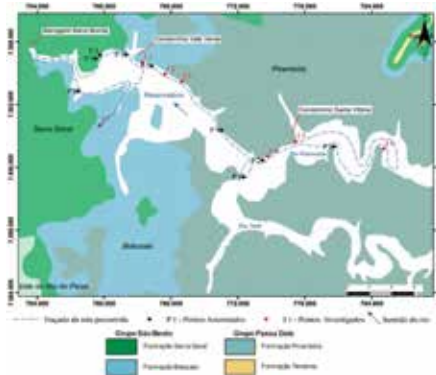


Figura 9. Mapa Geológico da região do reservatório de Barra Bonita. (Fonte: CPRM 2004). Escala 1:1.000.000.

A Formação Botucatu é composta na base por uma fácies torrencial e eólica no topo. A fácies torrencial, por sua vez, é composta por arenitos médios a grossos, às vezes conglomeráticos, quartzosos, amarelos ou vermelhos, com estratificações cruzadas acanaladas e tabulares. O contato entre esta fácies torrencial com a Formação Piramboia é na forma de discordância angular, conforme apresentada na Figura 10. Trata-se de uma superfície ondulada, com formas de preenchimento de canal. A fácies eólica dessa unidade corresponde a arenitos vermelhos, quartzosos, finos, seleção em geral boa (bimodal), grãos arredondados e pouca argila na matriz. Ocorrem estratificações cruzadas acanaladas de médio a grande porte, sendo indicativos de sedimentação em ambiente desértico. O topo normalmente apresenta-se silicificado em função do “cozimento” pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral.



Figura 10. Relações de contato entre as formações Rio do Rasto, Pirambóia e Botucatu (fácies torrencial). Modificado de Strugale, (2002).

Os basaltos da Formação Serra Geral são negros, afaníticos ou equigranulares muito finos. Quando alterados, apresentam cor cinza ou avermelhada e evidente esfoliação esferoidal. O contato dessa unidade com a Formação Botucatu, abaixo, é interdigitado, no qual é comum se observar o primeiro derrame recobrendo paleodunas. Detalhes a respeito de cada atividade de amostragem de solo realizada serão apresentados na sequência.

O Mapa de Declividade da Figura 11 foi gerado a partir de dados topográficos digitais produzidos pela NASA, *Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)* e *Japan's Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC)*. O radar ASTER 30m (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) permite visualizar a variação de declividades na área de estudo. A partir desse mapa, é possível observar a declividade preponderante que se situa entre 0 a 15%, intervalo classificado como plano a suave ondulado; porém, ocorrem declividades entre 15 e 30%, intervalo classificado entre ondulado a fortemente ondulado, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do relevo através das classes de declividade.

Classes de Declividade %	Classes de Relevo
0 - 3	Plano
3 - 12	Suave Ondulado
12 - 24	Ondulado
24 - 45	Forte Ondulado
> 45	Montanhoso

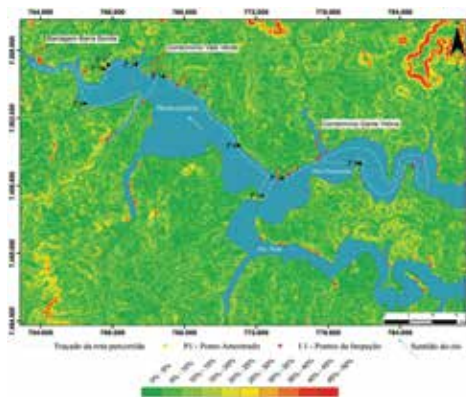


Figura 11. Mapa de declividade em porcentagem, realizado a partir de imagem de radar ASTER 30m.

Os pontos inspecionados e objetos de amostragem durante os trabalhos de campo, mostrados na Figura 7, foram identificados conforme o que foi apresentado no item anterior; na Tabela 2, encontram-se mais informações a respeito de cada local, como a posição geográfica e a denominação das amostras coletadas nos diferentes pontos de amostragem de solo.

As amostragens foram realizadas conforme as recomendações da Norma ABNT NBR 9604 (1986). O processo de amostragem consistiu em escavações realizadas com equipamentos manuais de corte nos taludes de solo localizados junto às margens do reservatório. Em cada profundidade estipulada e de interesse, tendo-se o cuidado de remover a camada superficial intemperizada de solo, realizou-se uma bancada, com o auxílio de uma pá de corte e de espátulas (equipamentos limpos e esterilizados) e ainda com o auxílio de um anel metálico de borda cortante com diâmetro de 50 mm e altura de 20 mm, que foi cuidadosamente e levemente cravada contra um cilindro de solo previamente esculpido, ao mesmo tempo em que a amostra era aparada com o auxílio de uma espátula, removendo os excessos laterais. As amostras foram retiradas com excesso de altura para posterior regularização e moldagem em laboratório.

Tabela 2. Identificação dos solos amostrados e localização dos pontos de amostragem.

ORIGEM DAS AMOSTRAS DE SOLO	LOCAL	DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS OU LOCAIS DE INSPEÇÃO	POSIÇÃO GEOGRÁFICA		
			LESTE	SUL	ALTITUDE (m)
Reservatório da barragem Barra Bonita	ME	P1	772.671	7.495.225	445
	MD	P2	774.114	7.496.864	448
	MD	P3	762.192	7.506.947	450
	MD	P4	759.959	7.506.882	449
	MD	P5	759.556	7.506.564	432
	ME	P6	758.077	7.503.467	446
	MD	P7	764.430	7.505.936	447
	MD	P8	770.738	7.499.748	451
	ME	P9	780.709	7.498.128	447

Legenda: ME – Margem Esquerda
MD – Margem Direita

Também foram coletadas amostras deformadas do mesmo local onde foram amostrados os anéis com solo indeformado; sendo que tais amostras deformadas serviram para realização de ensaios de caracterização geotécnica em laboratório.

Devido ao excesso de peso que blocos de solo indeformado, com dimensões recomendadas pela norma ABNT NBR 9604 (1986), causariam na embarcação durante o transporte, decidiu-se realizar amostragens de miniblocos de solo indeformado nos taludes das bordas do reservatório, de forma semelhante ao descrito no parágrafo anterior, com dimensões aproximadas de 20 cm x 15 cm x 15 cm.

Após as amostras terem sido extraídas dos taludes e coletadas por meio dos métodos de amostragens descritos, elas foram envolvidas em filme plástico de PVC e acondicionadas no interior de sacos plásticos fechados hermeticamente com solo natural de origem dos solos dos anéis e dos miniblocos. Esse procedimento foi realizado com a intenção de proteger os corpos

de provas amostrados quanto à perda de teor de umidade de campo, além de minimizar os efeitos de trepidação ou a possibilidade de danos durante o transporte até o laboratório.

No Laboratório de Geotecnia dos Institutos Lactec, os sacos plásticos contendo as amostras deformadas e indeformadas foram acondicionados em câmara úmida para preservação do teor de umidade de campo, sendo removidos desse ambiente somente para realização dos ensaios.

As quantidades de amostras indeformadas coletadas nos taludes dos locais identificados no Quadro 1 foram o necessário para a realização dos ensaios em laboratório, os quais se encontram apresentados no item a seguir.

4 Ensaios de laboratório

Os ensaios geotécnicos de laboratório realizados, utilizando-se as amostras coletadas nas margens do reservatório de Barra Bonita, compreenderam ensaios de caracterização (granulométrica por peneiramento e sedimentação, massa específica dos grãos e limites de liquidez e plasticidade), ensaios para avaliação da dispersibilidade de solos argilosos (ensaio de furo de agulha ou *pinhole test*, ensaio de torrão ou *crumb test* e ensaio de dispersão SCS) e ensaio de *Inderbitzen* para avaliar o potencial erosivo do solo da região. É importante salientar que as amostras foram acondicionadas em câmara úmida para preservação do teor de umidade de campo e somente foram removidas desse ambiente para realização dos ensaios. Cabe enfatizar ainda que as normas de caracterização geotécnica de solos passaram por uma revisão no ano de 2016, e que todos os ensaios de caracterização aqui apresentados foram realizados seguindo as recomendações das normas publicadas anteriormente ao ano citado. Os ensaios em questão foram realizados anteriormente ao ano de 2016. A despeito disso, registre-se que as normas em questão apresentaram poucas mudanças em relação às anteriores, fato que não compromete os resultados dos ensaios ora em exame.

4.1 Resultados dos ensaios de laboratório

Os nove pontos amostrados receberam um novo registro de identificação, o qual se encontra apresentado na Tabela 3. Esse novo registro será utilizado para a apresentação dos resultados dos ensaios.

Tabela 3. Registro de Amostras.

Registro de Origem	Registro LAME
P1 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4001.10
P2 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4002.10
P3 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4003.10
P4 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4004.10
P5 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4005.10
P6 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4006.10
P7 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4007.10
P8 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4008.10
P9 – Usina Barra Bonita – AES Tietê	2.4009.10

4.2 Ensaios de caracterização geotécnica

Conforme apresentado, os ensaios de caracterização geotécnica foram os ensaios de massa específica dos grãos (ρ_s), de limite de liquidez (LL), de limite de plasticidade (LP) e de análise granulométrica com uso de agente defloculante. A preparação das amostras para os ensaios de caracterização seguiu as recomendações da Norma Brasileira ABNT NBR 6457 (2016). Para execução dos ensaios citados, foram seguidas as recomendações das seguintes normas: ABNT NBR 6508 (2016), ABNT NBR 6459 (2016), ABNT NBR 7180 (2016) e ABNT NBR 7181 (1988). Todos os ensaios de caracterização foram realizados com secagem prévia do solo e com amostras deformadas recolhidas nos pontos de amostragem.

4.3 Índices físicos

A partir de uma massa total (P), correspondente a um volume total (V) conhecido, do teor de umidade (w) – com amostra secada em estufa a 105°C, até obtenção da constância de massa – e da massa específica dos grãos (ρ_s), foram calculados os demais índices físicos de interesse dos solos estudados – massa específica natural (ρ_t), massa específica seca (ρ_d), grau de saturação (S) e índice de vazios (e). Os valores de P, V e w foram determinados a partir das amostras indeformadas (anéis bizelados amostrados em campo).

Os índices físicos calculados a partir dos dados referentes aos corpos de prova indeformados estão descritos na Tabela 4, a qual mostra também o teor de umidade natural das amostras coletadas em campo. O referido teor foi determinado em laboratório de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 6457 (2016).

Tabela 4. Índices físicos e teor de umidade natural.

Registro LAME	Massa específica natural (g/cm^3)	Massa específica seca (g/cm^3)	Grau de saturação (%)	Índice de vazios	Teor de umidade (%)
2.4001.10	1,57	1,50	16,1	0,81	4,8
2.4002.10	1,78	1,61	41,1	0,68	10,4
2.4003.10	1,90	1,60	73,0	0,72	19,1
2.4004.10	1,70	1,64	15,0	0,65	3,6
2.4005.10	1,71	1,67	11,6	0,60	2,6
2.4006.10	1,61	1,55	13,2	0,73	3,6
2.4007.10	1,74	1,70	11,7	0,57	2,5
2.4008.10	1,75	1,61	34,7	0,68	8,7
2.4009.10	1,77	1,60	40,8	0,68	10,3

4.4 Limites de Atterberg

Os ensaios de limites de Atterberg (LL e LP) foram realizados com amostras secas ao ar, destorroadas e peneiradas na peneira de abertura 0,42 mm, de maneira a se obter a quantida-

de necessária para o ensaio. As amostras assim obtidas foram misturadas com água destilada, formando-se uma pasta. Os ensaios foram então realizados em conformidade com as recomendações das normas ABNT NBR 6459 (2016) e ABNT NBR 7180 (2016). Antes de cada ensaio, a amostra permanecia pelo menos 12 horas no interior de um saco plástico hermeticamente fechado, para propiciar a homogeneização da umidade.

Os resultados dos limites de consistência para as nove amostras ensaiadas não apresentaram valores de limite de liquidez e limite de plasticidade, sendo classificados como solos não plásticos e não líquidos.

4.5 Massa específica dos grãos

A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 6508 (2016). Os resultados obtidos nesse ensaio encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5. Massa específica dos grãos.

Registro LAME	Massa específica dos grãos (g/cm ³)
2.4001.10	2,715
2.4002.10	2,706
2.4003.10	2,753
2.4004.10	2,709
2.4005.10	2,661
2.4006.10	2,696
2.4007.10	2,669
2.4008.10	2,699
2.4009.10	2,696

4.6 Ensaios de dispersão SCS (Soil Conservation Service)

A norma ABNT NBR 13602 (1996) prescreve o método para avaliação da dispersibilidade de solos argilosos. Segundo a ABNT NBR 13602 (1996), o solo a ser ensaiado deve conter fração argila (FA) superior a 12% (partícula com diâmetro inferior a 0,005 mm). Independentemente da FA que os solos apresentaram, decidiu-se utilizar o método para avaliação do potencial de dispersibilidade de todas as amostras. Nesse caso, o diâmetro das partículas consideradas na FA equivaleram a 0,002 mm e a 0,06 mm de fração silte, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6502 (1995) – Rochas e solos.

O objetivo do ensaio de dispersão SCS é a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo, também conhecido como ensaio de dispersão SCS (*Soil Conservation Service*). Trata-se de um ensaio semelhante ao de granulometria, normatizado pela ABNT NBR 7181 (1984); porém, não é utilizada a agitação mecânica nem o agente dispersante (defloculante – hexametáfosfato de sódio, com concentração de 45,7 g L⁻¹).

A comparação entre os resultados dos ensaios realizados por esses dois procedimentos normatizados fornece uma medida da dispersibilidade de solos argilosos. Considera-se que um solo é dispersivo quanto menor for a diferença entre as duas curvas de distribuição granulométrica no trecho correspondente a sua fração mais fina – curvas obtidas a partir de ensaios seguindo as recomendações da ABNT NBR 13602 (1996) e da ABNT NBR 7181 (1984). A aproximação entre as duas curvas no trecho citado indica que a argila sofre o processo de defloculação de maneira semelhante, tanto em presença de água quanto na utilização de agente dispersante e agitação mecânica.

Para exprimir essa comparação quantitativamente, calcula-se a porcentagem de dispersão da seguinte maneira (Equação 1):

$$\text{Porcentagem de dispersão (\%)} = \left(\frac{A}{B} \right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A – Porcentagem, em massa, de partículas de argila, determinada no ensaio sedimentométrico comparativo;

B – Porcentagem, em massa, de partículas de argila, determinada no ensaio de granulometria convencional (ABNT NBR 7181, 1984).

A porcentagem de dispersão igual a 100% indica uma fração argila completamente dispersiva, ao passo que a porcentagem de dispersão igual a zero indica uma fração argila não dispersiva.

O critério concebido para avaliação da erodibilidade proposta por Middleton (1930) considera solos com porcentagem de dispersão superior a 15% como solos erodíveis. O autor considera, para os coeficientes A e B da Equação 1, a porcentagem em massa das frações de argila e de silte para a razão de dispersão.

Araújo (2000) estabeleceu uma nova proposta para a avaliação da erodibilidade em função da porcentagem de dispersão. Esta nova proposta encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6. Avaliação da erodibilidade.

Porcentagem de dispersão	Erodibilidade
Entre 20% e 25%	Média
Entre 25% e 50%	Alta
Acima de 50%	Muito Alta

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de dispersão SCS. A análise dos resultados, considerando as avaliações propostas na ABNT NBR 13602 (1996) e as avaliações propostas por Araújo (2000) e Middleton (1930), encontra-se também a seguir.

Nas Figuras 12 a 20, estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica das amostras ensaiadas com o uso de agente defloculante, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 7181 (1984), sem o uso de agente defloculante e sem agitação mecânica, de acordo com a ABNT NBR 13602 (1996).

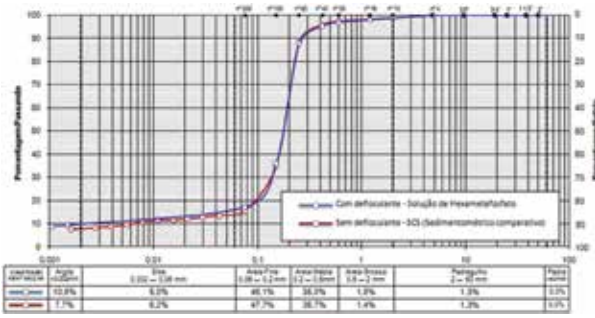


Figura 12. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4001.10.

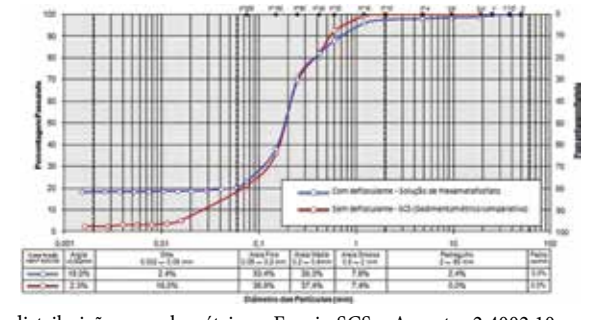


Figura 13. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4002.10.

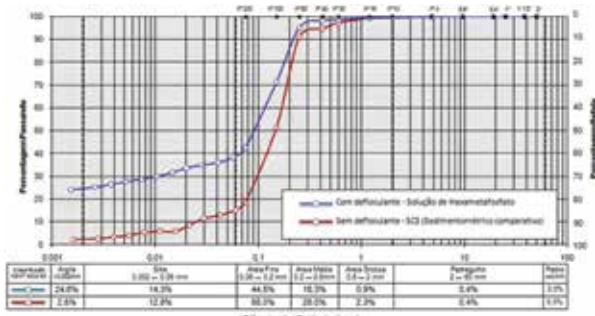


Figura 14. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4003.10.

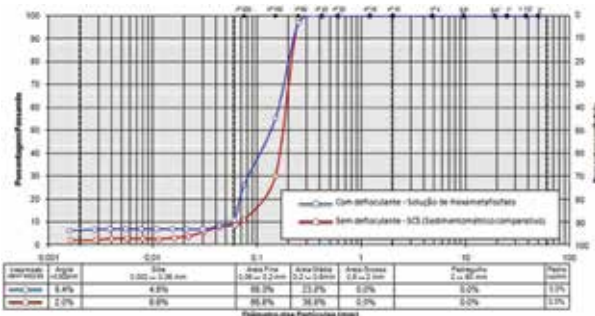


Figura 15. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4004.10.

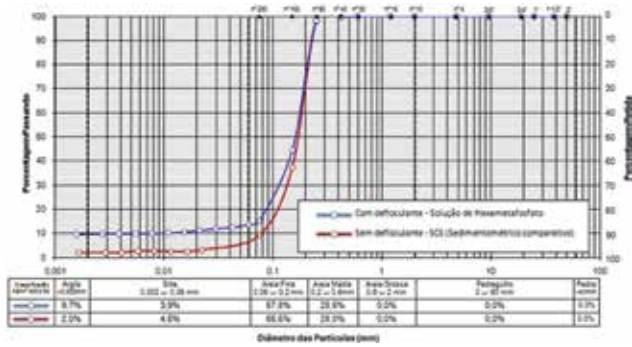


Figura 16. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4005.10.

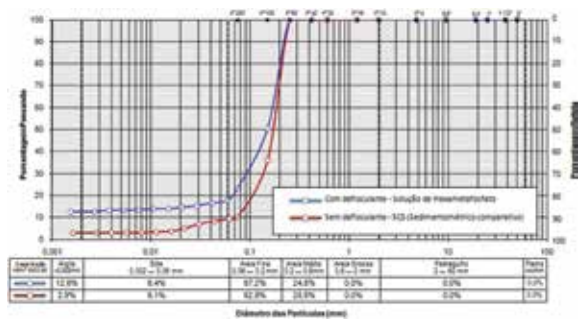


Figura 17. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4006.10.

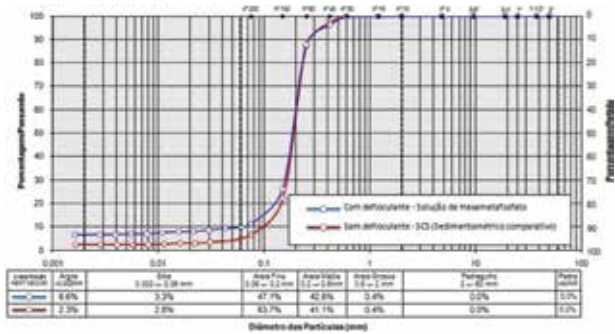


Figura 18. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4007.10.

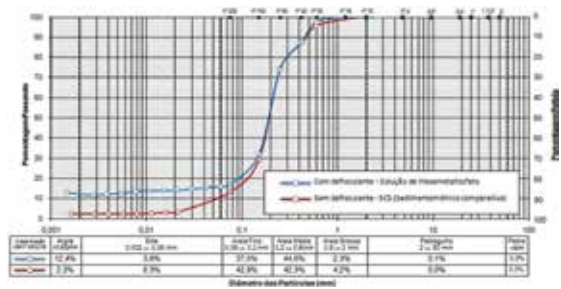


Figura 19. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4008.10.

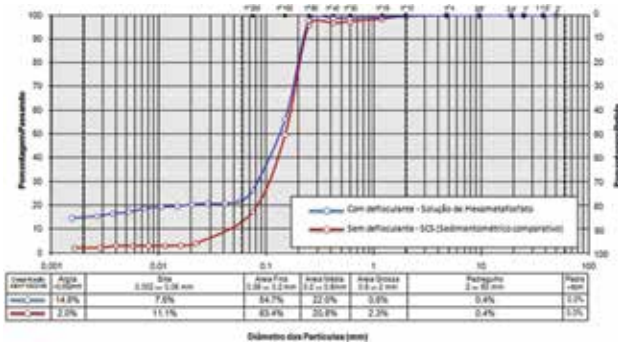


Figura 20. Curva de distribuição granulométrica – Ensaio SCS – Amostra 2.4009.10.

A Tabela 7 mostra a avaliação da erodibilidade em função da porcentagem de dispersão do solo ensaiado, calculados a partir da Equação 1. O clássico índice de dispersão proposto por Middleton (1930) considera que solos com razão de dispersão acima de 15% são erodíveis. Com base nesse critério, todos os solos considerados na análise são erodíveis. É importante esclarecer que, embora esse critério avalie a erodibilidade, não é considerado um índice de dispersão propriamente dito. Logo, o fato de se tratar de solos classificados como erodíveis pelo critério não implica serem considerados dispersivos.

Para as análises propostas nos ensaios para avaliação da dispersibilidade, foram selecionadas apenas as amostras em que se faziam presentes mais de 12% de material argiloso (partículas menores de 0,002 milímetros, de acordo com a ABNT NBR 6502 (1995)). A Tabela 8 apresenta a distribuição granulométrica dos solos analisados.

Tabela 7. Critério de Erodibilidade.

Amostra	Razão de dispersão (%)	Critério de Erodibilidade (Middleton, 1930)	Porcentagem de dispersão (%)	Critério de Erodibilidade (Araújo, 2000)
2.4001.10	88	Erodível	71	Muito Alta
2.4002.10	90	Erodível	13	-
2.4003.10	39	Erodível	10	-
2.4004.10	79	Erodível	31	Alta
2.4005.10	48	Erodível	21	Média
2.4006.10	50	Erodível	23	Média
2.4007.10	48	Erodível	35	Alta
2.4008.10	66	Erodível	19	-
2.4009.10	59	Erodível	14	-

Os diâmetros considerados para as frações de silte e argila para análise da erodibilidade foram adotados de acordo com a ABNT NBR 6502 (1995) – Rochas e solos (Argila - 0,002 mm e Silte - 0,06 mm).

Tabela 8. Resumo das porcentagens da curva de distribuição granulométrica.

Amostra	% Pedra	% Pedregulho	% Areia grossa	% Areia média	% Areia fina	% Silte	% Argila	Composição
2.4001.10	0	1,3	1,8	35	46,1	5,0	10,8	Areia Argilosa
2.4002.10	0	2,4	7,5	36,3	33,4	2,4	18,0	Areia Argilosa
2.4003.10	0	0,4	0,9	15,3	44,5	14,3	24,6	Areia Argilosa
2.4004.10	0	0	0	23,8	65,3	4,5	6,4	Areia
2.4005.10	0	0	0	28,6	57,8	3,9	9,7	Areia
2.4006.10	0	0	0	24,8	57,2	5,4	12,6	Areia Argilosa
2.4007.10	0	0	0,4	42,6	47,1	3,3	6,6	Areia
2.4008.10	0	0,1	2,3	44,6	37,0	3,6	12,4	Areia Argilosa
2.4009.10	0	0,4	0,6	22,0	54,7	7,5	14,8	Areia Argilosa

4.7 Pinhole test

O método do ensaio consiste na medida direta e qualitativa da dispersibilidade de solos a partir do fluxo de água que percola através de um pequeno orifício executado axialmente em um corpo de prova com dimensões de 38,1 mm de altura por 35 mm de diâmetro, com uma agulha de diâmetro aproximado de 1 mm. O ensaio se inicia com uma carga hidráulica imposta de 50 mm. A dispersão do solo é classificada de acordo com a turbidez da água coletada após passar por este orifício. A Figura 21 apresenta o aparelho para o ensaio do furo de agulha (*pinhole test*).

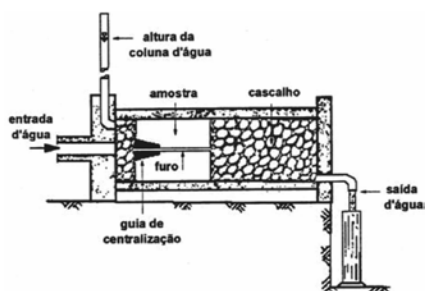


Figura 21. Ensaio do furo de agulha (“pinhole test”). Fonte: adaptado de Sherard *et al.* (1976).

Os solos podem ser classificados quanto à dispersibilidade em seis categorias, tendo em vista parâmetros como a turbidez do efluente, vazão e dimensões finais do furo, como segue abaixo:

- ND1 – não dispersivo;
- ND2 – incipientemente dispersivo;
- ND3 – levemente dispersivo;
- ND4 – moderadamente dispersivo;
- D2 – dispersivo; e
- D1 – altamente dispersivo.

As Figuras 22 a 29 apresentam a aparelhagem utilizada para realização do ensaio em questão.



Figura 22. Aparelho para o ensaio do furo de agulha.



Figura 23. Reservatório para fornecimento de água destilada a carga constante.



Figura 24. Proveta graduada.

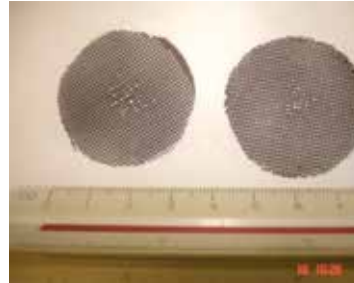


Figura 25. Telas de arame com abertura de malha menor que 2mm.



Figura 26. Guia de centralização, com formato cônico e dotado de orifício de 1,5mm de diâmetro.



Figura 27. Areia grossa, lavada, passada na peneira de 4,8mm e retida na peneira de 2mm.



Figura 28. Balança com resolução de 0,01g.



Figura 29. Agulha e molde.

Os ensaios seguiram as recomendações prescritas na norma ABNT NBR 14114 (1998). A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio furo de agulha (*pinhole test*). As Figuras 30 a 33 ilustram um dos corpos de prova após a realização do ensaio.

Tabela 9. Resultados do ensaio de furo de agulha (*pinhole test*).

Amostra	Teor de umidade natural w (%)	Índice de vazios e	Massa específica seca γ_d (g/cm^3)	Massa específica natural γ_{NAT} (g/cm^3)	Carga hidráulica ao final do ensaio h (mm)	Vazão ao final do ensaio Q (cm^3/s)	Turbidez do efluente	Classificação
2.4002.10	10,4	0,68	1,61	1,78	1020	2,11	Claro	ND1
2.4003.10	19,1	0,72	1,60	1,90	50	0,29	Levemente Escuro	ND4
2.4006.10	3,6	0,73	1,55	1,61	*	*	*	*
2.4008.10	8,7	0,68	1,61	1,75	50	0,17	Levemente Escuro	ND4
2.4009.10	10,3	0,68	1,60	1,77	50	0,77	Levemente Escuro	ND4

* não foi possível realizar os ensaios porque o furo executado com a agulha não se manteve aberto durante o ensaio. Ainda, pelo mesmo motivo, também não foi possível a realização dos ensaios para as demais amostras.



Figura 30. amostra 2.4008.10 Furo de agulha após o ensaio na direção do fluxo.



Figura 31. amostra 2.4008.40 Furo de agulha após o ensaio na direção oposta ao sentido do fluxo.



Figura 32. amostra 2.4008.10 Comparação do diâmetro do furo com o diâmetro da agulha após o ensaio.



Figura 33. amostra 2.4008.10 Turbidez do efluente.

4.8 Crumb Test

O ensaio de torrão, que foi proposto por Sherard *et al.* (1976) consiste na avaliação visual de torrões de solo, moldados em formato esférico com diâmetro compreendido entre 6 e 10

milímetros e imersos em água destilada. O solo é classificado como dispersivo ou não dispersivo de acordo com o seu comportamento quando imerso em água por aproximadamente uma hora, quando será atribuída à amostra um grau compreendido entre 1 e 4, conforme mostra a Tabela 10.

O solo será classificado como não dispersivo quando o grau atribuído for 1 ou 2, ou dispersivo quando o grau atribuído for 3 ou 4. Os ensaios seguiram as recomendações da norma ABNT NBR 13601 (1996). A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio de torrão (*crumb test*). É importante informar que se procedeu a esses ensaios com solo pertencente as mesmas amostras ensaiadas no *Pinhole test*. As Figuras 34 a 45 apresentam as etapas do ensaio de torrão.

Tabela 10. Classificação pelo ensaio de torrão.

Grau	Comportamento	Descrição
1	Não-dispersivo	O torrão de solo pode absorver água, sofrer esboroamento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não se observa sinal de turvação no líquido, provocado por colóides em suspensão.
2	Levemente dispersivo	Há indícios de suspensão na água, próximos à superfície do torrão (se a turvação for facilmente visível, registrar como grau 3).
3	Moderadamente dispersivo	Observa-se uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente finos veios espalhando-se no fundo do béquer, facilmente reconhecível.
4	Fortemente dispersivo	Observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer. Em casos extremos, toda a água torna-se turva.

Fonte: ABNT NBR 13601:1996.

Tabela 11. Resultados do ensaio de torrão (*crumb test*).

Amostra	Teor de umidade natural w (%)	Índice de vazios e	Massa específica seca ρ_d (g/cm ³)	Massa específica natural ρ_{NAT} (g/cm ³)	Grau atribuído	Classificação
2.4002.10	10,4	0,68	1,61	1,78	1	ND
2.4003.10	19,1	0,72	1,60	1,90	2	ND
2.4006.10	3,6	0,73	1,55	1,61	2	ND
2.4008.10	8,7	0,68	1,61	1,75	2	ND
2.4009.10	10,3	0,68	1,60	1,77	2	ND

Legenda: ND (não dispersivo).



Figura 34. Moldagem da amostra
– *Crumb test*.



Figura 35. Ensaio de torrão

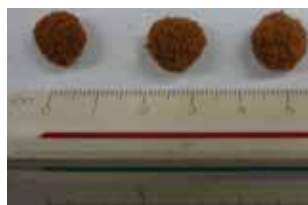


Figura 36. Amostra 2.4002.10
– *Crumb test*.



Figura 37. Amostra 2.4002.10
após 1 hora de imersão
– *Crumb test*.

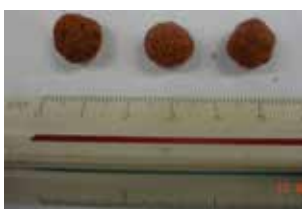


Figura 38. Amostra 2.4003.10
– *Crumb test*.



Figura 39. Amostra 2.4003 após 1
hora de imersão
– *Crumb test*.

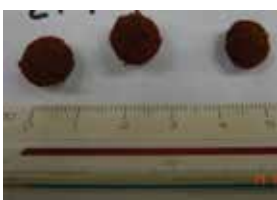


Figura 40. Amostra 2.4006.10
– *Crumb test*.



Figura 41. Amostra 2.4006.10
após 1 hora de imersão
– *Crumb test*.



Figura 42. Amostra 2.4008.10
– *Crumb test*.



Figura 43. Amostra 2.4008.10
após 1 hora de imersão
– *Crumb test*.



Figura 44. Amostra 2.4009.10
– *Crumb test*.



Figura 45. Amostra 2.4009.10
após 1 hora de imersão
– *Crumb test*.

4.9 Inderbitzen

Este ensaio foi realizado em seis dos nove pontos amostrados nas bordas do reservatório da barragem de Barra Bonita. A escolha dos pontos selecionados para o ensaio se deve ao teor de umidade natural do solo, acima de 3%. Somente nessas amostras, era possível a moldagem dos corpos de prova em um anel específico para o ensaio. A Tabela 12 apresenta o

teor de umidade de compactação em que foram moldados os corpos de prova para o ensaio de *Inderbitzen*.

O ensaio proposto por *Inderbitzen* (1961) permite a avaliação da erodibilidade em laboratório por meio do escoamento da água superficial sobre uma amostra moldada em um anel cilíndrico com diâmetro aproximado de 146 milímetros. O método permite considerar fatores como a compactação relativa do solo, inclinação do “talude experimental”, vazão e duração do escoamento.

Tabela 12. Teor de umidade de moldagem das amostras – Ensaio de *Inderbitzen*.

Amostra	Teor de umidade (%)
2.4001.10	4,6
2.4003.10	20,2
2.4004.10	3,6
2.4006.10	3,4
2.4008.10	8,5
2.4009.10	10,3

O procedimento consiste em fixar um anel cilíndrico contendo uma amostra de solo ao orifício de mesmo diâmetro no aparelho de *Inderbitzen* (erosômetro ou ainda equipamento para ensaio de erosão), cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável, por onde passa um fluxo d'água com vazão controlada. Segundo o autor, o ensaio simula em condições próximas às reais, porém não pode ser confundido como um modelo reduzido, pois não há semelhança física entre o processo erosivo que ocorre em um talude natural e no aparelho de *Inderbitzen*. Os resultados obtidos no ensaio são expressos em gráficos da perda de solos (erosão) *versus* tempo e velocidade de erosão *versus* tempo.

Para os ensaios, foram utilizadas amostras deformadas de solo coletadas nas bordas do reservatório de Barra Bonita e remoldadas em laboratório, nas mesmas condições de teor de umidade e densidade natural. A Tabela 13 apresenta os índices físicos das amostras ensaiadas.

Tabela 13. Índices físicos – Ensaio de *Inderbitzen*.

Amostra	Massa específica natural (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Índice de vazios	Grau de saturação inicial (%)
2.4001.10	1,62	1,55	0,76	16,4
2.4003.10	1,92	1,60	0,72	77,2
2.4004.10	1,65	1,59	0,70	13,9
2.4006.10	1,65	1,60	0,69	13,3
2.4008.10	1,80	1,66	0,63	36,4
4.4009.10	1,80	1,63	0,65	42,7

A metodologia do ensaio de erosão consiste em três etapas, detalhadas na sequência:

1. Seleção de equipamentos;
2. Preparação da amostra; e
3. Execução do ensaio.

4.9.1 Equipamentos

Os equipamentos utilizados na realização dos ensaios foram:

- a) Aparelho de *Inderbitzen* (Figura 46);
- b) 2 (duas) peneiras da série 325 (0,045 mm);
- c) 2 (dois) reservatórios de 20 litros;
- d) 6 (seis) beakers de 1 litro; e
- e) 1 (uma) estufa com temperatura aproximada de 110 °C.



Figura 46. Aparelho de *Inderbitzen*.

4.9.2 Preparação da amostra

A preparação da amostra consiste na moldagem do solo no anel, conforme as propriedades físicas de cada amostra, apresentadas anteriormente na Tabela 13 (Figura 47). Logo, monta-se o anel contendo o solo a ser ensaiado no aparelho de *Inderbitzen* (Figura 48).



Figura 47. Preparação da amostra para o ensaio de *Inderbitzen*.



Figura 48. Anel + amostra + papel filtro + tela – Ensaio de *Inderbitzen*.

Cobre-se a superfície do plano inclinado e da amostra com papel filme e enche-se o reservatório até o nível desejado, mantendo-o constante. Fixada a vazão, determina-se a rampa ideal para cada amostra onde ocorre mais de 50% da erosão total nos primeiros cinco minutos (Figura 49).



Figura 49. Apararelho de Inderbitzen com papel filme protegendo a amostra.

A vazão foi determinada de acordo com a calibração do nível d'água, apresentada no reservatório *versus* a vazão em cm^3/s . A Figura 50 apresenta a curva de calibração para o ensaio.

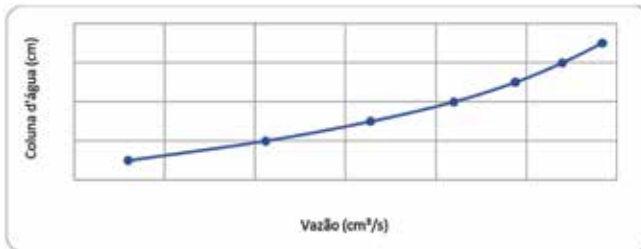


Figura 50. Gráfico altura da coluna da água *versus* vazão.

4.9.3 Execução do ensaio

Inicia-se o ensaio retirando-se o papel filme e coletando-se todo o material erodido na peneira nº 325 (Figura 51). O material passante na peneira é lavado no reservatório,



Figura 51. Coleta do material erodido.

onde, após o ensaio, estima-se a porcentagem de material passante. A troca de paineiras e do reservatório é realizada nos tempos de 1, 5, 10, 15, 20 e 30 minutos para cada amostra ensaiada. À medida que as peneiras vão sendo lavadas no reservatório, o material erodido é transferido para os respectivos beckers. Após o término do ensaio, o material coletado nos beckers é acondicionado em estufa a aproximadamente 110 °C, até constância de massa. Depois de seco, o solo é pesado para determinação da quantidade erodida em cada intervalo de tempo.

4.9.4 Resultados obtidos

Nas Figuras 52 e 53, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados, que compreendem os gráficos de erosão *versus* tempo e velocidade e de erosão *versus* tempo de cada amostra ensaiada. Em cada gráfico das figuras citadas, pode-se observar o avanço do processo erosivo e de sua velocidade ao longo do tempo.

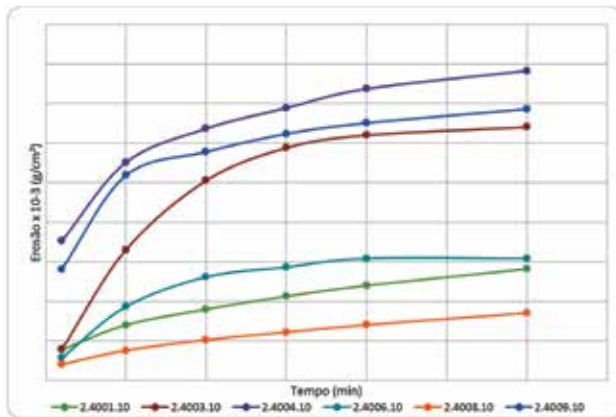


Figura 52. Gráfico erosão versus tempo.

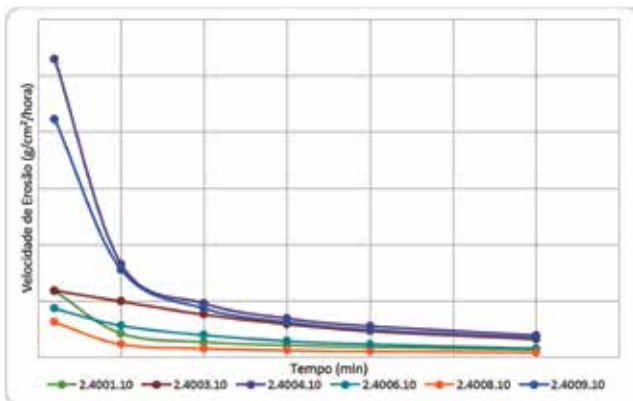


Figura 53. Gráfico velocidade de erosão versus tempo.

5 Considerações finais

A Tabela 14 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios realizados, visando à avaliação do potencial erosivo de solos amostrados nas bordas do reservatório da UHE Barra Bonita (Barra Bonita – SP).

Tabela 14. Resumo de resultados de ensaios.

Amostra	Massa específica dos grãos (g/cm ³)	Pinhole test Classificação	Crumb test Classificação	Critério de Erodib. (Middleto, 1930)	Critério de Erodib. (Araújo, 2000)	Inderbitzen (Erosão x 10 ⁻³ g/cm ²)	Inderbitzen (Vel. De erosão g/cm ² /h)
2.4001.10	2,715	-	-	Erodível	Muito Alta	1410	3,08
2.4002.10	2,706	ND1	ND	Erodível	-	-	-
2.4003.10	2,753	ND4	ND	Erodível	-	3201	6,86
2.4004.10	2,709	-	-	Erodível	Alta	3913	7,82
2.4005.10	2,661	-	-	Erodível	Média	-	-
2.4006.10	2,696	*	ND	Erodível	Média	1543	3,08
2.4007.10	2,669	-	-	Erodível	Alta	-	-
2.4008.10	2,699	ND4	ND	Erodível	-	853	1,70
2.4009.10	2,696	ND4	ND	Erodível	-	3430	6,86

* Não foi possível realizar o ensaio *Pinhole test* porque o furo executado com a agulha não se manteve aberto durante o ensaio. Ainda, pelo mesmo motivo, também não foi possível a realização dos ensaios para as demais amostras. Os ensaios *Crumb test* foram realizados com solo pertencente às mesmas amostras ensaiadas no *Pinhole test*. Os ensaios *Inderbitzen* foram realizados com amostras que apresentavam teor de umidade natural do solo acima de 3%. Somente nessas amostras, era possível a moldagem dos corpos de prova em um anel específico para o ensaio.

Entre os ensaios destinados a avaliar a dispersibilidade, o ensaio do furo de agulha é considerado por diversos pesquisadores como o mais preciso (SHERARD *et al.*, 1976b). O ensaio de torrão, por sua simplicidade, facilidade e baixo custo, merece ser incluído em estudos de erosão. Ainda a respeito do ensaio de torrão, assim como os demais ensaios realizados, o possui caráter predominantemente qualitativo e comparativo. Por ser um ensaio direto, permite não apenas comparar diferentes solos, mas também o mesmo solo sob diferentes condições iniciais. Os resultados dos ensaios *pinhole* e *crumb test* indicaram solos não dispersivos, mostrando a consistência de resultados obtidos a partir de diferentes ensaios.

Os resultados de ensaios *Inderbitzen* com solo areno-argiloso compactado indicam que a erosão e a sua velocidade nem sempre aumentaram ou diminuíram de maneira homogênea e regular. Pedacos mais ou menos resistentes dos corpos de prova foram os responsáveis por esse comportamento. Nos corpos de prova compactados, ocorreram frequentes remoções de partículas agregadas na forma de placas maiores, provocando variações nos resultados.

Os principais processos erosivos identificados em vistoria de campo foram do tipo oriundo de escorregamento e solapamento com tombamento por descalço. Também ocorrem voçorocas e erosão laminar nas áreas contíguas às margens do reservatório. Os es-

corregamentos e solapamentos ocorrem principalmente nas encostas agredidas por ondas, formadas por solos mais friáveis e que apresentam um grande desnível entre a lâmina d'água e o topo do talude. As voçorocas e erosões em sulco, por sua vez, ocorrem nas áreas de campo formadas por solos mais arenosos com declividades mais acentuadas. Os solos que foram amostrados em campo estavam sujeitos aos processos erosivos citados. Assim sendo, esperava-se que os resultados oriundos indicassem a capacidade erodível dos solos, como de fato indicou.

Por fim, para entender o processo de erosão que ocorre em bordas de reservatórios, é necessário analisar todos os fatores que possam, de alguma forma, atuar sobre esse processo. Sob esse enfoque, a metodologia de ensaios apresentada neste capítulo é adequada para analisar o fenômeno em apreço e ainda permite a utilização das informações mais relevantes em avaliações da inspeção de campo e modelagem.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016, 9p.

_____. **NBR 7181**. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998, 15p.

_____. **NBR 13601**. Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*). - Rio de Janeiro, 1996, 2p.

_____. **NBR 13602**. Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS. -Rio de Janeiro, 1996, 5p.

_____. **NBR 6502**. Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995, 18p.

_____. **NBR 6459**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016, 5p.

_____. **NBR 7180**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016, 3p.

_____. **NBR 7182**. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986, 10p.

_____. **NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016, 8p.

_____. **NBR 14114**. Solos argilosos dispersivos - Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole Test). Rio de Janeiro, 1998, 8p.

ARAÚJO, R. C. **Estudo da erodibilidade dos solos da Formação Barreiras –RJ**. 2000. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

INDERBITZEN, A. L. An erosion tests for soils. **Material reseach and standarts**. Philadelphia, v. 1, n. 7, p. 553-554, 1º july. 1961.

MIDDLETON, H. E. **Properties of soils which influence soil erosion**. Washington: USDA. 1930, 16p. (Technical Bulletin, 178).

MRS Estudos Ambientais Ltda. UHE Barra Bonita. – **Relatório ambiental**. Porto Alegre, 2001.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, R. S. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of the geotechnical engineering division**, ASCE, 102(GT4): 287-301, 1976.

STRUGALE, M. **Arcabouço e evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozóico)**: implicações na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. 2002. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

CAPÍTULO 25

Considerações sobre erosões em borda de reservatório

Maurício Martines Sales
José Camapum de Carvalho
Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Marta Pereira da Luz
Newton Moreira de Souza
Renato Resende Angelim

Palavras-chave: Erosão laminar. Sulco. Ravina, Voçoroca. Sociedade.

1 Introdução

Para abrir este capítulo, nada melhor que as palavras escritas por Adhemar de Barros no Prefácio do livro “Erosão”, de autoria de Primavesi (1952):

Disse-se alhures, e acertadamente, que a conservação do solo é a responsabilidade maior de todos os homens, sem uma única exceção, em todo o globo terrestre. A experiência adquirida pelo Homem, através da História, ensina que os povos que conservam e cuidam o seu solo têm prolongado por muitos anos a prosperidade e a existência dos mesmos; ao contrário outros têm desaparecido rapidamente, ou emigrado para melhores regiões em busca de solos férteis onde possam viver. Que de mais vivo pode nos impressionar que a avalanche da água arrasando as encostas e as rechãs, inundando as baixadas, depredando propriedades, arrastando pontes e carregando a matéria fértil do solo para o desconhecido? É a **erosão**. De multifária forma pode se apresentar esse fenômeno, que uma minoria compreende, mas que outros já estão sentindo pela indiscrição como surge. (Grifou-se)

Embora o citado livro se volte para erosão em áreas agrícolas, não só essas palavras contidas no prefácio como também várias passagens que integram o seu texto são atuais e se aplicam às erosões de borda de reservatório em sentido amplo.

Neste capítulo, serão apresentados aspectos e questões gerais relacionados às erosões de borda de reservatório.

2 Aspectos sociais no contexto das erosões de borda de reservatório

Idealizar, planejar, projetar, construir e preservar os reservatórios sem que haja participação da sociedade é tarefa aparentemente simples, mas a sua real complexidade torna o empreendimento, quase sempre, fadado a enfrentar dificuldades nas fases de execução e manutenção.

A idealização de um reservatório de água geralmente brota de uma demanda. Ele deverá ocupar um determinado espaço físico e nada mais natural de que aqueles de quem se origina essa demanda e aqueles que habitam na região de sua implantação sejam ouvidos e participem do planejamento. No campo socioambiental, essa participação social, por mais simples que seja, gera na sociedade uma sensação de pertencimento, levando-a a se engajar no planejamento do empreendimento e na construção de soluções para os problemas socioambientais oriundos da execução do projeto, bem assim para aqueles que possivelmente surgirão durante sua vida útil. Não se trata de interferências puramente técnicas, embora a participação da sociedade possa conduzir a alterações de ordem técnica no projeto.

Muitas vezes, problemas como os relacionados à erosão de margem, assoreamento e contaminação das águas dos reservatórios estão diretamente ligados ao *modus vivendi* da sociedade ou à colocação em prática de interesses nocivos ao meio ambiente e oriundos da própria existência do reservatório. O envolvimento da sociedade em todas as fases do empreendimento pode contribuir para que se evitem tais problemas, pois ela sai da condição de mera expectadora ou de simples beneficiária do empreendimento para a condição de responsável pelo seu sucesso.

A legislação já prevê a participação da sociedade, em sentido amplo, por meio de audiências públicas nos empreendimentos que requerem relatório de impacto ambiental, mas infelizmente esse tipo de participação, por não compreender um envolvimento continuado e abrangente, não tem se mostrado eficiente no que diz respeito a uma participação social mais ampla. São relevantes ações educadoras e participativas, até mesmo para que se levante todo o potencial econômico do empreendimento e quais cuidados ambientais são mais relevantes. Por exemplo, um reservatório concebido para satisfazer à geração de energia elétrica, considerando-se o potencial hidráulico, pode ser aproveitado para várias outras finalidades, tais como: geração de energia eólica, geração de energia solar, pesca, turismo, abastecimento de água, uso agrícola e melhoria da qualidade do ar. Já um reservatório de água destinada ao consumo humano requer o máximo cuidado com a poluição de suas águas. Essa poluição pode ocorrer em consequência do lançamento de águas poluídas no reservatório ou, ainda, pelo carreamento de insumos e defensivos agrícolas usados na bacia de captação.

As erosões de borda de reservatório guardam, muitas vezes, um elo importante com a sociedade, seja quando seu surgimento está vinculado à atividade humana, seja quando a sociedade é simplesmente vítima de processos erosivos oriundos da existência do reservatório, ou da interação de ambos.

Portanto, inserir a sociedade nas discussões e educá-la para que conviva de modo harmonioso com o reservatório e com o meio ambiente que o envolve tem grande e indiscutível relevância.

3 Aspectos educacionais e legais no contexto das erosões de borda de reservatório

A educação constitui-se em base de sustentação do equilíbrio ambiental. Faz-se necessário, no entanto, ampliar a abrangência do conteúdo da educação, de modo a envolver, entre outros, aspectos éticos, morais, sociais e ambientais. A educação deve se voltar não apenas para a produção, mas também para a vida e sua qualidade. A legislação brasileira indica essa direção, como se verá a seguir.

O art. 225 da Constituição Federal Brasileira estabelece que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, **impondo-se ao Poder Público e à coletividade** o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (grifou-se). E, para assegurar a efetividade desse direito, ela estabelece, no inciso VI do § 1º desse artigo, que incumbe ao Poder Público “promover a educação ambiental **em todos os níveis de ensino e a conscientização pública** para a preservação do meio ambiente.” (grifou-se).

A Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999, dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. No art. 1º dessa Lei, é definido o que se entende por educação ambiental:

Art. 1ª Entendem-se por educação ambiental **os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente**, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade (grifou-se).

Em seu art. 2º, essa lei define onde a educação ambiental deve ser inserida no sistema educacional:

Art. 2ª A educação ambiental é um componente essencial e permanente da educação nacional, devendo estar presente, de forma articulada, **em todos os níveis e modalidades do processo educativo, em caráter formal e não-formal** (grifou-se).

Por sua vez, o art. 3º, inciso VI, dessa lei incumbe:

VI - à **sociedade como um todo**, manter atenção permanente à formação de valores, atitudes e habilidades que propiciem a atuação individual e coletiva voltada para a prevenção, a identificação e a solução de problemas ambientais (grifou-se).

No contexto das erosões de borda de reservatório, os princípios básicos da educação ambiental contidos nos incisos do art. 4º da lei citada assumem grande relevância. São eles:

- I - o enfoque humanista, holístico, democrático e **participativo**;
- II - a concepção do meio ambiente em sua totalidade, **considerando a interdependência entre o meio natural, o sócio-econômico e o cultural**, sob o enfoque da sustentabilidade;
- III - o pluralismo de ideias e concepções pedagógicas, **na perspectiva da inter, multi e transdisciplinaridade**;
- IV - a **vinculação entre a ética, a educação, o trabalho e as práticas sociais**;
- V - a **garantia de continuidade e permanência** do processo educativo;
- VI - a permanente **avaliação crítica do processo educativo**;
- VII - a **abordagem articulada** das questões ambientais locais, regionais, nacionais e globais;
- VIII - o **reconhecimento e o respeito à pluralidade e à diversidade individual e cultural**. (Grifou-se).

Já o art. 5º estabelece como objetivos fundamentais da educação ambiental, entre outros:

- I - o desenvolvimento de uma compreensão integrada do meio ambiente em suas múltiplas e complexas relações, envolvendo aspectos **ecológicos, psicológicos, legais, políticos, sociais, econômicos, científicos, culturais e éticos**;
 - II - a **garantia de democratização das informações ambientais**;
 - III - o estímulo e o fortalecimento **de uma consciência crítica sobre a problemática ambiental e social**;
 - IV - o **incentivo à participação individual e coletiva, permanente e responsável**, na preservação do equilíbrio do meio ambiente, entendendo-se a defesa da qualidade ambiental como um valor inseparável do exercício da cidadania; (grifou-se)
- (...)

As erosões de borda de reservatório envolvem desde fatores de ordem física aos de ordem social, e essas citações da legislação pátria realçam a importância da integração da sociedade, assim como de sua educação ambiental, de modo amplo, para que se evitem ou mitiguem os impactos ambientais oriundos da construção dos reservatórios. Veja-se que um dos objetivos da educação ambiental, estabelecidos no art. 5º da Lei nº 9.795/1999, é “(...) **o desenvolvimento de uma compreensão integrada do meio ambiente em suas múltiplas e complexas relações**, envolvendo aspectos **ecológicos, psicológicos, legais, políticos, sociais, econômicos, científicos, culturais e éticos**.” (grifou-se). Para atingir esse e os demais objetivos, assume grande relevância inserir a sociedade na discussão reflexiva dos problemas ambientais, aí se incluindo as erosões de borda de reservatório.

Como exemplo de que a educação preconizada na legislação brasileira precisa ser colocada em prática, uma vez que não se encontra inserida de modo pleno em nosso sistema educacional formal e nem vem sendo praticada com a ênfase necessária na educação não formal, apresenta-se a seguir uma análise de caso.

Há pouco mais de um ano, desde 10 de agosto de 2015, a via que corta o Parque Ecológico Bernardo Sayão, ligando a Estrada Parque Contorno e a QI 27 do Lago Sul, encontra-se interdita por ordem judicial, devido à falta de estudo de impacto ambiental (Figura 1a). A via é passagem de grande número de moradores dos condomínios situados em área próxima, em direção a outras localidades do Distrito Federal, incluindo-se o Plano Piloto. Segundo noticiado, o órgão responsável pela via, NOVACAP, iria elaborar o estudo em um prazo de 90 dias; já se passou mais de um ano e a pretendida interdição se mantém. Pretendida porque, efetivamente, para muitos, ela inexistente desde os seus primeiros momentos (Figura 1b).



Figura 1. a) Via interdita; b) veículo usando desvio, Brasília – DF, 2016 (Fotos: José Camapum de Carvalho).

Esse caso reflete diretamente problemas concernentes à educação, isso na capital do país. A primeira deficiência na educação diz respeito à atuação dos gestores públicos, pois, passados vários governos, ainda não se dispunha dos estudos de impacto ambiental da via sobre o referido Parque Ecológico quando da interdição, e não se sabe ainda se o propalado estudo já está finalizado, o que, por si só, se caracteriza em flagrantes falha e violação da legislação brasileira no que diz respeito à transparência e prestação de contas à sociedade.

A segunda deficiência na educação se estampa no flagrante desrespeito de inúmeras pessoas à ordem judicial (Figura 1b), muitas delas abrindo caminhos alternativos que passam pelo interior do parque e que têm servido como caminho para a deposição de lixo dentro do Parque Ecológico, o que amplia e potencializa a deficiência na educação ambiental (Figura 2).



Figura 2. a) Desvio da via interditada; b) resíduos depositados, Brasília – DF, 2016 (Fotos: José Camapum de Carvalho).

É importante destacar e, talvez seja esse o ponto mais relevante deste estudo de caso, o fato de que se não a totalidade, a quase totalidade dos atores envolvidos no caso, indo dos gestores públicos, passando pelos violadores da ordem judicial e chegando àqueles que têm aberto vias alternativas pelo interior do Parque Ecológico e os que se servem desses caminhos para simplesmente fazerem do Parque um local de deposição de resíduos sólidos, orgânicos ou não, são possuidores de diploma de nível superior em diferentes áreas de formação, o que estampa a deficiência existente não só no que diz respeito à educação ambiental, mas também no que diz respeito às questões sociais, éticas e morais.

Continuando a exemplificar casos de deficiência na educação ambiental, margeia a mesma QI 27, limítrofe do referido Parque Ecológico, um pequeno curso d'água que desagua no lago Paranoá. Destaque-se inicialmente que a QI 27 não dispõe ainda de rede de esgoto, sendo as águas servidas dispostas em fossas geralmente dotadas de sumidouro. Análises recentes apontaram que a água proveniente desse curso d'água com nascente no Parque Ecológico Bernardo Sayão apresentou elevado grau de contaminação por coliformes totais e fecais (AQUINO et al. 2016). Mais uma vez, seja o problema oriundo da contaminação do freático que alimenta o curso d'água, fazendo sobressair a importância da implantação da rede de esgoto na área, que há muito vem sendo protelada, seja devido ao lançamento de águas servidas no curso d'água, os envolvidos no problema são igualmente portadores de diploma de nível superior, contudo, tal cenário persiste, revelando a deficiência presente na educação ambiental, com impacto direto, nesse caso, na qualidade da água do lago Paranoá, reservatório com múltiplas funções. Casos como esse se repetem em todo o país, com lançamento de águas servidas e resíduos sólidos (Figura 3) em cursos d'água e reservatórios, caracterizando uma ampla deficiência na educação ambiental.



Figura 3. Resíduos sólidos lançados em curso d'água, Manaus – 2007 (Foto: José Camapum de Carvalho).

Portanto, esses casos mostram a necessidade de maior ênfase nas educações formal e não formal da sociedade e da inclusão do tema educação ambiental nas discussões em sociedade, visando à elaboração de soluções dos problemas ambientais, seja para evitá-los, seja para mitigá-los. A sociedade como um todo deve ser educada, indo da criança aos profissionais das diferentes áreas de atuação. Não se deve punir a quem não se educa.

4 Disciplinaridade, multidisciplinaridade e as erosões de borda de reservatório

Como já indicado, o inciso I do art. 5º da Lei nº 9.795/1999 estabelece como um dos objetivos fundamentais da educação ambiental:

I - o desenvolvimento de uma compreensão integrada do meio ambiente **em suas múltiplas e complexas relações**, envolvendo aspectos ecológicos, psicológicos, legais, políticos, sociais, econômicos, científicos, culturais e éticos; (grifou-se)

Portanto, embora a concepção, projeto e execução das obras destinadas à edificação de um reservatório envolvam aspectos, na maioria, técnicos, sua inserção no meio ambiente requer tratamento mais amplo que as questões puramente técnicas. Mas, mesmo restringindo-se a abordagem às questões puramente técnicas, concernentes às implantações dos reservatórios, ainda assim, são envolvidas várias especialidades em suas concepções, projetos e execuções das obras. Geralmente, entre outros, integram as equipes técnicas engenheiros de diferentes especialidades, geólogos, geógrafos e biólogos. Portanto, as equipes técnicas são multidisciplinares.

A maioria desses profissionais atua disciplinarmente e, por vezes, interdisciplinarmente. Poucos, no entanto, são aqueles com atuação transdisciplinar, ou seja, que participam diretamente de diferentes atividades devido ao seu conhecimento mais amplo. Geralmente, os profissionais que atuam disciplinarmente possuem conhecimentos profundos a respeito de sua área de atuação, no entanto, quase sempre, falta-lhes a percepção do todo. Já os profissionais que atuam transdisciplinarmente têm a percepção do todo, mas não são profundamente especializados em temas específicos. Os profissionais que atuam interdisciplinarmente podem apresentar qualquer desses dois perfis, mas, geralmente, são ainda versáteis na interlocução.

Abrindo-se agora o planejamento, o projeto e as próprias execuções das obras para a sociedade, torna-se necessária uma abertura dos campos do conhecimento muito maior, o que, introdutoriamente, se materializa na participação, entre outros, de antropólogos, sociólogos, psicólogos e pedagogos. Nesse processo interativo, a educação ambiental deve assumir papel primordial, pois, por meio dela, ações preventivas e/ou mitigadoras de danos ambientais poderão ser viabilizadas.

No caso das erosões de margem de reservatório, o tema é essencialmente multidisciplinar pelas diferentes facetas que podem caracterizar a sua origem e evolução, e a educação ambiental pode assumir papel de grande relevância. Por exemplo, o desencadeamento dos processos erosivos ou sua evolução podem estar associados ao solapamento das bases das encostas pelo impacto das ondas. Essas ondas podem ser naturais ou oriundas do movimento de embarcações. Nesse segundo caso, a simples interdição da passagem de embarcações nas proximidades dos pontos críticos está quase sempre fadada ao insucesso. É preciso educar, conscientizando o usuário da embarcação dos malefícios que sua ação está a causar, para que ele possa aceitar a interdição, caso contrário, recair-se-á no caso da interdição judicial da via que não foi respeitada. É possível perceber que, nesse processo de educação, estarão envolvidos profissionais com diferentes formações: pedagogos, psicólogos, sociólogos, técnicos, etc.

Outro exemplo, agora concernente ao assoreamento dos reservatórios, diz respeito à ocupação e ao uso do solo na bacia de contribuição. Impossível seria, nesse caso, a interdição; talvez até com ela o reservatório perdesse pelo menos em parte a sua função. Suponha-se que o reservatório seja destinado à geração de energia e ao lazer, o que levaria à ocupação de suas margens. No entanto, essa ocupação teria de ser disciplinada, enquanto as vias de acesso à área ocupada e ao próprio reservatório, bem planejadas. Nesse caso, igualmente, não bastam as normas, as regras; faz-se necessária a formação de uma consciência, o que se dará de modo mais fácil e eficiente por meio da educação ambiental, e aqui, mais uma vez, profissionais com várias formações deverão ser envolvidos no processo, sob pena de, na falta da educação e consciência da sociedade, se recair mais uma vez no exemplo da via interdita, que se prestou a ampliar as agressões ao Parque Ecológico por meio da abertura de vias alternativas e do lançamento de resíduos sólidos urbanos.

Portanto, a construção dos reservatórios é um empreendimento com amplo e necessário espaço para a atuação de profissionais com variado perfil disciplinar, transdisciplinar e interdisciplinar, devendo ser lembrado que, na integração reservatório- sociedade, é indispensável a educação ambiental.

5 A erosividade da água, a erodibilidade do solo e as erosões de borda de reservatório

Dada a grande importância para as erosões de borda de reservatório e como causas de assoreamento devido a erosões que ocorrem alhures, tanto a erosividade da água como a erodibilidade do solo foram, por mais de uma vez, assuntos discutidos ao longo deste livro, não cabendo aqui discutir as suas essências, mas sim aquilo que pode afetá-las e frequentemente não é considerado.

A erosividade da água é geralmente avaliada sob a égide de sua força física. No entanto, dadas as alterações da qualidade da atmosfera e, portando, da água da chuva, faz-se necessário intensificar os estudos sobre a ampliação ou redução da erosividade decorrente da alteração da composição química da água da chuva. Nessa mesma linha, precisa-se também avaliar se a interação solo-atmosfera não é afetada pelas modificações que estão ocorrendo na composição química da atmosfera.

As variações térmicas da atmosfera provavelmente também exercerão influência direta sobre a erosividade da água precipitada, que flui na superfície do terreno e nele se infiltra parcialmente. Nessa esteira, observa-se o aquecimento global e igualmente o regional, pois este impacta inclusive no nível de precipitação regional (LUIZ, 2012). Certamente, tais efeitos perniciosos alteram a temperatura da água precipitada e também modificam a temperatura do solo ao longo do perfil. Com isso, impacta-se a erosividade, em razão das variações de viscosidade e de volume da água, associadas às alterações de temperatura da água precipitada e do solo que a recebe. Essas variações devem ser mais bem avaliadas, pois, além de alterarem a erosividade da água, ao afetarem o seu volume, impactam diretamente nas variações volumétricas do solo e na sucção nele atuante.

Ainda no que tange à erosividade da água, é preciso intensificar os estudos sobre as alterações térmicas e químicas das águas dos reservatórios, destacando-se que essas alterações de ordem química não provêm apenas de modificações na qualidade da água precipitada, mas advêm também de poluições oriundas do lançamento de águas servidas diretamente no reservatório ou nos cursos d'água que o alimentam. Também são fontes poluidoras das águas dos reservatórios os insumos e defensivos agrícolas carreados pela água e pelo vento e que nele se depositam. Assim, necessita-se ainda, agora com elo direto com o próprio empreendimento, que se avalie melhor o impacto dos resíduos orgânicos que permanecem na área inundada, notadamente sobre a química e a temperatura da água do reservatório, pois modificações nesses fatores certamente impactarão na erosividade da água, afetando inclusive os processos de solapamento das bases dos taludes. Tais processos de solapamento, inclusive, são potenciais causas de rupturas de taludes e deflagração de processos erosivos.

A qualidade da água precipitada pode, por meio de processos de eluviação ou devido a simples alterações na estabilidade estrutural do solo, afetar seu nível de erodibilidade. No caso dos solos tropicais profundamente intemperizados, essa alteração poderá se dar por meio de eventuais fragilizações da estabilidade dos agregados e das junções entre eles. Já em relação aos solos pouco intemperizados, poderá se dar por meio de modificações das forças de natureza eletroquímica, atuantes entre as partículas do solo.

As alterações sofridas pela água do reservatório podem, além de interferirem na erosividade da água, degradar os maciços de solo existentes em suas margens.

Ainda no tocante a implicações das alterações atmosféricas na erodibilidade do solo, estudos sobre as consequências das variações térmicas na microestrutura e na sucção/capilaridade atuante no solo devem ser ampliados.

Vistos aspectos relevantes a serem mais bem analisados, sobressai, dessas poucas linhas – como de grande importância para o entendimento das erosões em sentido amplo, incluindo-se, portanto, as erosões de borda de reservatório –, a necessidade de análises integradas das modificações que estão provavelmente ocorrendo na erosividade da água e na erodibilidade do solo.

Portanto, tanto a erosividade da água da chuva como a erobilidade do solo, bem assim as duas de modo integrado, merecem ser mais bem exploradas, de modo que se possa avaliar com maior precisão alterações ambientais e modificações originadas por ações antrópicas, pelas quais está passando o planeta. Observa-se, nesse sentido, que o inciso I do art. 5º da Lei nº 9.795/1999 já traz essa preocupação quando coloca como objetivo fundamental da educação ambiental “o desenvolvimento de uma compreensão integrada do meio ambiente em suas múltiplas e complexas relações...”

6 Aspectos físicos e as erosões de borda de reservatório

As erosões são geralmente avaliadas e estudadas considerando-se a externalidade dos aspectos físicos, como os relacionados à cobertura e à morfologia do terreno, à geologia estrutural e à hidrogeologia. Faz-se necessário, dessa maneira, analisar, de modo integrado, a energia interna ao maciço e suas modificações. Por exemplo, como mostrou Jesus (2013), a morfologia de superfície do terreno impacta diretamente na distribuição de tensões e no fluxo interno do maciço, podendo favorecer ou não a deflagração de processos erosivos.

Igualmente, a estrutura dos solos, as rochas e suas orientações são suscetíveis de impactar em maior ou menor intensidade na estabilidade dos maciços, a depender de sua orientação em relação à direção crítica.

A ocupação e uso dos solos das margens dos reservatórios devem se atentar para essas particularidades, sob pena de deflagrarem e/ou acelerarem a ocorrência das erosões. Aqui, além dos estudos e avaliações de ordem técnica, será, em muitos casos, de grande relevância a interação com a sociedade, para que a ocupação e uso do solo sejam compatíveis com os seus limites ambientais de utilização.

7 Aspectos biológicos e as erosões de borda de reservatório

Comumente, atribui-se grande importância à avaliação e ao estudo dos processos erosivos, bem como aos aspectos relacionados à cobertura do solo. No entanto, a fauna e a flora assumem grande relevância na preservação ecológica da estabilidade dos maciços e para a vida no reservatório e em seu entorno. Por exemplo, recentemente, a proliferação de cianobactérias no lago Paranoá, devido ao excesso de agentes orgânicos poluidores nele lançados, tem gerado a mortandade de peixes e tornado a água imprópria para o banho.

Preservar o equilíbrio ecológico requer avaliação dos micro-organismos presentes no solo e na água. Os estudos realizados por Valencia (2009) – voltados para a melhoria do comportamento dos solos tropicais frente aos processos erosivos, por meio de indução na geração de cimentações por bactérias nativas presentes no solo – mostram que a microfauna se constitui em agente modificador da estabilidade estrutural do solo e merece, por isso, ser mais bem avaliada. A título de exemplo, os insumos e defensivos agrícolas geram impacto na microfauna e precisam ser melhor analisados no que concerne a sua influência como agente modificador da erodibilidade do solo. Outra situação, agora fática e de impossível recuperação, diz respeito ao extermínio das bactérias aeróbicas presentes no solo, quando da saturação das áreas de

entorno dos reservatórios. Esse meio passa certamente a ser ocupado por micro-organismos anaeróbicos que desempenham papel muitas vezes distinto dos micro-organismos aeróbicos.

A vegetação natural ou fruto de revegetação assume também grande relevância frente aos processos erosivos de borda de reservatório, não apenas pela cobertura do solo, protegendo-o contra as erosões de superfície, mas também porque suas raízes assumem não só importante função na alteração físico-química dos solos, mas também porque, de acordo com o tipo de vegetação, a retenção de água no solo será maior ou menor, intervindo diretamente na sucção/capilaridade nele atuante e, por consequência, em sua resistência e erodibilidade.

Ainda sobre a cobertura do solo e sua influência no desencadeamento e evolução dos processos erosivos, faz-se oportuno pontuar que a adoção de proteções impermeabilizadoras da superfície do terreno nem sempre é a melhor alternativa, pois, além de afetar a microfauna e a microflora presente no solo, ainda altera a umidade de equilíbrio, e isso nem sempre na direção da melhoria da resistência do solo, pois a condensação da água sob a superfície impermeabilizada pode, somada aos efeitos térmicos, atuar como instabilizadora do solo.

Portanto, faz-se necessário ampliar o olhar para avaliar com mais precisão a influência da fauna, microfauna e da cobertura do solo no desencadeamento e evolução das erosões de borda de reservatório.

8 O monitoramento espacial e as erosões de borda de reservatório

Hoje, a tecnologia de monitoramento da superfície terrestre via imagens de satélite e a disponibilidade do Sistema de Informações Geográficas (SIG) permitem análises e acompanhamento continuado das margens dos reservatórios e de seu entorno, sendo possível monitorar todas as transformações de ordem física e ocupacional pelas quais passam. No entanto, aparentemente, os recursos disponíveis não têm sido utilizados com a presteza e agilidade necessárias ao monitoramento continuado.

As análises de imagens de satélites podem igualmente assumir grande relevância na integração dos aspectos relacionados à erosividade da água e à erodibilidade do solo, discutidos no item cinco desse capítulo. Nascimento et al. (2015) apresentaram o emprego de diversas ferramentas do *Google Earth* para o cadastramento de erosões lineares e laminares.

Para avaliações das erosões de borda de reservatório em escala de maior detalhe, recebe relevância o uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), por permitir uma melhor orientação na obtenção de imagens de destaque.

Apesar de todas essas tecnologias, certamente o melhor e mais eficiente monitoramento se dará com o envolvimento participativo da sociedade, quase sempre dependente da educação ambiental em sentido amplo, ou seja, envolvendo a educação formal e não formal.

9 Considerações finais

As discussões conduzidas ao longo deste capítulo mostraram a necessidade de se intensificar a inter e a transdisciplinaridade nos estudos, análises e avaliações das erosões de borda de reservatório.

Ao longo do capítulo, buscou-se realçar a importância da integração da sociedade em todas as fases de implantação dos reservatórios de água, pois isso será de grande valia inclusive na prevenção e mitigação das erosões de borda de reservatório.

Realçou-se ainda a importância da educação ambiental em sentido amplo, envolvendo a educação formal e não formal, pois educação ambiental requer a construção de uma consciência e não apenas a transferência de conhecimentos.

Agradecimento

Os Organizadores deste livro agradecem aos Coordenadores e Autores dos capítulos por suas valiosas contribuições; a FURNAS Centrais Elétricas S.A., pelo apoio ao projeto de pesquisa sobre erosões de borda de reservatório e à publicação desse livro; ao CNPq; à CAPES; à FAP-GO e à FAP-DF, pelo apoio continuado ao desenvolvimento científico e tecnológico e à formação de recursos humanos, todos fundamentais para o estado da arte apresentado neste livro.

Referências

AQUINO, S.C.N.; COELHO, J.A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. Análise da influência da qualidade da água na compactação de solos tropicais. **45ª RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO e 19º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA**. Brasília, 2016. 13 p.

BRASIL. Lei nº 9.795. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Poder Legislativo. Brasília, DF, 28/04/1999.

JESUS, A. S. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares**: estudo de caso da Cidade de Anápolis – GO. 2013. 340 fl. Tese de Doutorado G.TD – 087/2013, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

LUIZ, G. C. **Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados**: estudo de caso – Município de Goiânia-GO. 2012. 246 fl. Tese de Doutorado G.TD – 075/2012, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

NASCIMENTO, D. T. F. ; ROMÃO, P. A. ; SILVA, S. B. ; SALES, M. M. ; VARGAS, C. A. L.; LUZ, M. P. Emprego do google earth no cadastramento de processos erosivos lineares e laminares. In: XV ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA, 2015, Havana, Cuba. **Anais...** Havana, Cuba. v. 1. p. 1-12. 2015.

PRIMAVERESI, A.B. **Erosão**. São Paulo: Edições Melhoramentos. Criação e Lavoura Nº 18, 1952. 92 p.

VALENCIA, Y. G. **Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos.** 2009. 183 p. Tese de doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

Quando se planeja, se projeta, se executa e se busca manter a qualidade ambiental de um reservatório e seu entorno, surgem questões como: por que erosões? Por que em borda de reservatórios? Erosões podem surgir naturalmente, mas também com novas feições agravadas e intensificadas pela ação humana. Com a construção de reservatórios, altera-se a forma natural de parte da superfície e isso pode desencadear novas erosões. Por outro lado, necessita-se desses reservatórios para viabilizar o desenvolvimento econômico e propiciar bem-estar à população. Entretanto, esta também sofre as consequências diretas das erosões.

Este livro colecionou contribuições de 77 autores, distribuídas em 25 capítulos que apresentam diferentes olhares sobre o tema. O caráter multidisciplinar do tema “Erosões” o torna quase inesgotável. Esta obra faz um recorte das erosões que surgem nas proximidades ou nas bordas dos reservatórios e associa causas e efeitos num olhar mais amplo do problema. Ela está dirigida a estudantes, profissionais e pesquisadores que atuam em obras, projetos ou pesquisas sobre a implantação de reservatórios e seus impactos.

O ponto de partida deste livro encontra-se dentro do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) proposto pela Eletrobras-Furnas e executado por uma parceria entre Furnas/UFG/UnB em um período de quatro produtivos anos, estudando em detalhes as UHEs de Batalha, Furnas e Itumbiara.

Os organizadores desta obra agruparam experiências vividas sobre “erosões” nas últimas décadas, buscando conciliar a técnica com ações não estruturais. Um grande destaque é dado à importância do tema Educação Ambiental como uma das formas mais efetivas para a prevenção de processos erosivos, e, no caso de ocupação das áreas no entorno de reservatórios, isso fica nítido. Completando o esforço na divulgação do tema, outras duas obras foram recentemente lançadas: a cartilha Erosão em borda de reservatório, voltada a alunos após a sexta série do ensino fundamental, e a cartilha Meio ambiente: erosão em borda de reservatório, direcionada aos alunos até a quinta série. Destaca-se que essas obras se destinam também à educação não formal da sociedade.

Instituições Participantes:



Financiado por:



Apoio:



Maurício Martines Sales possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás (1985), mestrado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1988), doutorado em Geotecnia pela Universidade de Brasília (2000) e estágios de pós-doutorado em 2008 na The University of Sydney-Austrália e em 2016 pela Purdue University-USA. Atualmente é professor da Universidade Federal de Goiás, onde leciona no Curso de Graduação em Engenharia Civil e no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Tem experiência em Geotecnia, atuando principalmente nas áreas de In-situ e Análise Numérica. Colaborou na organização do livro *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro* participa da diretoria nacional da ABMS.

José Camapum de Carvalho é graduado em Engenharia Civil pela Universidade de Brasília – UnB e em Administração e Direito pelo Centro Universitário de Brasília – UniCEUB. É mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB e doutor pelo Instituto Nacional de Ciências Aplicadas – INSA de Toulouse, França. Fez pós-doutorado na Universidade Laval, Quebec, Canadá, e participou de curso de treinamento no Japão sob coordenação da Agência de Cooperação Internacional do Japão – JICA. É professor da Universidade de Brasília, onde leciona nos Cursos de Graduação em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental e no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Atua em linhas de pesquisa voltadas para estudos de Solos Tropicais, Solos não Saturados, Meio Ambiente, Obras de Terra, Fundações e Pavimentação. Foi presidente, por duas gestões, do Núcleo Centro-Oeste da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – ABMS e coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Piauí (2000), mestrado em Geotecnia pela Universidade de Brasília (2003) e doutorado em Geotecnia pela Universidade de Brasília (2008). É professora da Universidade Federal de Goiás, onde leciona no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Atua em linhas de pesquisa voltadas para estudos de Solos não Saturados, Reutilização de Resíduos, Erosões e Solos Tropicais. Atualmente é secretária da comissão técnica de Geotecnia Ambiental da ABMS.

Marta Pereira da Luz possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás (2000), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (2003), doutorado em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás (2008) e estágio de pós-doutorado em 2015 na Heriot-Watt University-Escócia. Atualmente é professora no curso de graduação em Engenharia Civil e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás e coordenadora de P&D ANEEL na Eletrobras Furnas. Tem experiência em Geotecnia, atuando principalmente nas áreas de Erosões, Barragens e Rodovias.

Newton Moreira de Souza possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo - São Carlos (1976) com especialização em análise química e mineralogia de solos na Universidade de Florença - Itália (1982), mestrado pela Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba (1984), doutorado em Geotecnia, pela Universidade de São Paulo - São Carlos (1994). Estágio de pós-doutorado em cartografia geoambiental na Universidade Técnica de Berlin (1997) e em cartografia tridimensional na Universidade Nova de Lisboa (2007). Atualmente é professor da Universidade de Brasília, onde leciona nos Cursos de Graduação em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental, e no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Foi coordenador do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e Co-editor das revistas *Solos&Rochas* e *Geotecnia*, membro do corpo consultivo da *Revista Geociências Unesp*, membro representativo e do Conselho Deliberativo da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, sócio representativo, membro do Conselho e presidente da Comissão Técnica de Geotecnia Ambiental da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Orientou mais de cinquenta pós-graduandos nas áreas de Engenharia Civil, Geociências e Desenvolvimento Sustentável. Líder do grupo de pesquisa em Cartografia Geotécnica e Geoprocessamento. Desenvolve pesquisas nos temas: Cartografia Geotécnica Municipal e Urbana, Desastres Associados a Fenômenos Naturais, Solos Tropicais, Erosão e Assoreamento, Modelagem Tridimensional do Espaço Subterrâneo, Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo, Estudos Ambientais Relacionados ao Resíduo Sólido Urbano e Desenvolvimento Sustentável.

Renato Resende Angelim possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás (1996), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás (2000) e doutorado em Geotecnia pela Universidade de Brasília (2011). Atualmente é professor da área de Geotecnia da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás. Tem experiência em Geotecnia, atuando principalmente nas áreas de Ensaios de Campo e Laboratório, Solos tropicais, Erosões, Fundações e Infraestrutura de Transportes. Atualmente é presidente da comissão técnica de investigação de campo da ABMS e da diretoria do núcleo regional da ABMS.