



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**TRANSFORMAÇÕES NO USO DA TERRA E NA ESTRUTURA DE SOLOS NO
CERRADO EM ÁREAS DE EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR – O CASO DA
MICRORREGIÃO DE QUIRINÓPOLIS, GOIÁS**

Adriana Aparecida Silva

Goiânia, agosto de 2012

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Adriana Aparecida Silva		
E-mail:	ueg.adriana@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor	Universidade Estadual de Goiás		
Agência de fomento:		Sigla:	UEG
País:	Brasil	UF:	GO
		CNPJ:	
Título:	Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no Cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar – o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás.		
Palavras-chave:	<i>Saccharum spp</i> ; expansão canavieira; solos do Cerrado; cartografia analítica; microestrutura; compactação		
Título em outra língua:	Changes in land use and soil structure of the Savanna in areas of expansion of cane sugar – the case of microregion of Quirinópolis, Goiás		
Palavras-chave em outra língua:	<i>Saccharum spp</i> ; sugar cane expansion; soil of Cerrado; analytical cartography; microstructure; compaction		
Área de concentração:	Natureza e produção do espaço		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	17/08/2012		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geografia		
Orientador (a):	Dr ^a Selma Simões de Castro		
E-mail:	selma@iesa.ufg.br		

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do (a) autor (a)

Data: ____ / ____ / ____

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG**

S586t	<p>Silva, Adriana Aparecida. Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no Cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar – o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás [manuscrito] / Adriana Aparecida Silva. – 2012. 134 f. : figs, tabs.</p> <p>Orientadora: Profª. Drª. Selma Simões de Castro. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, 2012. Bibliografia. Inclui lista de ilustrações, quadros e tabelas.</p> <p>1. Expansão canavieira – Quirinópolis (GO). 2. <i>Saccharum spp.</i> 3. Solos de Cerrado. 4. Cartografia analítica. I. Título.</p> <p>CDU: 633.61(817.3)</p>
-------	---

Universidade Federal de Goiás
Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geografia

**TRANSFORMAÇÕES NO USO DA TERRA E NA ESTRUTURA DE SOLOS NO
CERRADO EM ÁREAS DE EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR – O CASO DA
MICRORREGIÃO DE QUIRINÓPOLIS, GOIÁS**

Adriana Aparecida Silva

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geografia da Universidade Federal de Goiás,
para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de concentração: Natureza e Produção do
Espaço.

Orientadora: D^a. Selma Simões de Castro

Goiânia, agosto de 2012

ADRIANA APARECIDA SILVA

**TRANSFORMAÇÕES NO USO DA TERRA E NA ESTRUTURA DE SOLOS NO
CERRADO EM ÁREAS DE EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR – O CASO DA
MICRORREGIÃO DE QUIRINÓPOLIS, GOIÁS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do título de Doutor em Geografia, defendida no dia 17 de agosto de 2012, na presença da banca examinadora constituída pelos seguintes doutores:

Prof^a. Dr^a. Selma Simões de Castro – IESA/UFG

Presidente da Banca

Prof. Dr. Alfredo Borges de Campos - IESA/UFG

Membro

Prof. Dr. Márcio Henrique de Campos Zancopé - IESA/UFG

Membro

Prof. Dr. Miguel Cooper - ESALQ/USP

Membro

Prof^a. Dr^a. Vladia Correchel - EA/UFG

Membro

Dedico esta tese para vovó Cadinha
(*in memoriam*)

Agradecimentos

“Não há conquistas sem sacrifícios”, mas, existem pessoas que tornam o caminhar mais suave... a mamãe Neusa, sempre presente, me apoiando em gestos, palavras e rezando por mim; o sobrinho Netto; o irmão Dr. Ademir, orgulho intelectual da família; os amigos, em especial Dr^a Mary Barbalho e o super Dr. Marcelo de Mello.

À prof^a Dr^a Selma Simões de Castro, pela orientação e por despertar em mim, ao longo de minha formação em geografia, o interesse em estudar as Ciências da Terra.

Às companheiras da “cana de Quirinópolis” Georgia e Vonedirce.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa Científica, Projeto nº 479010-2009/9 de financiamento de programa de pesquisa, no qual se enquadra o presente estudo.

À FAPEG - Fundação de Amparo à Pesquisa em Goiás, que me contemplou com bolsa de formação.

À UEG - Universidade Estadual de Goiás, pela concessão de licença para aperfeiçoamento e aos colegas da Unidade Cora Coralina, da Cidade de Goiás, pelo apoio irrestrito.

À UFG - Universidade Federal de Goiás, ao IESA - Instituto de Estudos Socio-Ambientais e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, onde me fiz geógrafa.

Ao LABOGEF - Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física, pela infraestrutura para realização das análises e aos seus membros pelas discussões profícuas, em especial aos professores Dr. Alfredo Borges de Campos, pelas contribuições no exame de qualificação e defesa e ao Doutorando Luis Cherem, pela contribuição na análise das imagens.

Ao CIAMB – Doutorado em Ciências Ambientais, na pessoa do Dr. Fausto Miziara, e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, na pessoa da Dr^a Vladia Correchel, pela possibilidade de realização de disciplinas e de utilização do Laboratório de Física de Solos da EA/UFG. A estes professores pelas contribuições ao longo do doutorado.

À Usina São Francisco de Quirinópolis pela logística para a realização dos trabalhos de campo, em especial, ao geógrafo Marcos Gondim, o Engenheiro Agrônomo José Carlos Caldeira e o técnico Luiz.

Aos mestres em Solo e Água Ronaldo Filho e Felipe dos Santos, pela colaboração em campo e laboratório. A Mayra F.Tavares da Universidade de São Paulo, pela classificação das imagens. Ao Sr. Mário Veisac, técnico da UFOP, pela elaboração das lâminas delgadas. Aos motoristas da UFG Sr. Edmar e Sr. José Martins, pelo apoio em campo. À Katuscia Costa pela tradução dos resumos.

Por fim, aos inventores da prótese Amplatz, sem a qual meu coração estaria partido.

“Deus não joga dados.” (Einstein)

SUMÁRIO

Lista de figuras	viii
Lista de quadros	xi
Lista de tabelas	xii
Resumo	xiii
Abstract	xiv
Introdução	15
CAPITULO 1 - Caracterização da área de pesquisa	19
1.1 Caracterização do meio físico da microrregião de Quirinópolis, Goiás	19
1.2 Dinâmica de uso da terra e expansão da cana-de-açúcar entre os anos de 2004 a 2010, na microrregião de Quirinópolis, Goiás	31
CAPITULO 2 - Fundamentos teóricos e metodológicos da pesquisa	46
2.1 Considerações históricas sobre a expansão da cana-de-açúcar no Brasil e em Goiás ..	46
2.2 Compactação de solos agrícolas	52
2.3 Indicadores estruturais de qualidade física dos solos	55
2.4 Roteiro metodológico geral da pesquisa	62
2.5 Delineamento e localização dos perfis amostrais	66
2.6 Seleção de indicadores de avaliação da qualidade física do solo	73
CAPITULO 3 - Potencial e risco de compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, sudoeste do estado de Goiás	76
3.1 Capacidade de uso das terras	78
3.2 Discrepância entre uso e capacidade de uso das terras	80
3.3 Potencial de compactação dos solos	83
3.4 Risco à compactação dos solos	85
CAPITULO 4 - Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física do Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar na microrregião de Quirinópolis, Goiás	90
4.1 Indicadores macro e micromorfológicos de qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico	92
4.2 Indicadores macro e micromorfológicos de qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico	105
CAPITULO 5 – Síntese multiescalar e multicriterial comparada dos resultados	117
Conclusões	124
Referências bibliográficas	126

Lista de figuras

Figura 01: Mapa de localização da microrregião de Quirinópolis, Goiás	19
Figura 02: Expansão da cana-de-açúcar por município na microrregião de Quirinópolis entre 2006 e 2012 em ha por safra	21
Figura 03: Dez maiores produtores de cana-de-açúcar do Estado - safra 2011/2012	22
Figura 04: Parâmetros climáticos: (a) Precipitação em mm (b) Temperatura em °C, referentes à estação situada no município de Quirinópolis, Goiás, ano exemplo 2009	22
Figura 05: Risco agroclimático para o plantio de cana-de-açúcar entre 01 de junho a 30 de setembro para a reserva de água no solo de 50 mm	23
Figura 06: Disponibilidade Atual de Água no Solo (DAAS), em mm	24
Figura 07: Mapa geológico da microrregião de Quirinópolis, Goiás	25
Figura 08: Mapa geomorfológico da microrregião de Quirinópolis, Goiás	26
Figura 09: Mapa hipsométrico da microrregião de Quirinópolis, Goiás	27
Figura 10: Mapa de declividade da microrregião de Quirinópolis, Goiás	28
Figura 11: Mapa de solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás	29
Figura 12: Mapa de vegetação original da microrregião de Quirinópolis, Goiás	30
Figura 13: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2004	32
Figura 14: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2006	34
Figura 15: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2008	35
Figura 16: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2010	37
Figura 17: Evolução de uso dos solos da microrregião de Quirinópolis de 2004 a 2010 ...	40
Figura 18: Área atual de cana-de-açúcar em relação à substituição aos usos anteriores do solo	41
Figura 19: Dinâmica da expansão da cana-de-açúcar na microrregião de Quirinópolis, Goiás por tipo de uso anterior da terra	41
Figura 20: Mapa do Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar para o estado de Goiás considerando o uso atual das áreas	48
Figura 21: Mapa dos eixos de expansão da cana em Goiás	49
Figura 22: Mapa dos polígonos de cana-de-açúcar na mesorregião Sul Goiano, com destaque para as microrregiões Quirinópolis e Meia Ponte	51
Figura 23: Sequência de etapas e procedimentos utilizados para a elaboração dos mapas de uso da terra (solo) indicando os métodos e ferramentas utilizadas	63
Figura 24: Sequência dos cruzamentos e produtos gerados	65

Figura 25: Mapa de localização dos perfis de solos na microrregião de Quirinópolis, Goiás	69
Figura 26: Foto - Área cultivada sobre a palhada da cana-de-açúcar	71
Figura 27: Foto - Paisagem da área do perfil 6B com LVdf relativo à sucessão pastagem/soja/cana	71
Figura 28: Foto - Cabeleira da cana (SP 813250) cultivada em solo LVdf compactado, perfil 1B	71
Figura 29: Foto - Exemplo de perfil de solos LVd, não fertirrigado. Perfil 4B	71
Figura 30: Foto - Perfil de solo LVdf, compactado, perfil 2B.....	71
Figura 31: Foto - Detalhe da compactação do perfil 2B de solo LVdf	71
Figura 32: Foto – Exemplo de procedimentos para descrição morfológica do perfil	72
Figura 33: Foto – Coleta de amostra indeformada em caixa retangular de papel cartão branco nas dimensões 12x7x6	72
Figura 34: Foto – Realização de ensaio de resistência mecânica à penetração no solo	72
Figura 35: Foto – Coleta de amostras deformadas de solo	72
Figura 36: Foto – Laboratório de micromorfologia de solos	72
Figura 37: Mapa da capacidade de uso das terras da microrregião de Quirinópolis, Goiás	79
Figura 38: Mapa da discrepância entre capacidade de uso e uso das terras em 2004 na microrregião de Quirinópolis, Goiás	81
Figura 39: Mapa da discrepância entre capacidade de uso e uso das terras em 2010 na microrregião de Quirinópolis, Goiás	82
Figura 40: Discrepância comparada entre os anos de 2004 e 2010 na MRQ	83
Figura 41: Mapa do potencial de compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás	84
Figura 42: Mapa de risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao uso de 2004	86
Figura 43: Mapa de risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao uso de 2010	87
Figura 44: Dinâmica do risco à compactação na MRQ entre os anos de 2004 e 2010	88
Figura 45: Distribuição dos valores de DS, PT e MO nos perfis de Latossolo Vermelho distroférico	96
Figura 46: Valores de RP em profundidade dos solos Latossolo Vermelho distroféricos	98

Figura 47: Distribuição dos componentes do fundo matricial das lâminas delgadas dos perfis de LVdf	101
Figura 48: Distribuição relativa dos horizontes do LVdf	102
Figura 49: Fotomicrografias das lâminas delgadas dos horizontes representativos dos perfis de LVdf	104
Figura 50: Valores de RP em profundidade nos Latossolo Vermelho distróficos	109
Figura 51: Distribuição dos componentes do fundo matricial das lâminas delgadas dos perfis de LVd	110
Figura 52: Distribuição relativa dos horizontes do LVd	111
Figura 53: Fotomicrografias das lâminas delgadas dos horizontes representativos dos perfis de LVd	114
Figura 54: Mapa do potencial de compactação dos solos e sua relação espacial com as áreas de expansão de cultivo de cana-de-açúcar nos anos de 2006, 2008 e 2010	119

Lista de quadros

Quadro 01: Classificação dos poros do solo e algumas funções	59
Quadro 02: Chave de interpretação das imagens de satélite Landsat TM5, 2004 a 2010 ..	64
Quadro 03: Preparo do solo utilizado nos oito pontos amostrais com cultura de cana-de-açúcar na região de Quirinópolis, Goiás	67
Quadro 04: Caracterização dos perfis de solo estudados	68
Quadro 05: Profundidade e manejo dos horizontes e perfis descritos em campo	69
Quadro 06: Atributos morfológicos do Latossolo Vermelho distroférico	93
Quadro 07: Atributos morfológicos do Latossolo Vermelho distrófico	106

Lista de tabelas

Tabela 01: Dados de uso da terra na MRQ em 2004	33
Tabela 02: Dados de uso da terra na MRQ em 2006	34
Tabela 03: Dados de uso da terra na MRQ em 2008	36
Tabela 04: Dados de uso da terra na MRQ em 2010	38
Tabela 05: Expansão da cana-de-açúcar na MRQ entre 2004 e 2010	39
Tabela 06: Dados comparativos da dinâmica das classes de uso entre os anos: 2004/2006, 2006/2008 e 2008/2010, com base sempre no ano anterior	39
Tabela 07: Síntese da dinâmica de expansão da cana-de-açúcar entre 2004 e 2010	42
Tabela 08: Tipo de solos em áreas com cana-de-açúcar	43
Tabela 09: Tipo de Latossolo em área com cana-de-açúcar	43
Tabela 10: Classes e pesos considerados no mapa de potencial de compactação dos solos	66
Tabela 11: Classes e pesos considerados no mapa de risco à compactação dos solos	66
Tabela 12: Classe de capacidade de uso das terras da microrregião de Quirinópolis, Goiás	79
Tabela 13: Níveis de discrepância entre capacidade de uso e uso das terras em 2004 na microrregião de Quirinópolis, Goiás	80
Tabela 14: Discrepância entre capacidade de uso e uso das terás em 2010 na microrregião de Quirinópolis, Goiás	82
Tabela 15: Potencial de compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás .	84
Tabela 16: Risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao uso do ano de 2004	86
Tabela 17: Risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao ano de 2010	87
Tabela 18: Atributos físicos e teor de matéria orgânica do Latossolo Vermelho distroférico	95
Tabela 19: Caracterização micromorfológicos do Latossolo Vermelho distroférico	100
Tabela 20: Atributos físicos e teor de matéria orgânica do Latossolo Vermelho distrófico	107
Tabela 21: Caracterização micromorfológicos do Latossolo Vermelho distrófico	112
Tabela 22: Áreas de cultivo de cana-de-açúcar em relação ao potencial de compactação e ao ano mapeado	118

RESUMO

O estado de Goiás se destaca no processo atual de expansão da cana-de-açúcar, estando hoje entre os três estados com maior área cultivada e produção. Por questões logísticas, edafoclimáticas e de interesses econômicos sua mesorregião sul sobressai, sobretudo a microrregião de Quirinópolis (MRQ), onde o processo de expansão se iniciou a partir de 2004, cuja primeira safra ocorreu em 2006/2007. A amplitude dessa expansão refere-se a 5 mil ha em 2006, 50 mil ha em 2008, chegando em 2010 a 116 mil ha. Apesar das políticas públicas apontarem as áreas com pastagem degradada como alvos preferenciais de expansão, a MRQ, no entanto, substituiu inicialmente áreas onde havia o cultivo de grãos, principalmente soja, seguindo-se de áreas com pastagem extensiva, mas não necessariamente degradada. O processo de expansão da cana-de-açúcar na MRQ ocorreu primeiramente em Latossolos Vermelho distroféricos (LVdf) de textura argilosa, em substituição às áreas de cultura anual, para em um segundo momento, esgotada a oferta dessas áreas, substituir áreas de pastagem nos Latossolos Vermelho distróficos (LVd) de textura média. Tais solos relacionam-se à Capacidade de uso AII, com Potencial muito alto de compactação em decorrência da sua textura argilosa a muito argilosa e à Capacidade de uso BVI, de alto Potencial de compactação em decorrência de textura média. A cana-de-açúcar é considerada cultura semiperene que, por fazer uso de maquinário pesado em todas as fases do processo agrícola, é também considerada como de alto potencial à compactação dos solos quando estes apresentam texturas médias a muito argilosas, como é o caso. Nesse sentido, a hipótese desta tese é que a expansão do cultivo da cana-de-açúcar na MRQ apresentou compactação variando em relação aos diferentes tipos de solos e manejos adotados. Dentre os tipos de manejo, destaque para o uso de fertirrigação com vinhaça. A metodologia geral da pesquisa partiu dos estudos de evolução do processo de expansão da área cultivada, com destaque para as áreas de risco ao processo, onde foram selecionados perfis de solos sob cultivo, todos submetidos ao mesmo preparo inicial e no quarto ciclo da cultura, variando o manejo e o histórico de uso, além de perfis de solos em áreas de vegetação natural, consideradas como controle. Neles procedeu-se às descrições macro e micromorfológicas, análises de fertilidade, ensaios de resistência e determinações em laboratório relativas à densidade e porosidade, incluindo-se estudos de morfoporosidade com análise de imagens sobre lâminas delgadas. Os resultados confirmaram a expansão rápida das áreas plantadas, inicialmente sobre áreas antes de soja, onde já se consolidou, e revelaram ainda que os citados solos apresentaram risco alto a muito alto de compactação e presença indiscutível de degradação da qualidade física resultante desse processo, corroborada pelos indicadores de aumento da resistência à penetração, dispersão de argila e densidade do solo, acompanhados da redução da macroporosidade e de mudanças na morfoporosidade que passa de intergranular a fissural descontínua à medida que a microestrutura evolui de microagregada a porfírica (compacta). Conclui-se que a compactação, por ser relativamente superficial ou rasa, pode ser associada aos efeitos das práticas de manejo com máquinas pesadas, porém até o momento estudado, com efeitos atenuados pelo uso de fertirrigação com vinhaça.

Palavras-chave: *Saccharum spp*; expansão canavieira; solos do Cerrado; cartografia analítica; microestrutura; compactação.

ABSTRACT

The state of Goiás stands out in the current process of expansion of Sugar Cane and is now among the three States with the largest acreage and production. Due to logistical reasons, soil and climatic as well as economic interests its Southern central region is highlighted, with special emphasis on Quirinópolis (MRQ) where the expansion process has started in 2004 and the very first harvest happened in 2006/7. The extent of this expansion depicts 5000 ha in 2006, 50 000 hectare in 2008, reaching 116,000 ha in 2010. Although public policies indicate degraded areas of pasture as targets of expansion, MRQ, however, firstly replaced grain cultivation areas, especially soybean, followed by areas with extensive pasture, but not necessarily degraded. The expansion process of sugar cane in MRQ first occurred in Dystroferic Red Latosol (LVdf) of clayey texture in replacement of areas of annual crop as the second step; once the supply of these areas is exhausted pasture areas in medium textured Dystrophic Red Latosol (LVd) are replaced. These soils are related to the usage capacity of IIA, with very high compression potential due to its clayey to very clayey texture, moreover the usage capacity of BVI of high compaction potential caused by medium texture. The sugar cane crop is considered subterrene and because of the use of heavy machinery in all stages of the agricultural process, it is also considered as high potential of soil compaction when the soil presents medium to very loamy textures. Therefore, the hypothesis of this thesis is that the sugar cane cultivation expansion in MRQ led to compression in varying degrees depending on soil types and managements adopted, among which be or not to be fertigated with stillage. The general methodology of the research originated from the cultivated area expansion process, with process risk, and selected representative soil profiles of the two soil types indicated, all treated with the same initial preparation and also during the fourth cycle, varying the management and land use background, and profiles in natural vegetation areas, considered as control. Macro and micromorphological descriptions along with fertility analyzes were made, as well as endurance tests and laboratory determinations concerning the density, porosity. Furthermore, studies with morphoporosity followed by image analysis on thin blades were carried out. The results confirmed the rapid expansion of planted areas, initially on areas before soybeans, which have been consolidated, and also revealed that the soils had shown high to very high compression risk. It is important to mention the unquestionable degradation of physical quality resulting from this process, supported by known indicators of increased penetration resistance, dispersion of clay and soil density, accompanied by the reduction of the macroporosity and changes in morphoporosity from discontinuous intergranular fissure as the microstructure evolves from the microaggregate to porphyric (compact) . It is concluded that compression, as though relatively superficial or shallow, can be associated with the effects of management practices with heavy machinery, but studies so far, can be mitigated by the use of fertirrigation with stillage.

Keywords: *Saccharum spp*; sugar cane expansion; soil of Cerrado; analytical cartography; microstructure; compaction.

Introdução

Compreender a dinâmica da paisagem do Cerrado na atualidade requer conhecer as mudanças de uso da terra e nelas incluir a expansão recente da cana-de-açúcar, que vem ocorrendo desde o final dos anos de 1990, rumo ao centro do Cerrado, especialmente nos estados de Mato Grosso do Sul e Goiás que passaram a se destacar como alvo desse processo desde 2004 (NASSAR *et al.*, 2008). Goiás, que até então não se destacava no setor (exceto por uma usina considerada modelo, a Jales Machado, em Goiatuba), na safra 2011/12 ocupa a terceira posição no *ranking* nacional de produção sucroalcooleira (CONAB, 2012), apresentado para a próxima safra 2012/2013 uma área plantada destinada à produção de açúcar e álcool equivalente a 732,02 mil ha (8,54% da área plantada no país). Com esta área de produção Goiás fica atrás apenas do estado de São Paulo, embora muito distante, já que sua área de produção foi de 4.426,45 mil ha (51,66% da área total do país) e de Minas Gerais, embora tecnicamente empatado, pois que sua área é de 768,64 mil ha (8,97%) (CANASAT, 2012).

As estatísticas (área plantada e colhida, produção e produtividade) revelam rapidez e intensidade desse processo recente em Goiás, o que mostra a necessidade de se avaliar as consequências dessa expansão tão rápida, considerando-se que Goiás é também grande produtor de grãos e carne bovina. Dentre os elementos considerados para explicar esse ritmo de expansão destaca-se o cenário ambiental internacional, focado na busca por energias renováveis, favorecido ainda pela média a elevada aptidão edafoclimática (MAZATTO *et al.*, 2009) e pedogeomorfológica do centro-sul do Cerrado (CASTRO *et al.*, 2007), além da logística favorável (SILVA; MIZIARA, 2011).

Mudanças na forma de uso e ocupação agrícola das terras devem ser consideradas a partir de diversas perspectivas, inclusive de escala, porque a inserção de alguns elementos pode alterar todo o agrossistema. No presente caso, as mudanças causadas pela substituição de culturas, aqui consideradas como agentes modificadores da paisagem e dos diversos elementos que a compõem, tendem a comprometer, dentre outros elementos, os solos, podendo repercutir nas diversas escalas, desde as visíveis ao olho nu, como as megascópicas e macroscópicas (da paisagem e perfis de solos, respectivamente), até as invisíveis ao olho nu, como as microscópicas, representadas pela organização elementar dos constituintes dos solos (argila, areia, silte, matéria orgânica, etc.) e pela morfologia do seu espaço poroso, que permite avaliar suas funções ou serviços ambientais (COOPER, 1999; QUEIROZ NETO, 2000; CASTRO *et al.*, 2003; VIDAL-TORRADO *et al.*, 2005).

A agricultura, quando mal praticada, pode levar à perda da capacidade produtiva dos solos em médio e longo prazo, possibilitando a instalação de processos de degradação relacionados ao desequilíbrio de suas propriedades, tais como, a instabilidade estrutural dos agregados dos solos, considerada por numerosos autores como um dos primeiros e principais fatores no processo de perda de fertilidade e erosão dos solos. Estudos destacam que a cultura da cana-de-açúcar promove impactos ao meio ambiente (ar, água, solo), nas diversas etapas do processo produtivo. Dentre os impactos que afetam mais diretamente os solos, destaca-se a compactação causada pelo uso de maquinário pesado no manejo, devido seu peso (carga) e sucessivas passagens (preparo, sulcamento, adubação, controle químico de pragas, cultivo mecânico, transporte dos colmos e colheita), na dependência da condição de umidade do solo (PASQUALETTO; ZITO, 2000; UNICAMP/UNICA, 2005; DONZELLI, 2005; WWF, 2008; EMBRAPA, 2011).

As análises de macromorfologia (perfis de solo) e micromorfologia (das microestruturas), além dos parâmetros analíticos de física de solos, contribuem para a dedução dos processos e mecanismos atuantes nos ambientes morfopedológicos e hidropedológicos que se sucederam ao longo do tempo. São, portanto, uma ferramenta essencial para o entendimento da dinâmica dos solos submetidos às mudanças de uso e manejo, as quais podem induzir, também, mudanças estruturais, pedogeoquímicas e mineralógicas, fazendo desaparecer ou surgir novas estruturas e comportamentos, influenciando no potencial de aproveitamento do solo (CASTRO *et al.*, 2003; CASTRO, 2008). Certo é que, dependendo da forma do manejo e do tipo do solo, além do histórico de uso e manejo, bem como das características dos terrenos, pode haver comprometimento na estrutura do solo, através da desestabilização dos macro e microagregados, como por exemplo, através da compactação (KERTZMAN, 1996).

A área de estudo da presente pesquisa, a Microrregião de Quirinópolis (MRQ), foi considerada como um cenário representativo desse processo recente de expansão da cana-de-açúcar em Goiás, já que além de praticamente não ter cana-de-açúcar até 2004, desenvolveu um processo de expansão da ordem de 2.213% até 2012 (CANASAT, 2012). Fato devido ainda a elevada concentração de usinas e de áreas plantadas (mais de 120.000 ha em 2012, segundo o CANASAT, 2012), além da relevância no processo por conter duas das maiores usinas do estado, em *joint venture* com a Cargill e a Petrobrás, contribuir com cerca de 20% do total de área plantada e da produção no Estado e praticar a co-geração de energia. Considerando-se a área total de cultivo na safra 2011/2012, dentre outros aspectos, lhe

conferiu o *status* que Borges (2011) identificou como sendo o de novo polo nacional da agroindústria da cana-de-açúcar, o qual denominou de “Nova Centralidade Sucroenergética no Cerrado”, corroborando avaliação preliminar de Castro *et al.* (2010).

A MRQ além de se destacar pela elevada concentração de usinas/destilarias de açúcar e etanol, com sete unidades industriais, conta com três dos dez maiores municípios produtores de cana-de-açúcar em Goiás, sendo eles Quirinópolis com área de produção de 48.233 ha, Gouvelândia com área de produção de 23.245 ha e Caçu com área de produção de 20.261 ha, respectivamente primeiro, sexto e décimo no *ranking* estadual (CANASAT, 2012).

Convém lembrar que como demonstrado por Borges (2011) para a MRQ, por Abdala e Castro (2010) para a Microrregião do Meia Ponte, e por Silva e Castro (2011) para o estado de Goiás, confirmando o exposto por Nassar *et al.* (2008), a expansão da cana-de-açúcar deu-se preferencialmente sobre áreas antes ocupadas com culturas anuais, principalmente soja, ainda que na MRQ tivesse, e ainda mantenha, a atividade pecuária como dominante. Some-se a isso que observações preliminares dos solos das áreas preferenciais de expansão, sobretudo os Latossolos Vermelhos, permitiram constatar seu elevado potencial de compactação devido sua textura média e, sobretudo argilosa, associada ao manejo altamente tecnificado e à intensidade do processo.

Revisões da literatura mostraram ainda que o plantio na palha e a fertirrigação com vinhaça, práticas usuais nessas áreas, pode levar a uma melhoria da agregação e consequentemente da porosidade do solo. A vinhaça, em particular, apresenta potencial de recuperação dos solos, devido fornecer elevado teor de matéria orgânica, mas pode também levar à contaminação de solos e águas e mudanças nas respectivas biotas, cujos efeitos são pouco conhecidos.

Assim, a hipótese desta tese é de que a expansão do cultivo da cana-de-açúcar na MRQ, sobre os Latossolos de textura argilosa a média, antes ocupados por culturas anuais e pastagem, respectivamente, levou a mudanças na sua estrutura, marcadas por diferentes graus de compactação, impacto típico de áreas de cultivo altamente tecnificado da cana-de-açúcar, admitindo-se variações resultantes do tipo de manejo da fertilidade, ou seja, com e sem fertirrigação com vinhaça. Assim, a pesquisa objetivou realizar uma avaliação espacial do processo de expansão acelerada da cana-de-açúcar na MRQ e pontual da macro e microestrutura de perfis de Latossolos representativos da expansão e da sucessão de uso, ou seja, grãos/cana, pasto/cana e pasto/soja/cana, de modo a obter os indicadores de compactação. Para tanto, visou especificamente:

1. Avaliar historicamente as mudanças recentes do uso e ocupação das terras na MRQ, identificando as áreas preferenciais da expansão de cultivo da cana-de-açúcar e suas relações com os usos anteriores (grãos, pasto), entre os anos de 2004 a 2010, considerando o uso do ano de 2004 como o anterior ao processo de expansão e o ano de 2010 como relativo ao uso atual.

2. Avaliar a Capacidade de Uso das Terras identificando e mapeando os graus de Discrepância, entre ambas, com ênfase nas áreas de expansão, de modo a reconhecer as áreas mais críticas;

3. Avaliar o Potencial de Compactação dos solos e as áreas de Risco à Compactação considerando o uso de maquinário pesado e os tipos de uso anterior e atual da terra no período;

4. Avaliar os graus de compactação dos Latossolos Vermelho distroféricos (LVdf) de textura argilosa e os Latossolos Vermelho distróficos (LVd) de textura média, representativos, principalmente quanto às mudanças nas macro e microestruturas.

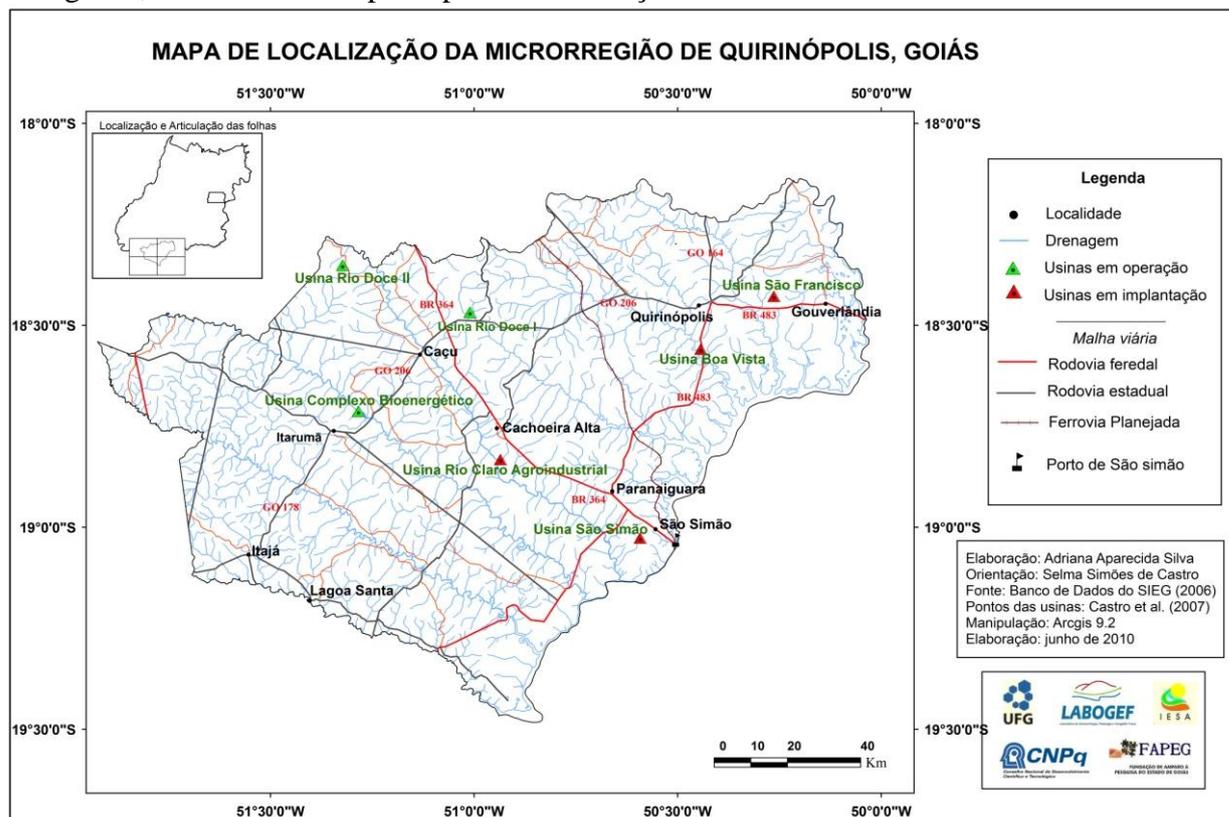
CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

1.1 Caracterização do meio físico da microrregião de Quirinópolis, Goiás

A MRQ localiza-se na região de planejamento denominada de Sudoeste de Goiás, pertencente à mesorregião Sul Goiano. Possui uma área total de 16.068,103 km² e é composta por nove municípios: Cachoeira Alta, Caçu, Gouvelândia, Itajá, Itarumã, Lagoa Santa, Paranaiguara, Quirinópolis e São Simão. Como diferencial no setor agrícola, apresenta vantagens logísticas para a distribuição e escoamento da produção, uma vez que nela se situa o Porto de São Simão, o qual compõe trecho da Hidrovia Paranaíba-Tietê-Paraná, o poliduto (gasoduto, petroduto e alcoolduto) que interliga Campinas (SP) a Brasília (DF), passando pela mesorregião Sul Goiano no município de Senador Canedo, pertencente à região Metropolitana de Goiânia, além das rodovias pavimentadas GO 164, que se liga à BR 060 e 452 e GO 206, que se liga por sua vez à BR 364 e 483 (figura 01).

Figura 01: Mapa de localização da microrregião de Quirinópolis, Goiás, indicando a hidrografia, o sistema viário principal e a localização das usinas em 2010.



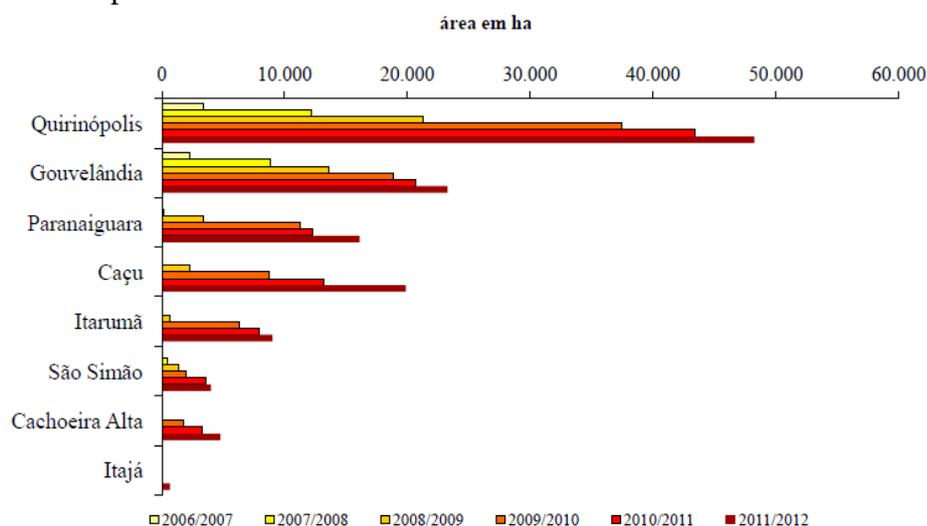
A MRQ possui sete usinas instaladas, sendo que quatro se encontram devidamente cadastradas junto ao Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento e outras três se encontram em processo de licenciamento (MAPA, 2010). As usinas cadastradas e já em operação são: a Usina São Francisco, razão social U. S. J. Açúcar e Álcool S/A, tendo sido registrada em 22 de março de 2006, se situa no município de Quirinópolis e se destina à produção mista de açúcar, etanol e energia; a Usina Boa Vista, razão social Usina Boa Vista S/A, registrada em 18 de abril de 2008, que se situa também no município de Quirinópolis e se destina à produção de etanol; a Usina São Simão, razão social Energética São Simão S/A, registrada em 25 de junho de 2008, que se situa no município de São Simão e se destina à produção mista de açúcar e etanol; por fim, a Usina Rio Claro, razão social Rio Claro Agroindustrial S/A, registrada em 03 de agosto de 2009, que se situa no município de Caçu, destinada à produção de etanol (MAPA, 2010). As demais usinas: Rio Doce I, situada em Cachoeira Alta, Rio Doce II, situada em Caçu e Usina Complexo bioenergético, situada na divisa entre Caçu e Itarumã se encontram em fase de implantação.

Analisando a localização e datas de registro das usinas em operação e implantação, pode-se perceber que o processo de expansão veio ocorrendo de nordeste para sul e noroeste, uma vez que as usinas com maior tempo em atividade, cadastradas junto ao MAPA, se situam na porção nordeste. Em relação à data de registro é possível considerar esta mesma tendência de nordeste para sul e noroeste, iniciando com a Usina São Francisco, seguida pela Usina Boa Vista, Usina São Simão e Usina Rio Claro. Tal tendência, como já fora observado por Castro *et al.* (2007), se deve ao fato da ocupação se iniciar em áreas de cultura anual, aonde se encontram os solos com maior aptidão à cultura canavieira e, posteriormente, ocupar áreas de pastagem, com menor aptidão. Essa tendência também pode ser constatada para todo o estado de Goiás, conforme os estudos realizados por Castro *et al.* (2010) e Silva; Mizziara (2011).

O início do processo de inserção da cana-de-açúcar para produção sucroalcooleira na MRQ data de final de 2004, com início da produção em 2006 para colheita em 2007, quando se obteve uma área de produção de 5.688 ha, sendo 2.270 ha no município de Gouvelândia e 3.418 ha em Quirinópolis. Na safra 2007/2008 a área de produção passou para 21.633 ha com predominância em Quirinópolis e Gouvelândia, porém, com a inserção de outros dois municípios, São Simão e Paranaiguara. Na safra 2008/2009 a área de produção já abrangia seis municípios: incluindo Caçu e Itarumã à lista anterior, cobrindo uma área total de 42.542 ha. Na safra 2009/2010, um sétimo município inicia a produção, Cachoeira Alta, totalizando uma área de produção de 86.401 ha, que na safra 2010/2011 chega a 104.226 ha. Os últimos

dados disponíveis se referem à safra 2011/2012 quando um novo município é inserido no processo produtivo, Itajá, com área inicial de 674 ha, compondo a produção da microrregião que atinge 125.896 ha nesta safra (CANASAT, 2012) (figura 02).

Figura 02: Expansão da cana-de-açúcar por município na microrregião de Quirinópolis entre 2006 e 2012 em ha por safra.

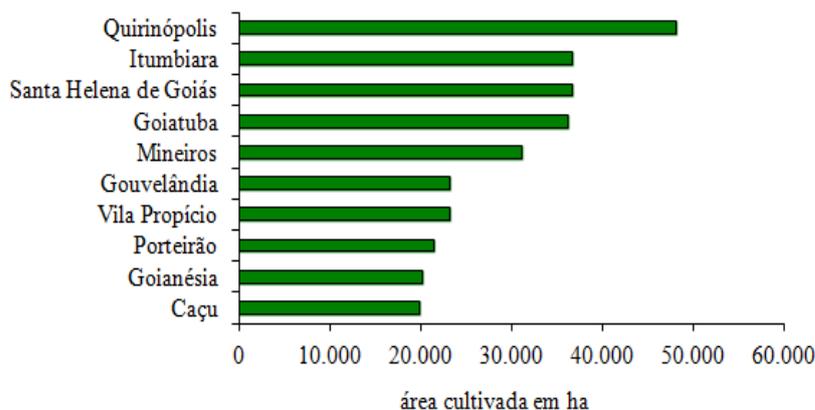


Fonte: CANASAT (2012). Org. da autora.

Considerando-se a área total de cultivo na safra 2011/2012, o processo de expansão foi da ordem de 2.213% neste curtíssimo período de seis anos. É indiscutível o destaque para o seu município-sede, Quirinópolis, com 38,31% da área plantada de produção, seguido por Gouvelândia com 18,46% e por Caçu, que atualmente representa 15,78% da área de produção total da MRQ.

Dentre os municípios da MRQ, apenas Lagoa Santa permanece até o momento sem registro de áreas cultivadas com cana-de-açúcar ou instalação de usinas. Em contrapartida, outros três se destacam entre os dez municípios com maior área de produção de cana-de-açúcar do estado, que alcança em 2012 pouco mais de 730.000 ha de área plantada, sendo eles: Quirinópolis com área de produção de 48.233 ha e Gouvelândia com área de produção de 23.245 ha, além de Caçu com área de 20.261 ha, respectivamente primeiro, sexto e décimo no *ranking* estadual (CANASAT, 2012) (figura 03). Uma participação de 12,44% sobre a área total de produção do estado. Uma das razões para a expansão da cana-de-açúcar nessa microrregião se deve ao fato de apresentar características edafoclimáticas favoráveis à cultura considerando o nível de manejo altamente tecnificado, como é o caso da cana-de-açúcar, o que se traduz em elevada aptidão agrícola (BORGES *et al.*, 2010).

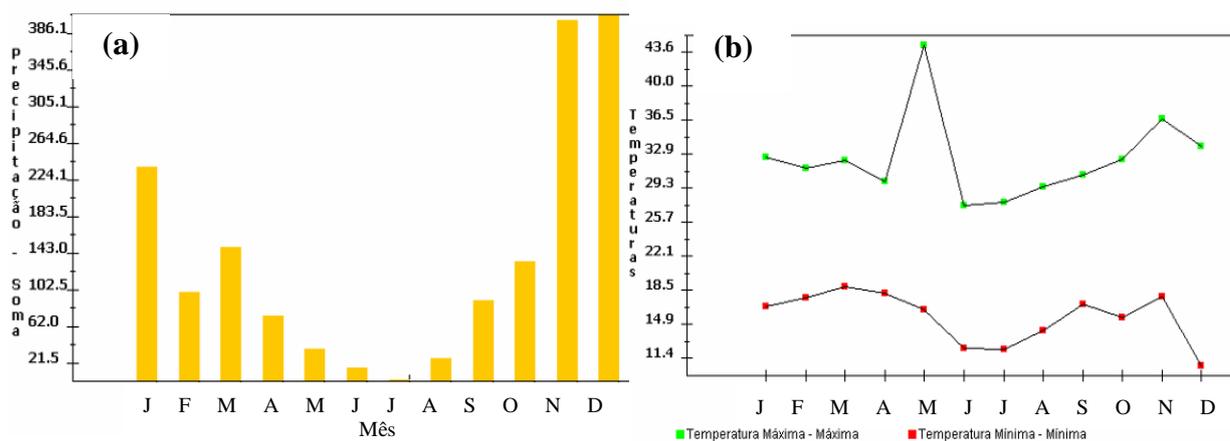
Figura 03: Dez maiores produtores de cana-de-açúcar do Estado - safra 2011/2012.



Fonte: CANASAT (2012). Org. da autora.

Dentre os aspectos climáticos, a MRQ se apresenta com clima Tropical Quente Sub-úmido, do tipo Aw com duas estações bem definidas e variações anuais significativas quanto à umidade, precipitação e temperatura, de acordo com a tipologia climática estabelecida por Köppen (1918). Apresenta chuvas de verão (outubro a março) e inverno seco (junho a setembro), com transições entre períodos úmidos e secos, com volume total de 1700 mm e uma amplitude térmica de cerca de 15°, conforme exemplo apresentado na figura 04.

Figura 04: Parâmetros climáticos: (a) Precipitação em mm (b) Temperatura em °C, referentes à estação situada no município de Quirinópolis, Goiás, ano exemplo 2009.

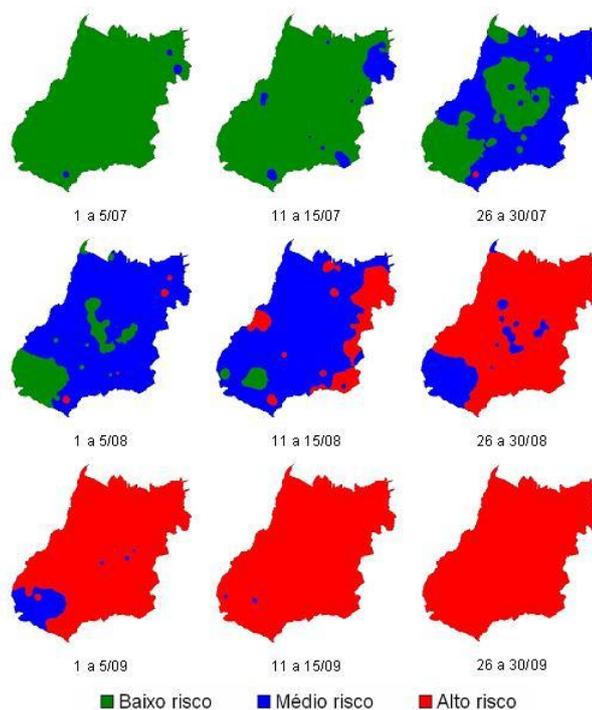


Fonte: AGRITEMPO (2011).

No geral, em relação às condições hidroclimáticas, considerando os períodos de estiagem prolongada (agosto e setembro), a literatura indica risco climático, que mesmo

considerando o potencial hídrico do subsolo, pode representar um problema de déficit hídrico durante o período de estiagem, levando à demanda de irrigação de salvamento. De acordo com Oliveira (2006), a cana-de-açúcar apresenta maior demanda hídrica na fase de perfilhamento e entre o 4º e 11º mês após o plantio, sendo que na fase final do ciclo um pequeno déficit é favorável, aumentando a concentração da sacarose. Por exemplo, se o plantio é feito em julho, o período crítico de demanda hídrica é de novembro a junho, ou se o plantio é feito em agosto, o período crítico é de dezembro a julho. A figura 05 elaborada por Oliveira (2006) apresenta exemplo dos níveis de riscos agroclimáticos para o período de 1º de julho a 30 de setembro em Goiás. Observa-se que entre os meses de agosto e setembro o risco agroclimático para o sul goiano é alto.

Figura 05: Risco agroclimático para o plantio de cana-de-açúcar entre 01 de junho a 30 de setembro para a reserva de água no solo de 50 mm.

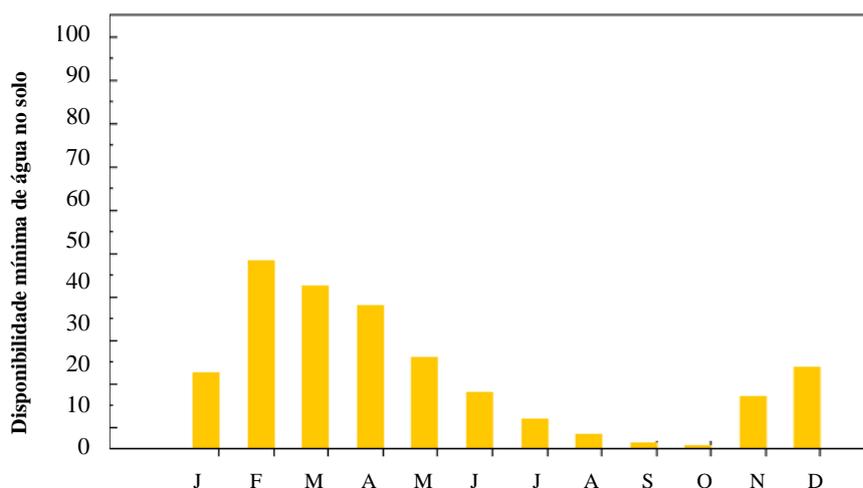


Fonte: Oliveira (2006).

A figura 06, que apresenta um exemplo referente aos dados de disponibilidade mínima de água no solo, mostra que na MRQ existe um baixo índice de disponibilidade hídrica no solo menor que 15 mm/mês, para os meses de agosto a outubro, chegando a um mínimo de 2 mm/mês em outubro. Segundo a Embrapa (2011) o consumo diário de água pela cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do país, em geral, varia entre 2,0 e 6,0

mm/dia, com variações em relação à variedade plantada, o estágio de desenvolvimento e a demanda evapotranspirométrica, em função do mês e da região. Isto indica que ao longo dos meses mais secos, existe uma tendência de déficit hídrico para o desenvolvimento da planta. Risco que poder ser superado através das chamadas irrigações de salvamento.

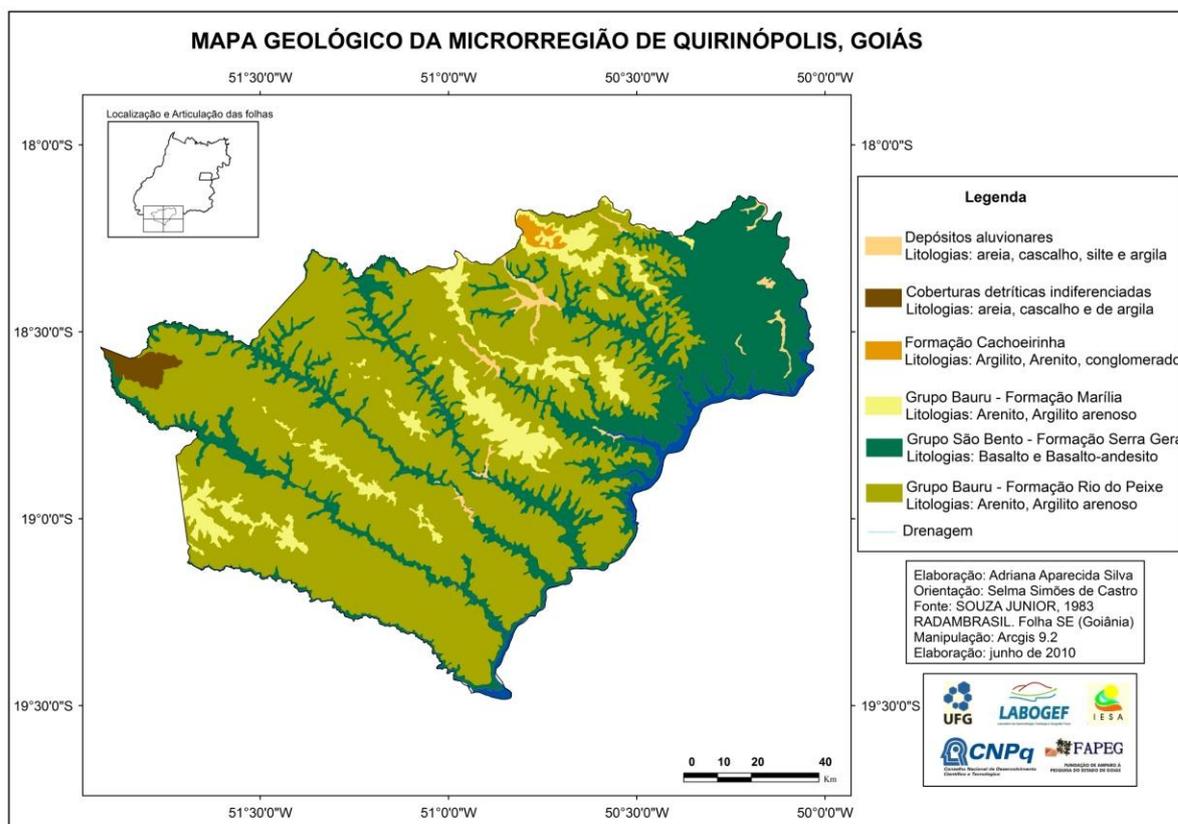
Figura 06: Disponibilidade Atual de Água no Solo (DAAS), em mm. Dados referentes a estação situada no município de Quirinópolis, no ano de 2009.



Fonte: AGRITEMPO (2011).

Em relação à geologia, dominam na microrregião as unidades geológicas representadas pelos basaltos do Grupo São Bento/Formação Serra Geral (Cretáceo) e os arenitos do Grupo Bauru/Formação Rio do Peixe e Formação Marília (Cretáceo superior). Existem ainda, traços da cobertura detrítico-laterítica de textura argilosa, localizados nos topos das superfícies mais elevadas, formando amplos planaltos com cotas superiores a 800 metros, conhecidos como chapadas e chapadões. Tal formação geológica se caracteriza pelo predomínio de litologias do tipo arenito e argilito-arenoso em praticamente toda a extensão, com intrusões de rochas basálticas a nordeste e ao longo das falhas, além de lineamentos, onde se instalaram os principais canais de drenagem (SOUZA JÚNIOR, 1983) (figura 07).

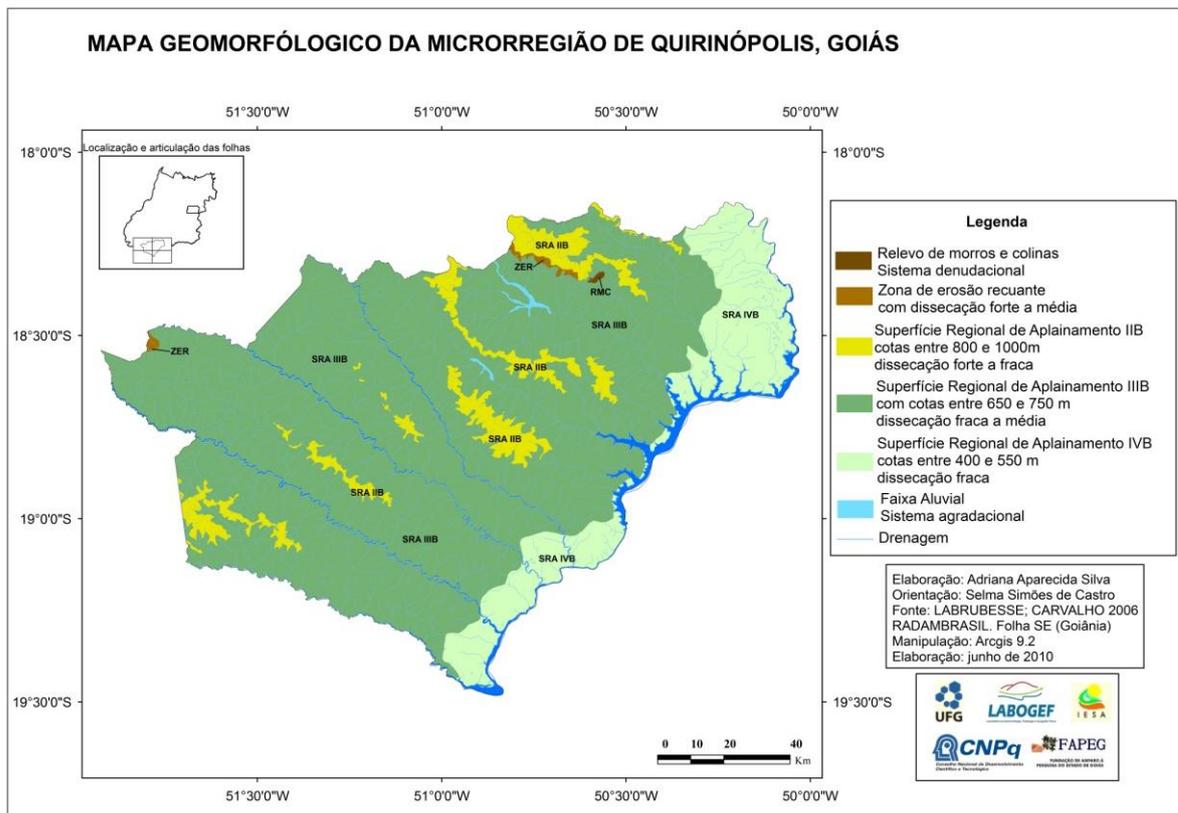
Figura 07: Mapa geológico da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Notar que a Formação Serra Geral (basaltos) do Grupo São Bento se localiza a nordeste e que no restante da área dominam rochas sedimentares do Grupo Bauru (arenitos).



A MRQ se insere na Unidade Geomorfológica denominada de Planalto Setentrional da Bacia Sedimentar do Paraná (MAMEDE *et al.*, 1983), que é representado na área por três níveis topográficos escalonados, com altitudes decrescentes. Segundo Latrubesse e Carvalho (2006), o nível mais elevado corresponde aos Morros e Colinas (MC) e às Zonas de Erosão Recuante (ZER). Em altitudes entre 400 e 1000 metros situam-se três níveis correspondentes às Superfícies Regionais de Aplainamento (SRA). A primeira, mais alta, entre 800 e 1000m de altitude, ocupando menor área, é a SRA IIB, que caracteriza os Relevos Tabulares Residuais denominados de Serras da Confusão do Rio Preto e Serra do Rosa, localizadas na porção mais central da MRQ, além de outras de menor relevância regional. Constitui os principais divisores de águas das bacias hidrográficas locais e apresenta uma disposição alongada e relativamente paralela aos canais. Dominante e distribuída por quase toda a área segue-se a SRA IIIB, mais baixa que a anterior, variando de 650 a 750 m, dissecação de média a fraca e correspondente aos Relevos Tabulares na Bacia do Paraná. Nesses dois níveis topográficos dominam os arenitos. O terceiro nível refere-se à SRA IVB, a nordeste, ainda

mais baixa, entre 400 e 550 m, considerada de dissecação fraca, e associado ao relevo rebaixado da Bacia do Paraná, contendo os sistemas lacustres associados. Nessa superfície dominam os basaltos e solos derivados (figura 08).

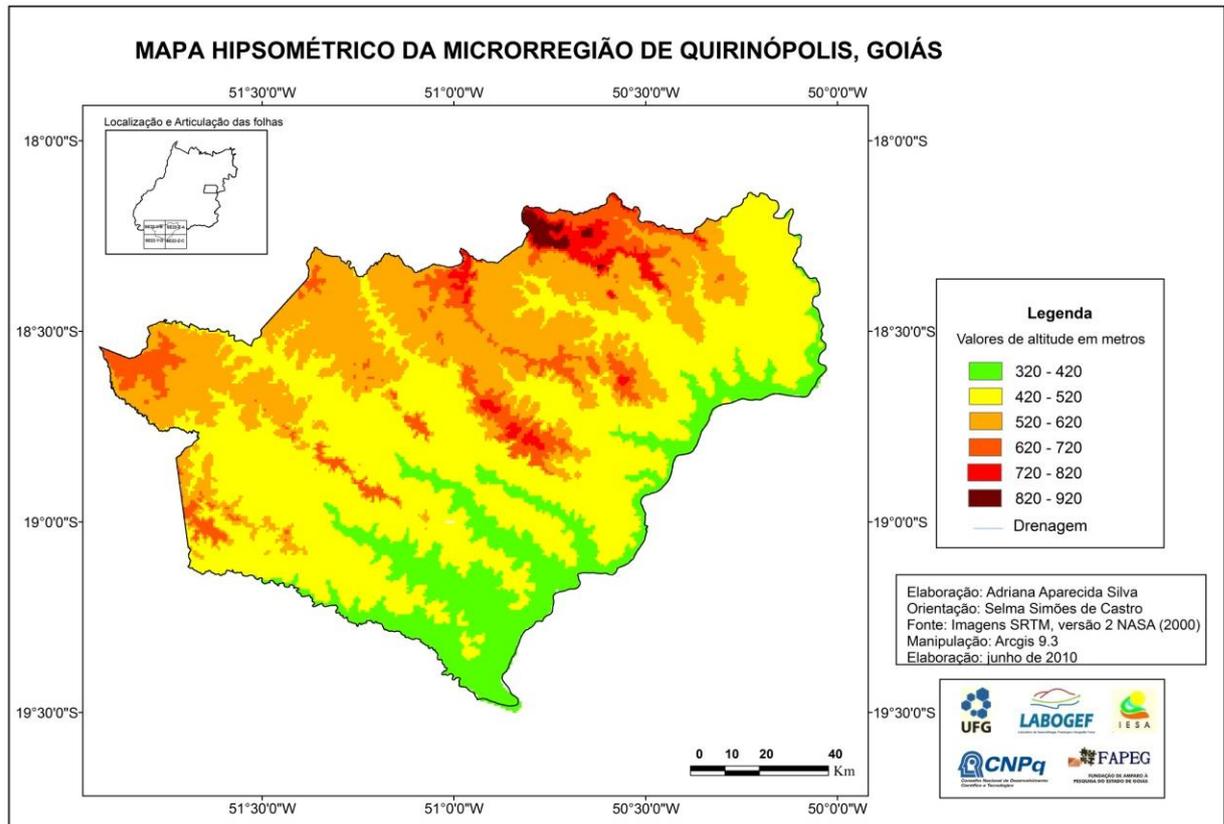
Figura 08: Mapa geomorfológico da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Notar a nordeste a SRA IVB (sobre os basaltos) e o predomínio da SRA IIIB no restante do território (sobre os arenitos), com ressaltos topográficos (SRAIIB), relevos tabulares residuais, divisores de águas das bacias hidrográficas.



Em relação à hipsometria a área pode ser compartimentada em seis unidades altimétricas, considerando intervalos de 100 metros de equidistância, os quais são considerados adequados para representação de grandes conjuntos topográficos. Debaixo para cima tem-se o compartimento com altitudes menos elevadas varia entre 320 a 420 m, relativo às áreas dos canais de drenagem, principalmente à planície do Rio Paraná. O seguinte, com cotas de 420 a 520 m abarca as áreas de menor altitude da SRA IVB com dissecação fraca e as zonas com maior dissecação da SRA IIIB. O compartimento seguinte, com cotas entre 520 a 620 m, destaca as zonas com menor dissecação da SRA IIIB, relativas às zonas de topo. Os compartimentos com cotas 620 a 720, 720 a 820 e 820 a 920 encontram-se na SRA IIB e na

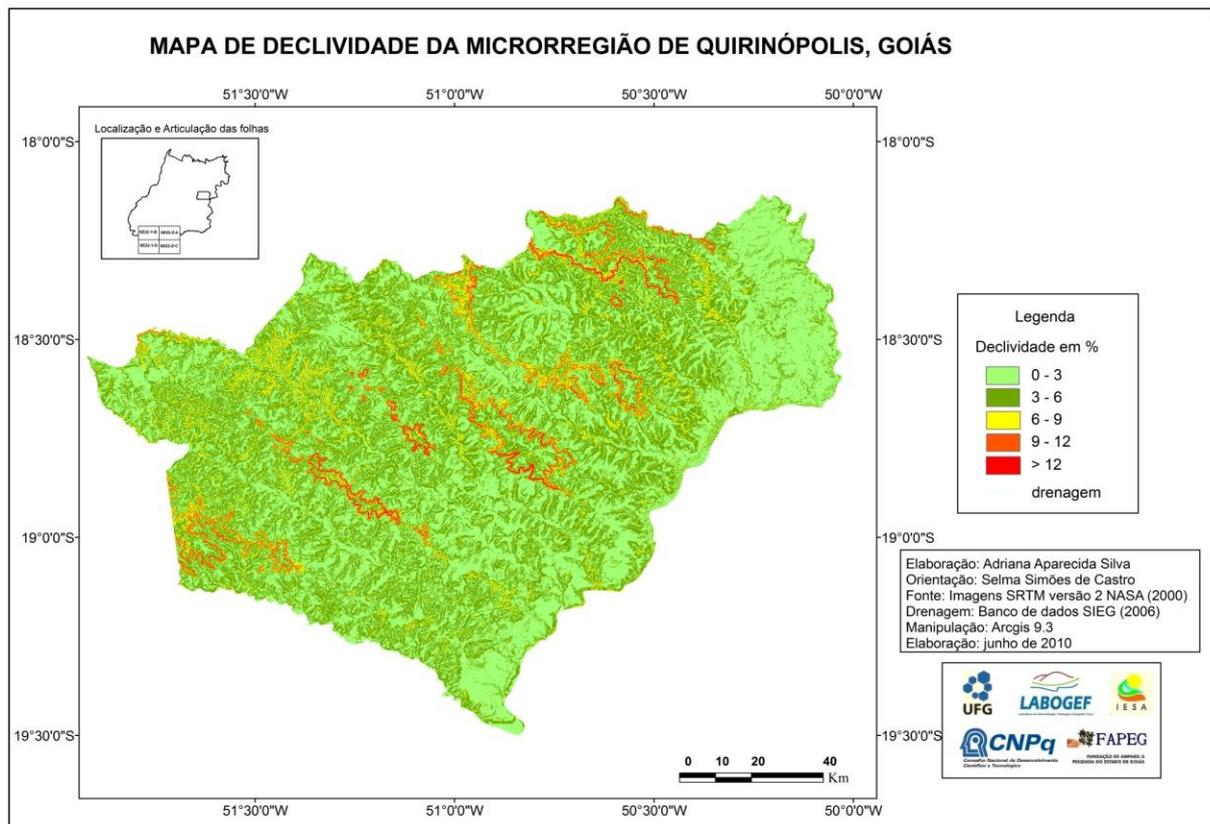
ZER, evidenciando a Serra do Paredão, a Serra da Confusão do Rio Preto e da Serra do Rosa (figura 09).

Figura 09: Mapa hipsométrico da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Notar domínio de altitudes entre 620 e 320m.



Utilizando-se de imagem SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) com equidistância de 60 metros, elaborou-se o mapa da declividade da MRQ cujas classes são: 0 a 3%, 3 a 6%, 6 a 9%, 9 a 12% e > 12% (figura 10). Observa-se que predominam os baixos declives, em geral inferiores a 6%, com destaque para os declives de 3 a 6%, considerados bastante favoráveis para a agricultura altamente tecnificada, como no caso da cana-de-açúcar. As declividades superiores a 9% representam apenas pequenas faixas que se encontram nos sopés das serras, dentre as quais: Serra da Confusão e a Serra do Paredão.

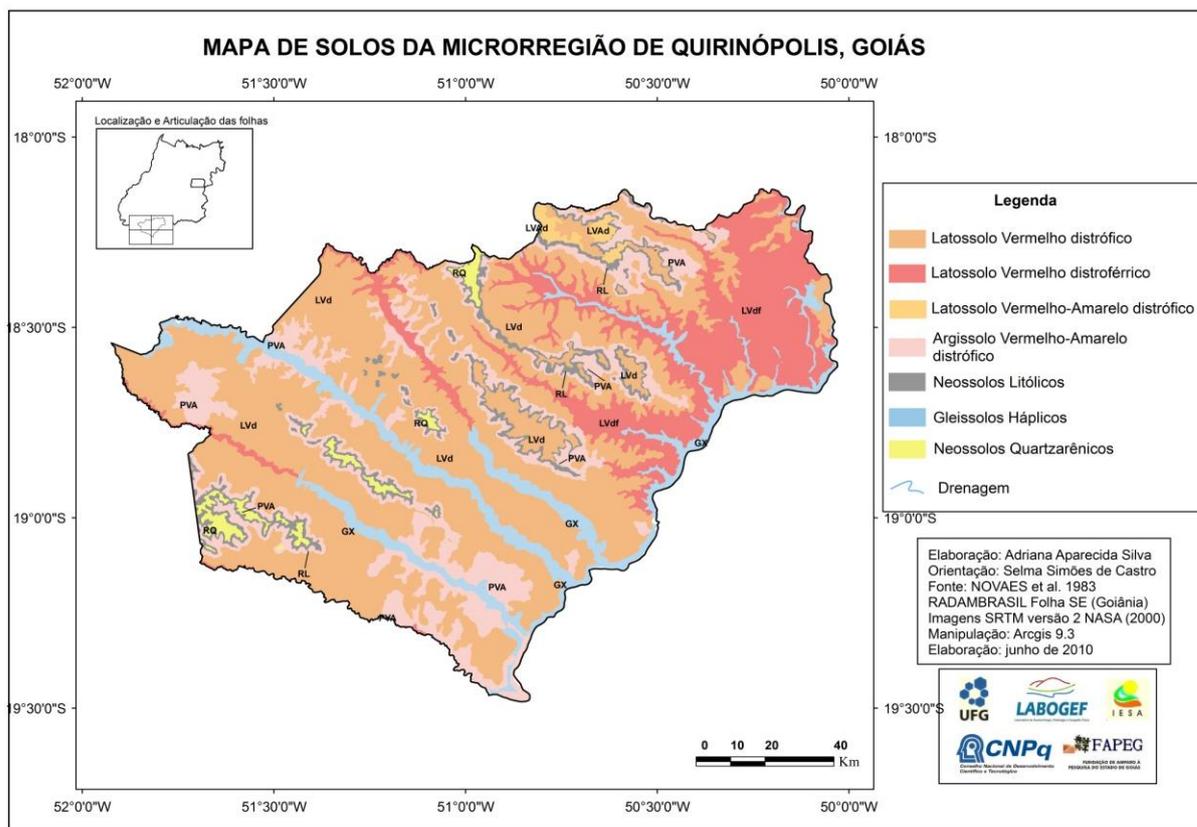
Figura 10: Mapa de declividade da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Notar o predomínio das baixas declividades, variando entre 0 a 6%, com destaque da porção NE onde dominam declives de 0 a 3%.



Quanto aos solos foram identificadas na MRQ as seguintes classes: Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Argissolos Vermelho-Amarelo distróficos (PVAd), Neossolos Litólicos (RL), Gleissolos Hápicos (GX) e Neossolos Quartzarênicos (RQ). Dentre os quais se destacam em termos de área de importância no processo de expansão da cana-de-açúcar da MRQ os LVd e os LVdf (figura 11).

Os LVd são caracterizados como solos profundos a muito profundos, bem drenados friáveis e bastante porosos. Sua estrutura se caracteriza por ser fracamente desenvolvida, pequena a muito pequena e granular, raramente com blocos subangulares, o que lhe confere um aspecto maciço. Apresenta-se na cor vermelho-escuro (2,5 YR) com grande variação textural. Quando associados aos arenitos do Grupo Bauru apresentam textura média, com teor de argila variando entre 12 e 31%. Tais solos podem se apresentar com caráter alumínico, em estado dessaturado, com problemas críticos quanto à deficiência de nutrientes, necessitando de correção da fertilidade natural (NOVAES *et al.*, 1983).

Figura 11: Mapa de solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Notar o predomínio quase absoluto dos Latossolos e o destaque para os Latossolos Vermelhos distroféricos a nordeste, relacionados a SRA IVB, desenvolvida sobre basaltos.



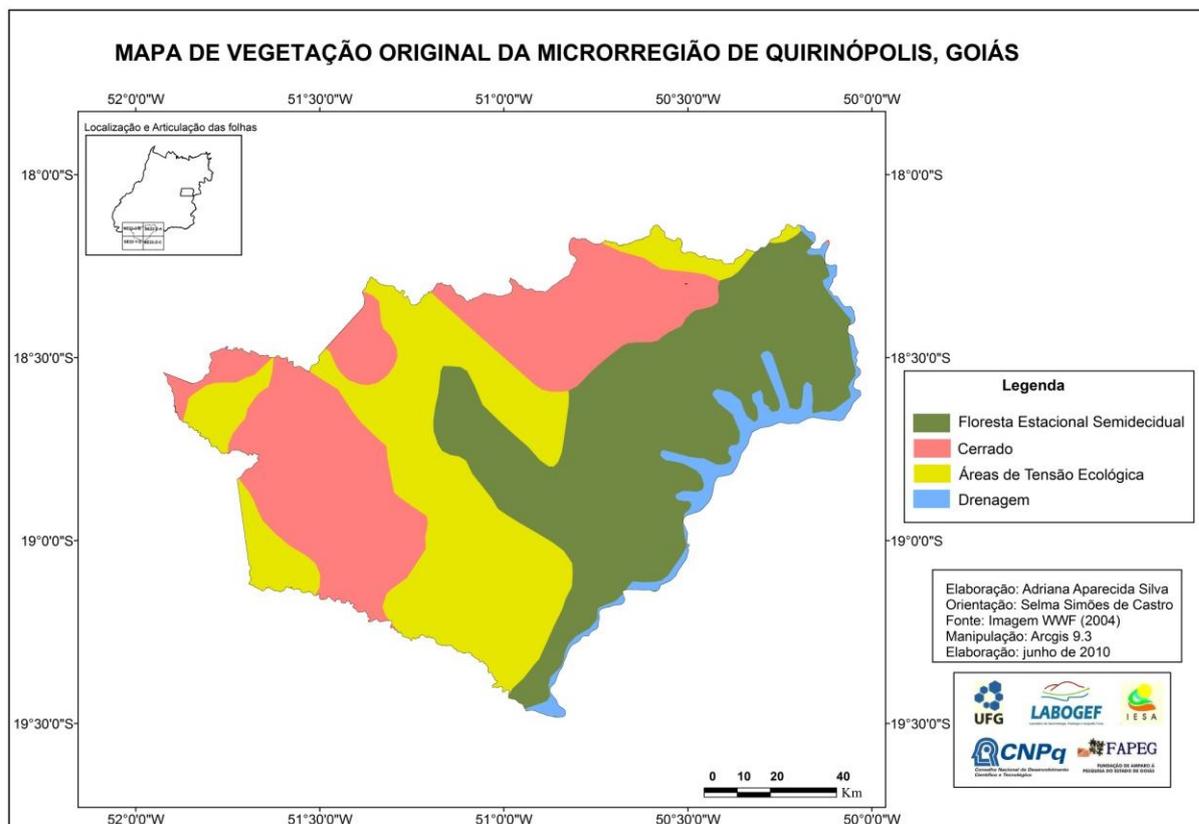
Os LVdf se assemelham ao LVd, exceto por apresentarem alto teor de ferro, no geral teores de Fe_2O_3 (pelo H_2SO_4) de 180g/kg a < 360g/kg na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, em virtude da rocha de origem (basalto). Têm horizonte A moderado, textura argilosa e horizonte B latossólico com cores relativas aos tons vermelho-escuro (matiz 2,5YR e 10R), estrutura microagregada, muito pequena e pequena granular, fraca, com aspecto maciço e altamente porosa. Apresentam ainda alta capacidade de retenção de umidade. São solos de textura argilosa, bem drenados e aerados (EMBRAPA, 2006).

O solo frequentemente é considerado na agricultura em geral como fator de produção e, nesse aspecto, deve atender às necessidades nutricionais e hídricas das plantas, de modo que, no caso da cana-de-açúcar, produza o teor de sacarose adequado ao processamento industrial para produção do açúcar e do álcool, relativo ao valor de ATR (Açúcar Total Recuperável). Borges (2011) constatou que os valores de ATR alcançados na MRQ para os Latossolos são, no geral, adequados, em decorrência do preparo preventivo de compactação e de fertilidade, com subsolagem, gradagem, aração, correção de acidez por calagem, seguida

de fosfatagem, gessagem e adubação tipo NPK além, na fase de cultivo, após a seleção de variedades com bom desempenho na região, o plantio em linhas e, após o primeiro corte, o plantio na palhada, empregando ainda a fertirrigação com vinhaça, além de controle preventivo de pragas com agroquímicos.

Em relação às formações vegetais originais na MRQ ocorriam formações do tipo Floresta Estacional semidecidual, sobre os solos argilosos (LVdf), zonas aluviais com domínio dos Gleissolos háplicos (GX) e, no restante, as formações típicas do Cerrado (Savana Tropical), sobre os arenitos e solos associados (LVd e LVAd), caracterizado pelas fisionomias de Savana Florestada, Savana Arborizada, Savana Parque e Savana Gramíneo-lenhosa (WWF, 2004). Grande parte desta região, no entanto, se caracteriza por apresentar áreas relativas a zonas de transição ou áreas de tensão ecológica entre a Floresta Estacional semidecidual e o Cerrado, as quais se localizam, principalmente, na porção noroeste da microrregião (figura 12).

Figura 12: Mapa de vegetação original da microrregião de Quirinópolis, Goiás. Notar o predomínio da Floresta Estacional Semidecidual a nordeste e centro-sul.



A Floresta Estacional Semidecidual ou Floresta tropical subcaducifólia é observada em áreas com sazonalidade climática marcada por duas estações, sendo uma com característica tropical com chuvas intensas de verão seguidas por estiagem acentuada e prolongada, e outra com característica subtropical, ou seja, com seca fisiológica causada pelas baixas temperaturas no inverno, sendo estas inferiores a 15°C. Já as formações de Cerrado (Savana Florestada, Savana Arborizada, Savana Parque e Savana Gramíneo-lenhosa), ocorrem preferencialmente em clima tropical estacional, onde cerca de seis meses do ano são marcados pela seca (SANO *et al.*, 2008).

Tais formações vegetacionais, no entanto, hoje só se encontram em manchas descontínuas devido a fragmentação, o que acontece também em todo o estado. Fato que se deve aos intensos processos de desmatamento, relacionado diretamente com as mudanças na forma de uso e ocupação das terras, em especial a partir da década de 1970, dada a conversão para uso da agropecuária moderna (SANO *et al.*, 2008).

1.2 Dinâmica de uso da terra e expansão da cana-de-açúcar entre os anos de 2004 a 2010, na microrregião de Quirinópolis, Goiás

A MRQ é considerada como representativa do processo recente de expansão da cana-de-açúcar em Goiás, interpretação essa baseada no aumento exponencial das áreas de cultivo, bem como na notável concentração de novas usinas/destilarias de açúcar e álcool de grande a médio porte, somando sete unidades industriais instaladas, sendo, quatro delas em pleno funcionamento e cadastradas junto ao Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2010), todas posteriores a 2005 (CASTRO *et al.*, 2010). Outro fato é que aí se encontram dois dos oito maiores municípios produtores de cana-de-açúcar do estado: Quirinópolis, com área de produção de 43.502 ha e Gouvelândia, com área de produção de 20.850 ha, respectivamente primeiro e oitavo no *ranking* estadual (CANASAT, 2012). Vale lembrar ainda que até 2005 não havia áreas de cultivo de cana-de-açúcar nessa microrregião, sendo predominante o uso por pastagem extensiva, seguido da cultura de grãos, na maior parte soja rotacionada com milho, posicionada nos melhores solos.

Buscando-se compreender como se deu a dinâmica do uso e ocupação das terras em relação ao processo de expansão da cana-de-açúcar na MRQ, Silva e Castro (2011), utilizando uma série multitemporal realizaram mapeamentos da sucessão histórica de usos, com base em

imagens de satélite Landsat TM5 de quatro diferentes anos: 2004, 2006, 2008 e 2010, os quais cruzaram entre si sucessivamente e com o mapa de solos, para conhecer melhor a localização dos talhões de cana e os tipos de uso anterior e sobre quais tipos de solos a cultura canieira se expandiu nesta microrregião, como exposto a seguir.

- **A expansão da cana-de-açúcar entre os anos de 2004 e 2010**

O mapa de uso da terra do ano de 2004 (figura 13) permite constatar que nesse ano a cana-de-açúcar não era cultivada na MRQ, quando então predominavam largamente as pastagens cultivadas ou naturais (apresentadas de forma unificada no mapa), representando 11.662,083 km² ou 72,58% da sua área total. O segundo tipo de uso correspondia à vegetação natural, cobrindo uma área de 2.479,321 km² ou 15,42% do total, sobretudo de vegetação ciliar, como áreas de preservação permanente, e reserva legal. Nesse ano, a cultura anual representava apenas 9,36% da área ou 1.503,551km², incluindo as áreas referentes ao raio de dez pivôs existentes (tabela 01).

Figura 13: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2004. A área agrícola concentrava-se a nordeste e na época relacionava-se à soja e milho.

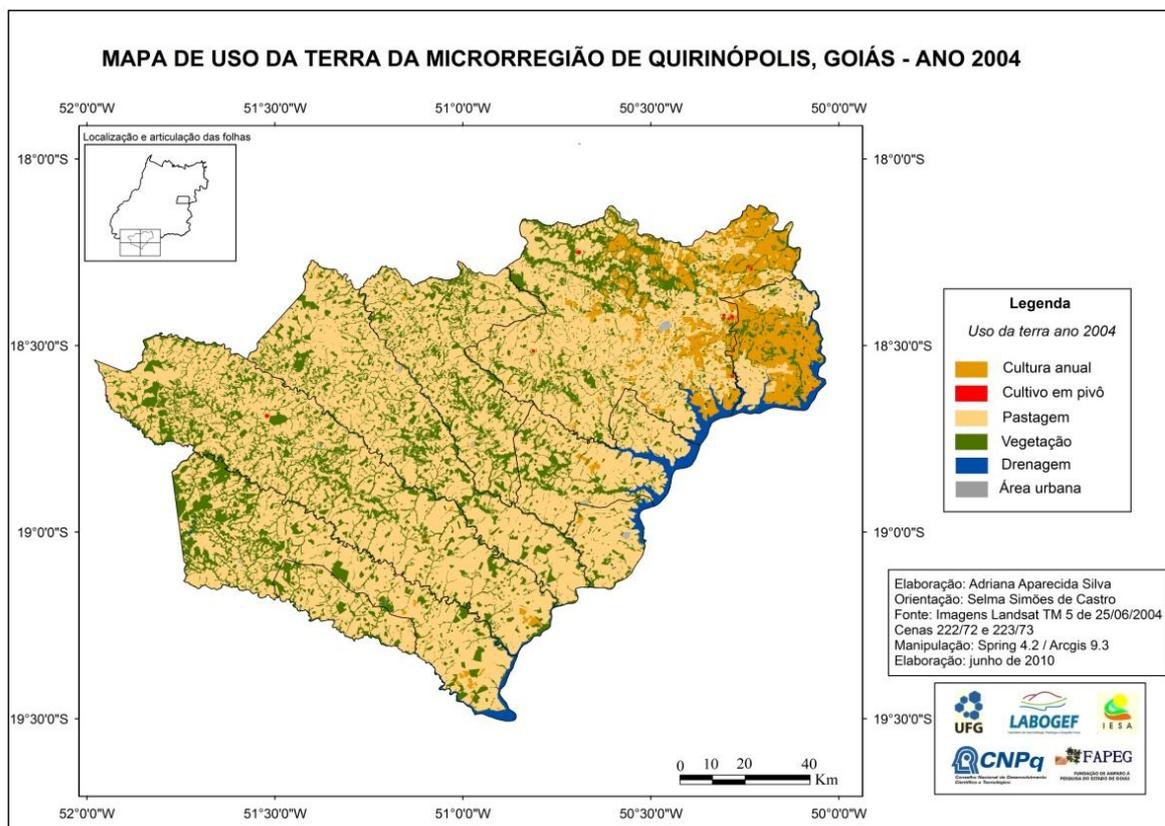


Tabela 01: Dados de uso da terra na MRQ em 2004.

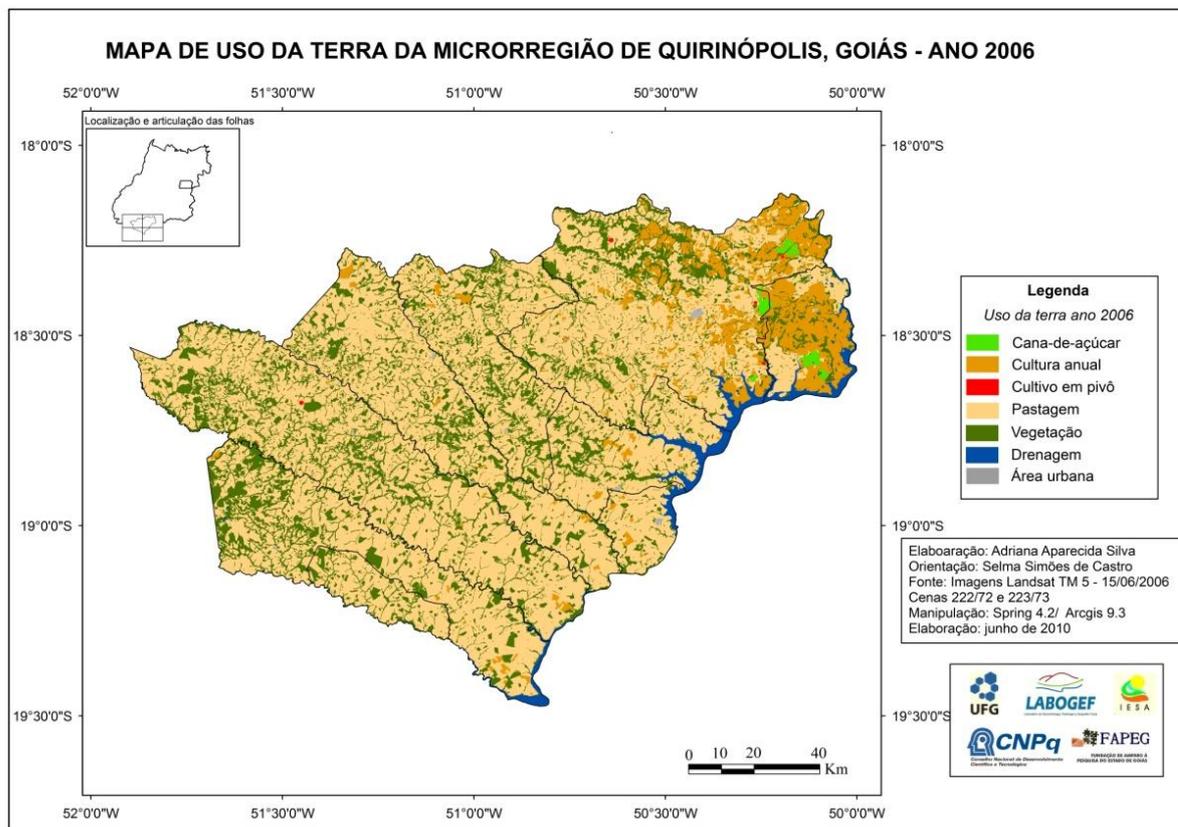
Tipo de uso	Área em ha	Área em km²	% da microrregião
Cana-de-açúcar	0	0	0
Cultura anual	149.585,741	1.495,857	9,31
Pivô	769,441	7,694	0,05
Pastagem	1.166.208,300	11.662,083	72,58
Vegetação	247.932,100	2.479,321	15,42
Drenagem	40.465,910	404,659	2,52
Área urbana	1.841,807	18,418	0,12
Total	1.606.803,300	16.068,033	100

Fonte: interpretação das imagens Landsat TM5 de 2004.

Pode-se constatar que apesar do cultivo da cana-de-açúcar em 2004 já representar uma cultura em expansão em Goiás, principalmente nas microrregiões de Ceres, Sudeste de Goiás e Meia Ponte, os três maiores em produção do estado, mesmo sendo a Microrregião Meia Ponte área limítrofe à de Quirinópolis (ABDALA; CASTRO, 2010), neste momento, ainda não havia expansão da área de cultivo de cana na MRQ. O processo de início da expansão só ocorreria no ano seguinte, 2005, com inserção do cultivo nas áreas ocupadas pela cultura anual, no caso o cultivo de soja, que estava sofrendo uma crise de mercado, a qual se intensificaria no ano seguinte (BORGES, 2011). Ainda assim, apesar da crise e de predominar a pastagem, a MRQ em 2004 se apresentava como a sétima em termos de área de cultivo da soja e oitava em sua produtividade (IBGE, 2012).

No mapa de uso da terra do ano de 2006 (figura 14), começa a ser registrada a presença, ainda que pequena, de polígonos com cultivo da cana-de-açúcar, somando uma área de apenas 57,90 km² ou 0,36% da área total da microrregião. Tais polígonos estão localizados nos municípios de Quirinópolis e Gouvelândia, a nordeste da microrregião, onde antes se encontravam as áreas de soja e culturas associadas (figura 13). O principal uso, no entanto, permanece sendo a pastagem cultivada ou natural, com 11.315,302 km² ou 70,41% da área, registrando uma redução de 2% em relação a 2004.

Figura 14: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2006. Notar que a cana se instala, principalmente, em áreas antes de uso agrícola localizadas à nordeste.



Tais números, de certo modo, já apresentam uma leve tendência de reconversão de uso, que vem não só com a inserção do cultivo da cana-de-açúcar, como também com a ampliação das áreas de cultura anual que passam a representar 1.787,213 km², significando um aumento de cerca de 16% em relação a 2004. As áreas com vegetação natural permanecem sem alteração detectada (tabela 02).

Tabela 02: Dados de uso da terra na MRQ em 2006.

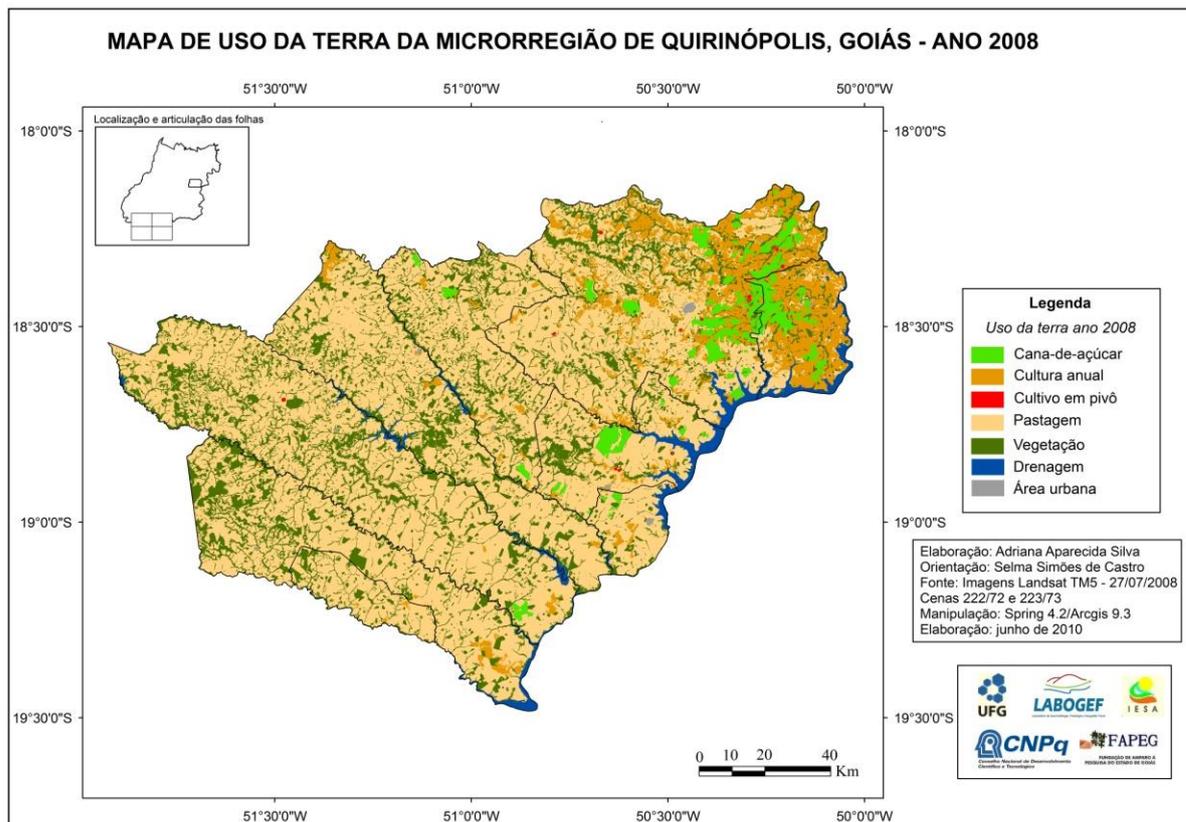
Tipo de uso	Área em ha	Área em km ²	% da microrregião
Cana-de-açúcar	5.790,550	57,905	0,36
Cultura anual	178.721,396	1.787,213	11,12
Pivô	740,745	7,407	0,05
Pastagem	1.131.530,210	11.315,302	70,41
Vegetação	247.712,682	2.477,126	15,42
Drenagem	40.465,910	404,659	2,52
Área urbana	1.841,807	18,418	0,12
Total	1.606.803,300	16.068,033	100

Fonte: Interpretação das imagens Landsat TM5 de 2006.

Nesse momento, pode-se observar um princípio de mudança na forma de uso das terras na MRQ, em decorrência da nova tendência de expansão da cana-de-açúcar no estado de Goiás, conforme apontado nos estudos de Castro *et al.* (2007) e Silva e Miziara (2011). A região sul do estado seria a principal área-alvo de expansão e com uma tendência clara de substituição de culturas, quer seja pastagem/cana-de-açúcar ou mesmo cultura anual/cana-de-açúcar, ou ainda pastagem/cultura anual.

Um novo cenário de uso da terra é observado claramente no ano de 2008 (figura 15), quando a expansão da cana-de-açúcar se consolida na microrregião, já abrangendo parte das terras de seis municípios: Quirinópolis, Gouvelândia, Paranaiguara, São Simão, Caçu e Itarumã, indicando tendência de expansão de NW para SW. A área cultivada com cana-de-açúcar recobre 506,413 km² ou 3,16% da área total da microrregião, correspondendo a um aumento de quase 10 vezes quando comparada à área plantada em 2006.

Figura 15: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2008. Notar que a cana aumentou nas áreas antes com a cultura anual em 2006 a nordeste, e já se expande sobre as pastagens na direção a SW.



Repetindo a mesma tendência de substituição de culturas já apontada para o ano de 2006, a pastagem cultivada ou natural perde novamente em área em 2008, passando para 10.166,794 km², equivalentes a 7% da área total. A cultura anual, em contrapartida, apresenta um novo incremento, chegando a uma área total de 2.474,443 km², significando um aumento de 4,2%. Observa-se que nesse ano já se pode constatar um aumento no número de pivôs (de irrigação), passando a doze. Em relação à vegetação natural, uma perda menor que 0,02% é registrada neste período, em contrapartida há um aumento de 0,14% nas áreas referentes à drenagem, dados estes que se referem à criação de três barragens, sendo que duas entre os municípios de Itarumã/Cachoeira Alta, na extensão do Rio Verde, e outra entre Cachoeira Alta/Caçu, na extensão do Rio Claro (tabela 03).

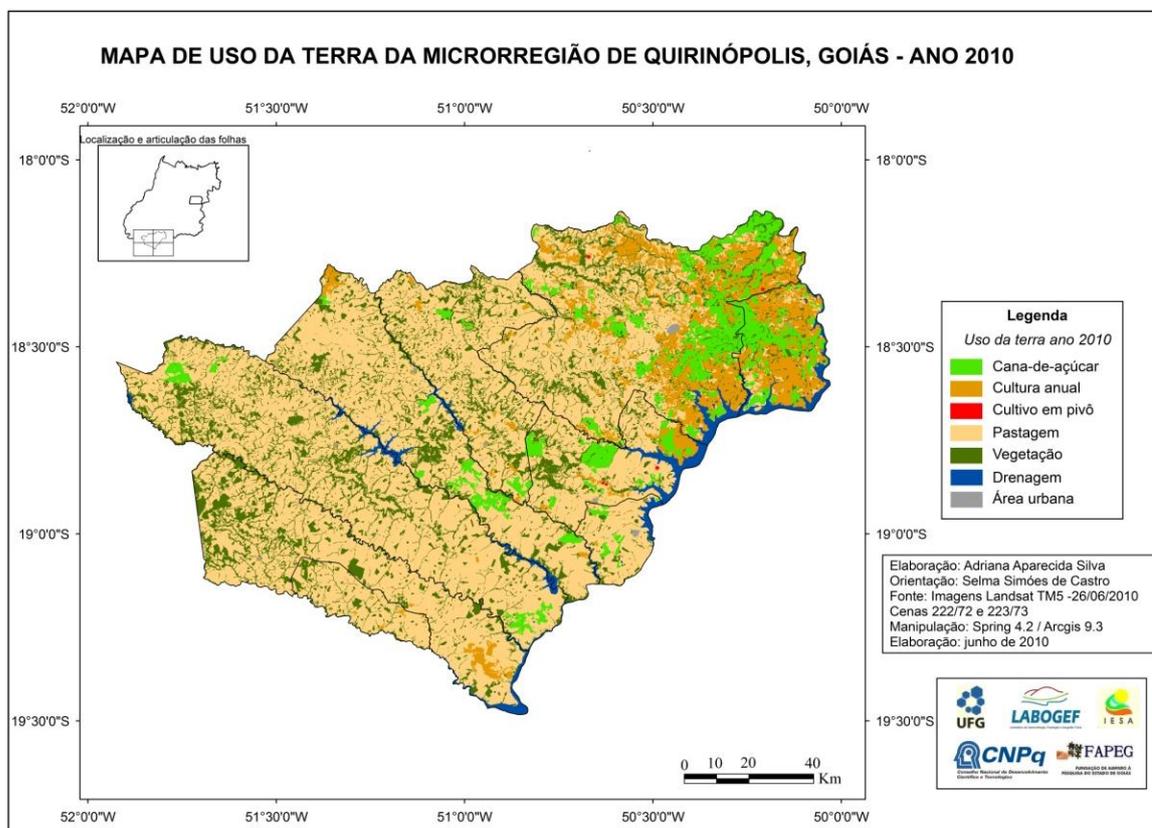
Tabela 03: Dados de uso da terra na MRQ em 2008.

Tipo de uso	Área em ha	Área em km²	% da microrregião
Cana-de-açúcar	50.641,397	506,413	3,16
Cultura anual	246.666,438	2.466,664	15,35
Pivô	777,908	7,779	0,04
Pastagem	1.016.679,451	10.166,794	63,27
Vegetação	247.430,337	2.474,303	15,40
Drenagem	42.765,960	427,659	2,66
Área urbana	1.841,807	18,418	0,12
Total	1.606.803,300	16.068,033	100

Fonte: Interpretação das imagens Landsat TM5 de 2008.

No mapa de uso do solo do ano de 2010 (figura 16), observa-se uma expansão da cana-de-açúcar ainda mais expressiva do que antes, já abrangendo sete dos nove municípios da MRQ, com a incorporação de Cachoeira Alta ao cenário de 2008. Nesse momento, a cultura da cana-de-açúcar representa uma área de 1.160,030 km² ou 7,23% da MRQ, significando um incremento de quase 1,5 vezes em relação ao ano de 2008. Tais dados são corroborados pela presença de sete usinas instaladas, sendo quatro em operação e outras três em implantação.

Figura 16: Mapa de uso da terra da microrregião de Quirinópolis, Goiás em 2010. Notar que a expansão mais significativa neste momento ocorre sobre as áreas de pastagem na direção oeste e sul.



As áreas de pastagem, por sua vez, permanecem com tendência a redução de área, passando para 9.260,031 km², significando um decréscimo de 5,65% da área total em relação ao ano anterior, de 2008. A cultura anual, por sua vez, apresenta discreto aumento de cerca de 1%, chegando a 2.680,725 km², o qual mesmo que inferior ao da cana-de-açúcar, mostrando uma tendência de manutenção da agricultura de grãos na microrregião. Sobre essa dinâmica convêm lembrar que é prática usual plantar soja nas pastagens degradadas por uma ou duas safras com o fim de recuperar o solo, em geral compactado e empobrecido, para em seguida plantar a cana-de-açúcar, fato que pode explicar, ao menos em parte, esse aumento. Dado curioso se refere ao número de pivôs, que reduz expressivamente, passando de doze para apenas cinco em 2010 (tabela 04), lembrando também que seu uso é comum no cultivo da soja.

Tabela 04: Dados de uso da terra na MRQ em 2010.

Tipo de uso	Área em ha	Área em km²	% da microrregião
Cana-de-açúcar	116.003,007	1.160,030	7,23
Cultura anual	268.072,572	2.680,725	16,68
Pivô	586,901	5,869	0,03
Pastagem	926.003,100	9.260,031	57,63
Vegetação	247.225,400	2.472,254	15,38
Drenagem	47.070,512	470,705	2,93
Área urbana	1.841,807	18,418	0,12
Total	1.606.803,300	16.068,033	100

Fonte: Interpretação das imagens Landsat TM5 de 2010.

Outro dado interessante, diz respeito ao aumento nas áreas de drenagem, passando a 470,705 km², significando um incremento de 0,27%. Tais dados se correlacionam às barragens dos rios Verde e Claro, como já observado anteriormente. A vegetação natural apresenta nova redução, da ordem de 0,02% neste período.

- **Expansão da cana-de-açúcar em relação ao uso anterior da terra**

Uma análise dos produtos cartográficos e dos dados apresentados permite concluir que a dinâmica de expansão da cana-de-açúcar ocorreu e ainda está ocorrendo do eixo leste para oeste da MRQ, tendo sido marcada por duas tendências, a primeira de substituição das áreas de culturas anuais, principalmente da soja, rotacionada com sorgo e milho, entre 2006 e 2008, e segundo com a substituição dos pastos, entre 2008 e 2010, que representa a tendência atual e com maior expressão espacial.

Vale lembrar que de 2004 para 2006 a cultura anual se expandiu sobre áreas de pastagem, por ceder suas áreas à cana-de-açúcar, o que leva a crer que neste momento já se tem o processo de disputa pelas melhores terras, a favor da cana-de-açúcar. Entre 2006 e 2008 observa-se uma nova expansão da cultura anual, de cerca de 4%, e redução da pastagem, da ordem de 7%, além de novo impulso da cana-de-açúcar, de cerca de 3%. Assim, pode-se dizer que nesse momento começa a prevalecer a substituição de áreas de pastagem sobre as demais culturas, até porque, a oferta de terras próprias para as culturas anuais estava terminado.

Por fim, entre 2008 e 2010, a expansão sobre as áreas de cultura anual é pequena, pouco mais de 1%, mas continua crescente, desta feita sobre as pastagens, representando um incremento de cerca de 4%, e nova redução das áreas de pastagem de cerca de 6%, estabelecendo, neste momento, o cenário de substituição pastagem por soja e cana-de-açúcar como mostram as tabelas 05 e 06. Nestas tabelas os dados são sintetizados na última coluna, quanto à dinâmica de uso da terra, favorável ou não a cada uso, onde se pode observar que

houve um evidente incremento do uso por cana-de-açúcar e cultura anual, em detrimento das áreas de pastagem, que sofrem redução, como também em relação à vegetação e dos pivôs centrais.

Tabela 05: Expansão da cana-de-açúcar na MRQ entre 2004 e 2010.

Tipo de uso	2004		2006		2008		2010		Síntese da dinâmica
	Área em ha	%							
Cana-de-açúcar	0	0	5.790,55	0,36	50.641,39	3,16	116.003,00	7,23	+ 7,23
Cultura anual	149.585,74	9,31	178.721,39	11,12	246.666,43	15,35	268.072,57	16,68	+ 7,37
Pivô	769,44	0,05	740,74	0,05	777,90	0,04	586,90	0,03	- 0,02
Pastagem	1.166.208,30	72,58	1.131.530,21	70,41	1.016.679,45	63,27	926.003,10	57,63	- 14,95
Vegetação	247.932,10	15,42	247.712,68	15,42	247.430,33	15,40	247.225,40	15,38	- 0,04
Drenagem	40.465,91	2,52	40.465,91	2,52	42.765,96	2,66	47.070,51	2,93	+ 0,41
Área urbana	1.841,80	0,12	1.841,80	0,12	1.841,80	0,12	1.841,80	0,12	=
Total	1.606.803,30	100	1.606.803,30	100	1.606.803,30	100	1.606.803,30	100	

Legenda: + aumento de área; - redução de área; = manutenção na área.

Tabela 06: Dados comparativos da dinâmica das classes de uso entre os anos: 2004/2006, 2006/2008 e 2008/2010, com base sempre no ano anterior.

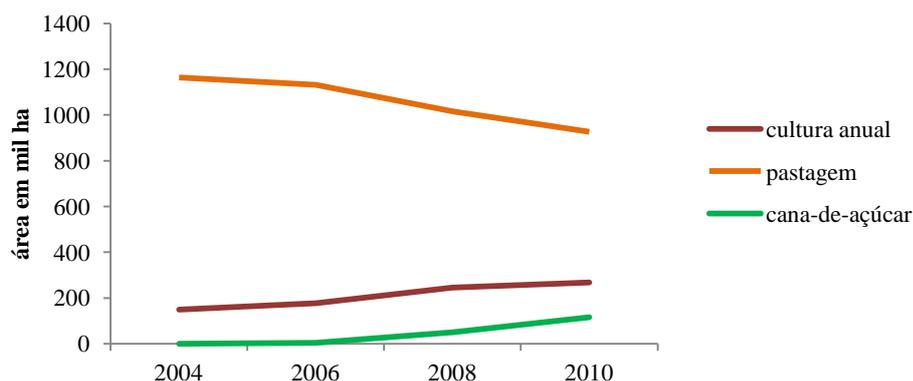
Tipo de uso	2004/2006		2006/2008		2008/2010		Área total ha
	Área em ha	%	Área em ha	%	Área em ha	%	
Cana-de-açúcar	5.790,55	0,36	44.850,847	88,56	65.361,61	56,34	116.003,007
Cultura anual	29.135,65	16,30	67.945,042	27,54	21.406,134	7,98	57.336,826
Pivô	- 28,7	-3,85	37,163	4,77	-191,007	-32,54	-182,544
Pastagem	- 34.678,090	- 3,64	-114.850,759	-11,29	-90.676,351	-9,79	-240.205,200
Vegetação	-219,42	0,08	-282,345	-0,11	-204,937	-0,08	-267,867
Drenagem	0	0	2.300,05	5,37	4.304,552	5,81	6.604,602
Área urbana	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dados dos mapas elaborados sobre imagens Landsat TM5 dos mesmos anos.

É importante destacar que não se constatou uma tendência de substituição massiva da cultura anual, no caso de grãos, sobretudo soja-milho, pela cana-de-açúcar, uma vez que os dados mostram que a cultura anual também vem aumentando em área, ainda que em menor escala que a cana-de-açúcar. No entanto, considerando que a cana-de-açúcar inicia a expansão pelos municípios de Quirinópolis e Gouvelândia, as quais apresentam tradição no uso agrícola, houve uma substituição da cultura anual de grãos pela cana, em um primeiro momento, justamente onde também dominam os melhores solos (rever figura 11), permitindo supor que uma vez esgotada a oferta de terras de maior aptidão agrícola, como observado já a partir de 2008, a expansão passa às áreas de pastagem, que ainda hoje são largamente dominantes em termos de preferência para a substituição pela cana-de-açúcar como sintetiza a

figura 17. Convém lembrar, no entanto, que tais áreas, segundo o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (MANZATTO *et al.*, 2009), apresentam média aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar, estando as áreas de alta aptidão restrita ao extremo sul da MRQ.

Figura 17: Evolução de uso dos solos da microrregião de Quirinópolis de 2004 a 2010. Note-se a redução das pastagens comparada aos aumentos da cana-de-açúcar e da cultura anual.



Conforme mostra ainda a figura 17 há uma nítida redução nas áreas de pastagem de 2006 em diante e, em contrapartida, um aumento da cana-de-açúcar e, em menor escala, da cultura anual. Tal substituição vem de encontro ao discurso de governo, de promover a expansão da cana-de-açúcar em substituição às áreas de pastagem degradada. No entanto, neste estudo, além desta não representar a única forma de substituição, conforme evidenciado na figura 18, não é possível afirmar aqui que essa recomendação foi seguida para os municípios de Quirinópolis e Gouvelândia, ainda que estatisticamente indique essa tendência para a MRQ como um todo. Por outro lado, em virtude da escala da imagem e do mapeamento, tampouco é possível afirmar que se tratava de áreas de pastagem com algum processo de degradação.

Outro ponto a ser considerado é representado na figura 19, onde se nota que as áreas onde aconteceu a expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar variam entre os biênios considerados: 2004/2006, 2006/2008 e 2008/2010, devido ocorrerem de forma distinta no tempo e no espaço. Entre 2004/2006 prevalece a expansão em áreas de cultura anual, já entre 2006/2008 a expansão ocorre tanto em áreas de cultura anual como de pastagem, assim como em 2008/2010, que também ocorre substituição em áreas de pastagem e de cultura anual. Considerando os dados da tabela 06, percebe-se que a cultura anual permanece em expansão assim como a cana-de-açúcar, o que indica uma tendência inicial de substituição pastagem/cultura anual anterior à conversão para cana-de-açúcar.

Figura 18: Área atual de cana-de-açúcar em relação à substituição aos usos anteriores do solo (cultura anual, pastagem e vegetação). Notar o predomínio das pastagens e a substituição de áreas com culturas anuais e mesmo com cobertura vegetal natural.

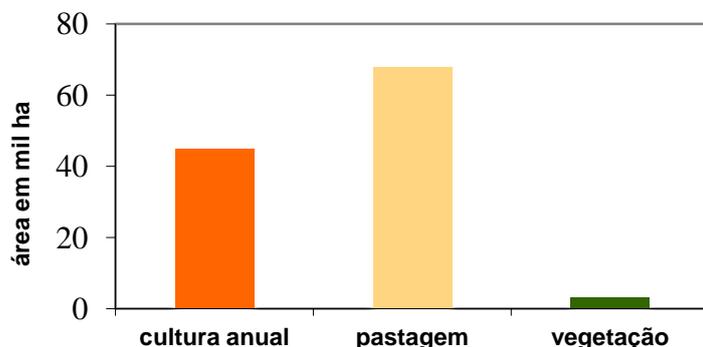
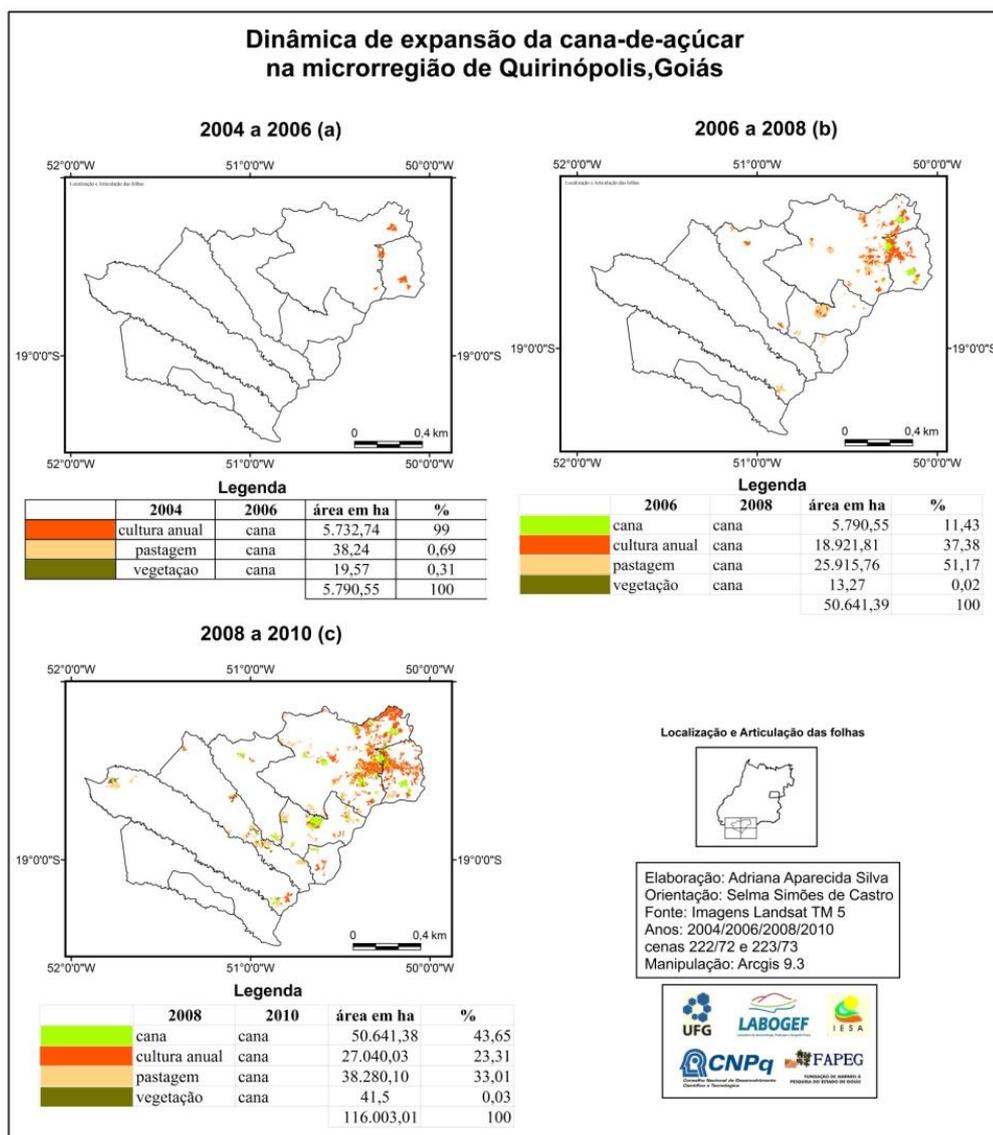


Figura 19: Dinâmica da expansão da cana-de-açúcar na microrregião de Quirinópolis, Goiás por tipo de uso anterior da terra, sendo: a) Áreas com cana-de-açúcar em 2004/2006; b) Áreas com cana-de-açúcar em 2006/2008; c) Áreas com cana-de-açúcar em 2008/2010.



Esta tendência é apresentada também na tabela 07, onde se pode constatar que para os anos de 2006 e 2008 existe uma substituição de culturas (pastagem/cultura anual) anterior à conversão de uso para cana-de-açúcar. Tais dados indicam que as áreas referentes ao segundo processo de expansão da cana-de-açúcar passam por uma etapa de preparo do solo. Neste caso a inserção da cultura anual nas áreas de pastagem precede a inserção da cana-de-açúcar. Este tipo de cultivo, geralmente de grãos, promove a recuperação do solo, principalmente por inserir o manejo com gradagem e corretivos químicos.

Tabela 07: Síntese da dinâmica de expansão da cana-de-açúcar entre 2004 e 2010 na microrregião de Quirinópolis, Goiás.

2004	2006	2008	2010	Área em ha	%
pastagem	cana	cana	cana	38,24	0,03
vegetação	cana	cana	cana	19,57	0,01
cultura anual	cana	cana	cana	5.732,74	4,91
vegetação	vegetação	cana	cana	13,27	0,01
pastagem	cultura anual	cana	cana	8.501,01	7,33
cultura anual	cultura anual	cana	cana	10.420,80	8,98
pastagem	pastagem	cana	cana	25.915,76	22,35
vegetação	vegetação	vegetação	cana	41,51	0,04
cultura anual	cultura anual	cultura anual	cana	20.000,02	17,25
pastagem	pastagem	pastagem	cana	8.080,01	6,96
pastagem	cultura anual	cultura anual	cana	7.040,01	6,07
pastagem	pastagem	cultura anual	cana	30.200,10	26,03

Fonte: Dados dos mapas elaborados sobre imagens Landsat TM5 dos mesmos anos.

- **Dinâmica de expansão por tipos de solos**

No que se refere à expansão da cana-de-açúcar em relação aos diferentes tipos de solos da MRQ, constatou-se que a cultura se deu em um primeiro momento sobre os Latossolos Vermelhos, e por último sobre os Argissolos, Gleissolos e finalmente nos Neossolos Quartzarênicos. A área utilizada com Latossolos em 2010 tornou-se largamente a dominante totalizando 1.081km², ou seja, 93,2% da área total ocupada pela cana-de-açúcar na microrregião. Em segundo lugar estão os Argissolos, com área reduzida de 45,58 km² os quais somados à área dos Gleissolos com 31,7 km², representam 6,7% da MRQ. Por fim, há uma inserção de cana-de-açúcar pouco expressiva sobre os Neossolos Quartzarênicos, com apenas 1,431 km² representando 0,12% da área total.

Tal fato, no entanto, se apresenta bastante representativo da ideia de continuidade do processo de expansão da cana-de-açúcar sobre os diversos tipos de solo, o que evidencia a capacidade de adaptação deste tipo de cultivo em virtude da grande gama de variedades da cana planta (ou cultivares) (tabela 08).

Tabela 08: Tipo de solos em áreas com cana-de-açúcar.

Tipo de solos	Área em ha	Área em km²	%
Latossolos	108.130,133	1.081,301	93,22
Argissolos	4.558,050	45,580	3,93
Gleissolos	3.171,774	31,718	2,73
Neossolos Quartzarênicos	143,050	1,431	0,12
Total	116.003,007	1.160,030	100

Fonte: Dados do cruzamento entre as áreas de cana-de-açúcar em 2010 e o mapa de solos.

Em virtude da expressiva participação dos Latossolos como solo preferido no processo de expansão inicial da cana-de-açúcar, tornou-se necessário considerá-los a partir de suas distintas subclasses visíveis na escala adotada, em particular três subclasses: o Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), o Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd). Pode-se observar, a partir dos dados da tabela 09, que a maior parte dos polígonos de cana-de-açúcar recobrem o LVdf, com 55,69% correspondendo a uma área de 602,248 km², em segundo lugar recobrem os LVd, com 42,06% e uma área de 454,730 km²; por fim os LVAd com 2,25% e área de 24,320 km².

Tabela 09: Tipo de Latossolo em área com cana-de-açúcar.

Tipo de latossolos	Área em ha	Área em km²	%
LVdf	60.224,810	602,248	55,69
LVd	45.473,100	454,730	42,06
LVAd	2.432,090	24,320	2,25
Total	108.130,133	1.081,301	100

Fonte: Mapa de solos disponível no SIEG e interpretação de imagem Landsat TM5 de 2010. LVdf – Latossolo Vermelho distroférico; LVd – Latossolo Vermelho distrófico; LVAd – Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

A análise desses dados deve ser considerada conjuntamente com os mapas da dinâmica espaço-temporal da expansão, lembrando que a inserção da cana-de-açúcar ocorreu inicialmente nas áreas já destinadas à cultura de grãos, predominantes na porção leste da MRQ, onde dominam os solos de maior aptidão agrícola, ou seja, os LVdf. Em um segundo momento, quando da expansão em maior escala, a partir de 2008, já se observa uma tendência

de ocupação em solos do tipo LVd, referentes à áreas ocupadas pela pastagem bem como do LVAd, ambos menos nobres e com pastagem.

É possível que essa fase inicial da expansão da cana-de-açúcar na MRQ tenha sido programada para gerar custos menores, uma vez que as usinas estavam em construção, e, com isso, maior e mais rápido retorno de investimentos. Tal programação hoje foi mudada, uma vez que outras usinas entraram em operação, assim como a cana-de-açúcar se expandiu para as áreas de pastagem, onde os custos de produção são maiores, devido maior distância das usinas e necessidade de maiores investimentos na recuperação dos solos para o plantio da cana-de-açúcar, para o que o cultivo de soja por cerca de duas safras é benéfico.

Conclusões

Os dados apresentados a respeito da expansão da cana-de-açúcar na MRQ permitem concluir, neste capítulo, que o processo apresentou duas fases: uma primeira com evidente substituição de áreas de culturas de 2006 a 2008, instalada ao nordeste da microrregião. E uma segunda, com substituição das pastagens, rumo ao oeste e sul da microrregião, cuja transição ocorre a partir de 2008, em diante, admitindo-se uma fase intermediária em que as duas formas de conversão de uso eram praticadas. Porém, estatisticamente, em termos de balanço geral, na MRQ, no período de 2004 a 2010, a cana-de-açúcar substituiu mais pastagens do que áreas com cultura de grãos, o que de certo modo mascara a questão da reconversão agrícola e corrobora o discurso oficial de substituição preferencial de pastagens degradadas que a cultura da cana-de-açúcar é capaz de recuperar. As explicações possíveis para esse processo decorrem da aptidão dos solos, do clima favorável, além da oferta logística e dos investimentos.

Observou-se também que a substituição das áreas agrícolas situada a nordeste da microrregião, associa-se aos melhores solos, os LVdf, os quais já estavam bem preparados e manejados pelos grãos, que antecederam a cana-de-açúcar, não necessitando, portanto, de grandes investimentos para prepará-los para o plantio canavieiro. É possível, assim, que a fase inicial tenha gerado custos menores e, com isso, maiores e mais rápida amortização e retorno de investimentos, concomitantemente à construção das unidades industriais e plantio inicial, o qual de 2008 em diante pode ser redirecionado às áreas de pastagem, que podem requerer mais investimento no seu preparo para o plantio da cana-de-açúcar.

Por fim, algumas considerações finais ainda merecem serem feitos sobre os impactos conhecidos da cana-de-açúcar sobre os solos de textura média a argilosa, como é o caso, os

quais favorecem a sua compactação. Os LVdf, ocupados inicialmente pela cana-de-açúcar, antes estavam com a cultura de grãos, a qual apresenta boa densidade e profundidade radicular, sendo revolvidos anualmente, de modo a minimizar os efeitos do potencial natural deste solo ao impacto da compactação. Contudo, com a inserção da cana-de-açúcar, cultura de ciclo longo (5 a 7 cortes equivalendo a pelo menos 5 anos, só após os quais é reformada), concomitantemente à circulação de maquinário pesado em todas as fases do preparo do solo à colheita é de se esperar que a compactação seja fato.

A compactação ocorre também com frequência em áreas de pastagem degradada, associada ao pisoteio animal e manejo inadequado do próprio pasto e gado, que causa vários problemas, como comprometimento da qualidade do produto agrícola, da produção e produtividade, além do que, pode induzir processos erosivos e, conseqüentemente assoreamento, com repercussões nos corpos hídricos, que podem, inclusive, levar insumos e defensivos agrícolas adsorvidos nas partículas carregadas pela erosão. Tal impacto também é esperado nestas áreas após a inserção do cultivo da cana-de-açúcar, ainda que receba soja por um ou dois anos agrícolas, prática usual no setor, uma vez que, como dito anteriormente, o manejo da cana-de-açúcar é potencializador da compactação dos solos. Diante disso, observa-se a necessidade de avaliar os riscos de ocorrência desse tipo de impacto, o que, certamente, vai requerer maiores investimentos no manejo e conservação do solo para que o setor seja sustentável na microrregião.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E METODOLÓGICOS DA PESQUISA

O referencial teórico que serviu de base ao desenvolvimento da pesquisa e ora apresentado prioriza os temas considerados de interesse inequívoco, como a seguir.

2.1 Considerações históricas sobre a expansão da cana-de-açúcar no Brasil e em Goiás

Resumidamente, a história da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) se inicia no Brasil em 1532, trazida das Índias, tendo sido disseminada primeiramente nas capitanias de São Vicente (hoje São Paulo), Pernambuco, Paraíba do Sul (hoje norte Fluminense) e daí para os demais estados, representando, nos séculos XVI e XVII, a principal riqueza do país (CARDOSO, 2006). Entretanto, ainda que os engenhos tenham marcado indelevelmente a cultura e economia brasileira, em especial a região nordeste do país, a indústria alcooleira só foi declarada como de interesse nacional em 1942, sendo notadamente um setor de destaque nas políticas públicas federais em 1975, através do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que teve como meta a produção de álcool como combustível automotivo, à base de subsídios que promoveram uma grande expansão da monocultura da cana-de-açúcar em diversos estados, sobretudo o Centro-Sul do Cerrado, onde se inclui o estado de Goiás (WWF, 2000).

O Proálcool foi desativado no final da década de 1980, por várias razões, dentre elas a incapacidade do país na época em resolver questões dos motores automotivos à álcool, além de problemas de regularização de abastecimento, quando se esgotaram os subsídios do Governo e o setor entrou em crise (BRAY *et al.*, 2000). Tal crise se manteve até o final da década de 1990, quando nova e acelerada expansão se instala no país, motivada pela busca de novas alternativas energéticas aos produtos fósseis, pela superação da tecnologia do setor automotivo, através da tecnologia flex, e da melhoria logística. Some-se a isso o contexto internacional relativo à busca de alternativas energéticas mais limpas, desde a Rio 92 e o Protocolo de Quioto.

A nova expansão nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, além de manter a produção de açúcar, no que o país é líder mundial, retoma fortemente a produção do etanol, justificada por fatores econômicos atrelados ao apelo ambiental, que correlaciona o alardeado aquecimento global à emissão de gases tóxicos, proveniente dos motores de veículos

automotivos movidos a subprodutos do petróleo (SACHS, 2007; WWF, 2008; KOHLHEPP, 2010). Desta feita, o incremento teria como foco a expansão referente a uma proposta de interiorização e regionalização do desenvolvimento, privilegiando as regiões tidas como menos desenvolvidas, conforme publicado no Programa Nacional de Agroenergia (PNA) (BRASIL, 2006), ou seja, a expansão se daria nas terras consideradas como “menos exploradas”, dentre as quais os Cerrados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Amazônia. Como pressuposto dessa política, a expansão deveria ocorrer em áreas degradadas, ocupadas preferencialmente por pastagem, de modo a não conduzir a novos desmatamentos da vegetação nativa e a não competir com a produção de alimentos, visando a segurança alimentar. Convém chamar a atenção para o fato de que desde o Proálcool a expansão sempre priorizou áreas de Cerrado devido às suas condições edafoclimáticas e de relevo, considerados muito favoráveis às demandas dessa planta oriunda de ambientes tropicais com sazonalidade marcada.

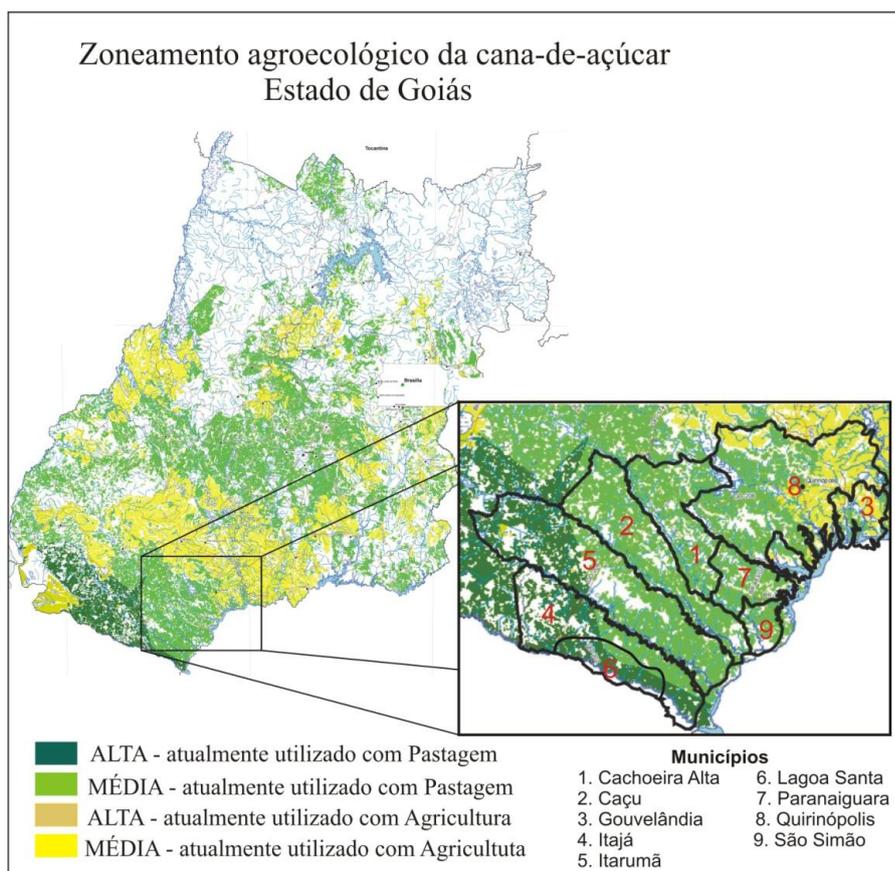
Segundo Manzatto *et al.* (2009), no Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar (ZAE) o Brasil teria 64 Mha de áreas com aptidão média a alta para o cultivo da cana-de-açúcar, das quais 12 Mha estariam em Goiás, sobretudo na sua porção sul e central, onde se inclui a MRQ, levando a deduzir que as áreas de expansão correspondem a cerca de 37 % de todo o território estadual. Nesse zoneamento foram considerados os fatores relativos à aptidão edafoclimática, às restrições ambientais, as formas do relevo e usos pré-existentes da terra, onde 7.781.734,06 ha (~65% daquele total) eram utilizados com pastagem e 4.818.796,75 ha (~35%) com agricultura (figura 20).

Cabe ressaltar as terras apontadas como áreas de expansão se encontram utilizadas com agricultura e pastagem, mas o ZAE não destaca quais se encontram degradadas, de modo a se constituírem em áreas prioritárias para a expansão canavieira, conforme indicado no citado PNA. Não são indicadas também, as áreas com remanescentes de vegetação ou mesmo as áreas de preservação permanente. Em parte isso se justificaria pela escala adotada (1:250.000), por outro lado, não considera os critérios de variação de culturas para fins de segurança alimentar.

Assim, o ZAE apresenta regionalmente as áreas consideradas como aptas e que são passíveis de inclusão no processo de expansão da cultura, o que permite reforçar a ideia da possibilidade de substituição de culturas (cultura de grãos/cana, pastagem/cana), além de novos desmatamentos, como, diversos autores vêm enfatizando (CASTRO *et al.*, 2007; NASSAR, 2008; ABDALA; CASTRO, 2010; CASTRO *et al.*, 2010; SILVA; CASTRO,

2011; SILVA; MIZIARA, 2011; BORGES, 2011) o que deixa clara a contraposição entre o discurso oficial e a prática de expansão. Para esses autores, a cana-de-açúcar entrou principalmente em áreas utilizadas anteriormente pelas culturas anuais, sendo que, no caso do sudoeste goiano, região de interesse desta tese, iniciou-se em áreas de cultivo de soja.

Figura 20: Mapa do Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar para o estado de Goiás considerando o uso atual das áreas. Destaque para microrregião de Quirinópolis.



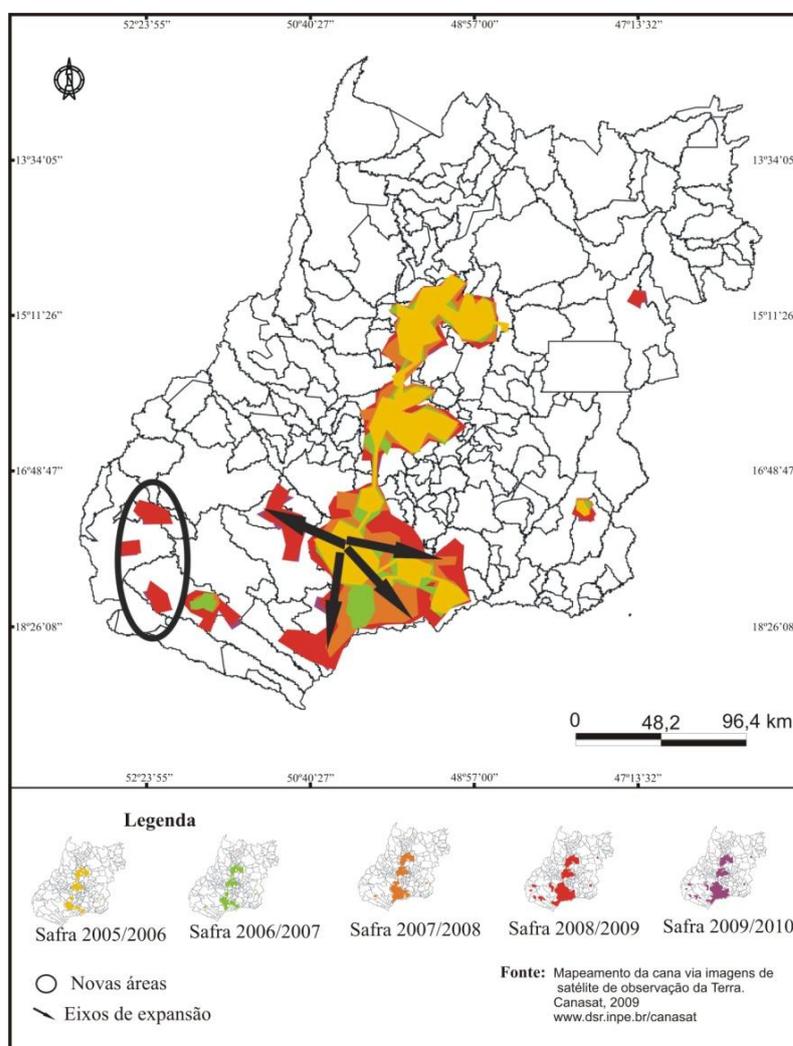
Fonte: adaptado de Manzatto *et al.* (2009).

A não inserção inicial da cana-de-açúcar em áreas de pastagem degradada poderia estar associada ao custo de recuperação dos solos que seria maior. Corroborando esse processo a localização das usinas, onde as instaladas e registradas após o ano de 2006 se situaram inicialmente no eixo norte/sul, para em seguida se espalhar na direção sudoeste do estado, obviamente sempre próximo às principais rodovias e hidrovias para garantir o escoamento da produção (RIBEIRO, 2010; SILVA; MIZIARA, 2011).

Analisando os eixos de expansão da cana-de-açúcar (figura 21) pode-se constatar que a porção central, sentido norte-sul do estado que era tradicionalmente de uso agrícola embora contivesse usinas da época do Proálcool, foi onde a expansão se iniciou (safra 2005/2006,

2006/2007 e 2007/2008), para em um segundo momento, desde o plantio intensificado de 2006 e a partir da safra 2008/2009, se direcionar para o sudoeste do estado, quando também se expande preferencialmente sobre áreas já utilizadas pela agricultura, situação que se mantém na safra 2009/2010. É oportuno lembrar que esses eixos também foram alvo preferencial do projeto de Expansão de Fronteiras Agrícolas do estado na década de 70 do século passado (CASTRO *et al.*, 2007; CASTRO *et al.*, 2010; SILVA; MIZIARA, 2011), o que se pode justificar pelas condições edafoclimáticas e de relevo que se traduzem em uma aptidão agrícola satisfatória.

Figura 21: Mapa dos eixos de expansão da cana em Goiás. Destaque para um primeiro momento de expansão no eixo norte/sul e em seguida se deslocar para o eixo sul/sudoeste.



Fonte: Silva e Miziara (2011).

A combinação que tornou Goiás alvo da expansão, com pequena área de alta aptidão e predomínio de áreas com médio potencial para a expansão da Fronteira Agrícola da década

passada e agora para a expansão da fronteira da cana-de-açúcar, considera as características edafoclimáticas favoráveis, não ponderando, diretamente, outros fatores que também influenciam o processo. O primeiro se refere ao valor mais barato das terras em relação às áreas de ocupação tradicional da cultura, principalmente São Paulo, além da relativamente hoje pequena distância dos principais mercados consumidores, favorecida pelas vias de escoamento da produção do estado.

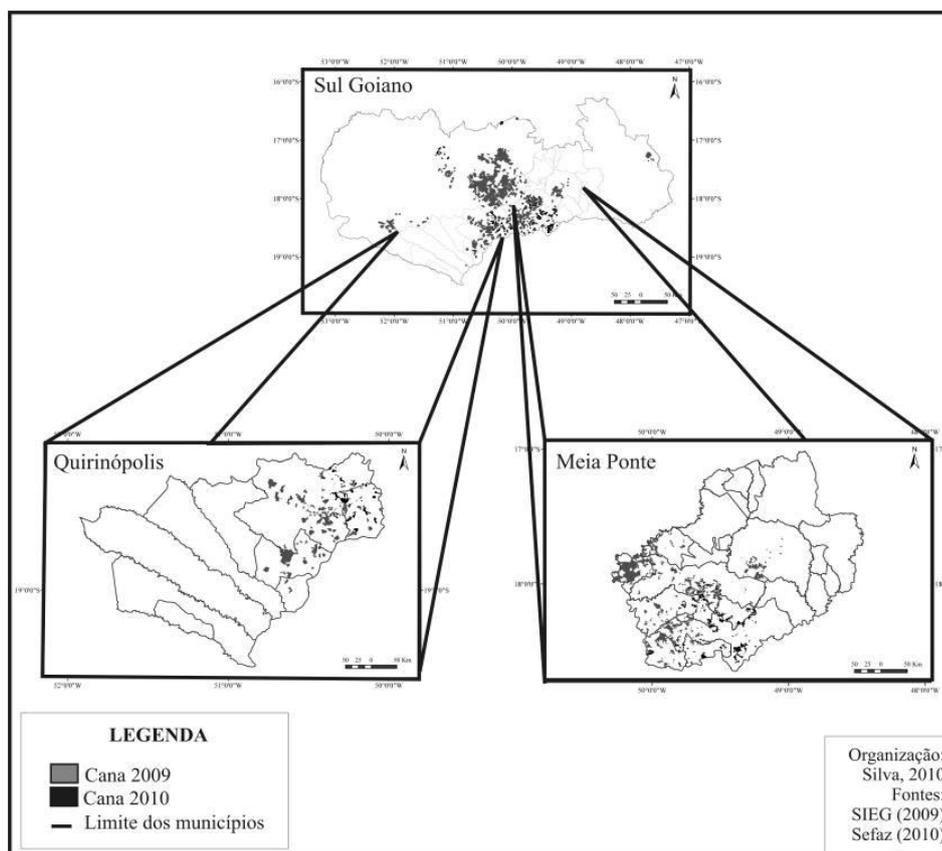
Goiás conta hoje com uma rede rodoviária federal (BR 153, BR 060, BR 050, BR 364, BR 452) e estadual (GO 060, GO 326, GO 164, GO 251), hidroviária e portuária (Hidrovia Rio Paranaíba via Porto de São Simão, que faz parte da Hidrovia Paraná-Tietê), ferroviária (Ferrovia Norte-Sul), além poliduto (oleoduto, gasoduto e alcooduto), cujo trajeto provém da Bolívia, passando pelo Sudoeste Goiano, próximo a Quirinópolis (GO), rumo a Senador Canedo (GO), na região metropolitana de Goiânia (GO), prosseguindo até Paulínia (SP) e de lá para o Porto de Santos (SP) (CASTRO *et al.*, 2007; CASTILLO, 2007; RIBEIRO, 2010). Considera-se ainda que o transporte multimodal, que combina mais de dois meios de transporte, apresenta vantagens, como o menor custo no deslocamento de mercadorias, contrapondo-se a desvantagens como o custo embutido para a transferência do produto entre os modais (UNICAMP/UNICA, 2005). Segundo Castillo (2007), uma rede com boa infraestrutura de fluxos e circulação de mercadorias facilita a circulação interna e viabiliza a exportação, impondo maior competitividade à produção brasileira.

É preciso reafirmar, no entanto, que embora a história da cana-de-açúcar em Goiás não seja recente, pois que em 1935 já havia cerca de 1.400 engenhos nos municípios goianos (SANTOS, 1987), a produção aumentou gradativamente até 1988, tendo sofrido declínio em 1995 e daí em diante tendo experimentado novo e notável crescimento, sendo um dos principais eixos da recente expansão de fronteira da cana-de-açúcar. Tanto é assim que na safra de 1995/1996 apresentou uma produção de 6 milhões de toneladas, na safra 2008/2009 saltou para uma produção de 29 milhões de toneladas e continua crescendo. Na safra 2009/2010 alcançou 40 milhões de toneladas, passando a 46 milhões de toneladas na safra 2010/2011, a 48 milhões de toneladas na safra 2011/2012, e tem uma previsão de 51 milhões de toneladas para atual safra 2012/2013 (CONAB, 2012). Isso significa um incremento da ordem de 850% no período, tendo por base a safra 1995/1996 (BORGES, 2011).

Na Mesorregião Sul do estado, as microrregiões com maior área plantada na atualidade são Sudoeste de Goiás, Meia Ponte e Quirinópolis. Estudos de Abdala e Castro (2010) e Castro *et al.* (2010), demonstram que na microrregião Meia Ponte a expansão da

cana-de-açúcar se deu através de substituição de culturas, principalmente de soja e, secundariamente, pastagem (figura 22). Esse comportamento já havia chamado a atenção de Nassar *et al.* (2008) e foi confirmado recentemente por Ferraz (2012).

Figura 22: Mapa dos polígonos de cana-de-açúcar na mesorregião Sul Goiano, com destaque para as microrregiões Quirinópolis e Meia Ponte.



Fonte: Castro *et al.* (2010).

Nesse contexto da expansão inicial logo após 2004, a MRQ se destaca. Como exposto possui sete usinas, sendo quatro em operação e três em implantação, além de um processo de expansão, em termos de área de produção de cana-de-açúcar, que provocou mudanças significativas na forma de uso e ocupação das suas terras, evidenciadas pela substituição de culturas e pelo aumento da área de produção (BORGES, 2011), que passou de 5,6 mil ha em 2006/2007 para 254,8 mil ha na safra de 2011/2012, um incremento de área plantada da ordem de 4.550% (CANASAT, 2012), valores extraordinários e incomparáveis no estado e mesmo no país. Considerando que até 2004 não existiam áreas de cana-de-açúcar nessa microrregião, mas sim o predomínio de áreas de pastagem extensiva e poucas com culturas de grãos, na maior parte de soja, a qual embora tenha diminuído ainda se mantém

expressiva. Tais fatos tornam essa microrregião bastante atrativa para estudos da expansão recente da cana-de-açúcar em Goiás e justificam a escolha da área.

2.2 Compactação dos solos agrícolas

Todo solo quando observadas e respeitadas suas características originais é passível de uso sustentável, de modo que possa servir às suas funções ambientais (ou serviços ambientais) principais, sendo elas, a ecossistêmica e biológica, de trocas com a atmosfera e de filtro, além das funções alimentares, de matéria-prima, suporte de edificações, social, cultural e econômica, dentre outras (RUELLAN *et al.*, 1993). Porém, quando um solo é submetido a uma determinada pressão, podem ocorrer alterações em suas características naturais, tais como redução da macroporosidade, aumento da densidade do solo (DS), redução da porosidade total (PT), aumento na resistência à penetração radicular (RP), além de alteração do fluxo de água, de calor e na disponibilidade de água e nutrientes para as plantas e animais de sua biota. Tais alterações promovem a instalação de impactos diversos, tais como os resultantes na compactação do solo (CAMARGO; ALEONI, 1997; RIZZO, 2000; TRINDADE *et al.*, 2008; PREDOTTI; MELLO JÚNIOR, 2009; REICHERT *et al.*, 2010).

A compactação resulta da compressão do solo não saturado, embora em condição de umidade ótima, e promove a redução do volume total dos poros que esta associada ao rearranjo das partículas sólidas, promovendo a expulsão do ar dos poros, implicando na modificação de sua estrutura interna (DIAS JÚNIOR, 2000). Trata-se de um processo onde se observa uma alteração física, cujas consequências afetam diretamente o comportamento hídrico e do ar no solo e a temperatura, além de afetar o desenvolvimento das raízes das plantas e sua nutrição, podendo promover a proliferação de doenças, em geral por fungos, e a erosão dos solos, devido à redução notável das taxas de infiltração (KERTZMAN, 1996).

As causas deste processo podem ser relacionadas a forças internas ou externas. As forças internas são aquelas resultantes de ciclos como: congelamento, degelo, umedecimento e ressecamento, que promovem a expansão e contração do solo. Já as forças externas, resultam do tráfego de veículos, animais e pessoas. Considerando o tráfego de veículos em áreas agrícolas, tem-se duas fases de maior impacto, a primeira relativa ao momento do preparo do solo, onde a energia é empregada para destruir os macroagregados do solo. Já a segunda fase é relativa ao tráfego posterior de máquinas e implementos, que atuando sobre

um solo bem preparado, aplicam sua energia para empurrar as partículas do solo umas contra as outras, geram um novo arranjo das partículas e agregados do solo, tornando-o mais compacto e menos poroso. Considera-se, no entanto, que quanto maior a pulverização por ocasião do preparo, maior será a destruição dos agregados e o potencial de compactação posterior (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Além desses, dependendo do tipo de cultivo, outro momento de impacto no solo é causado na fase da colheita, quando as colheitadeiras mecânicas, máquinas de grande porte e pesadas, também comprimem a massa do solo. Tal prática é bastante utilizada na atualidade, principalmente em lavouras de cana-de-açúcar, o que vem tornando ainda mais comum os problemas de compactação dos solos agrícolas (SEVERIANO *et al.*, 2010; PACHECO; CANTALICE, 2011). Segundo Casagrande (2002), uma carregadeira de cana pode causar compactação em até 10 cm de profundidade, já um sistema de transporte via “biminhão”, em que as carrocerias podem levar até 30 t cada uma quando cheia, podem chegar a até 30 cm de espessura de compactação. Tais impactos, quando relacionados ao maquinário agrícola, não ultrapassam, no geral, 50 cm de profundidade. Mas seus efeitos podem ser sistêmicos, isto é, resultar em desequilíbrios em cadeia.

Dentre as principais consequências da compactação dos solos têm-se as relacionadas à restrição ao crescimento e desenvolvimento radicular, em virtude da limitação ao acesso para a adsorção² e, ou, absorção³ de nutrientes, o que afeta a produção da planta e a produtividade agrícola, reduz a infiltração e a redistribuição da água induzindo o aumento do escoamento superficial e, por consequência, a erosão dos solos (DIAS JÚNIOR, 2000). O transporte de água pela enxurrada, causando ainda o carreamento de partículas de solo, de plântulas e mesmo de adubos e pesticidas para os canais de drenagem, pode ainda promover seu assoreamento (sedimentação acelerada) e eutrofização pelos nutrientes (sobretudo fósforo) contidos nos adubos, além da contaminação pelos pesticidas (EMBRAPA, 2003).

Outra consequência da compactação dos solos é a perda da estabilidade dos agregados, o que promove mudanças em diversas características, tais como: aumentos nas taxas de dispersibilidade de argila, na instabilidade de agregados em água, nos módulos de ruptura, na força de tensão e na resistência à compressão. A compactação pode ser vista em campo através dos seguintes sintomas observados nos solos: formação de crosta superficial

² Adsorção é a adesão de moléculas de um fluido (adsorvido) a uma superfície sólida (adsorvente) (DIASJUNIOR, 2000).

³ Absorção é um fenômeno ou processo físico ou químico em que átomos, moléculas ou íons introduzem-se em alguma outra fase, normalmente mais massiva, e fixam-se (DIAS JUNIOR, 2000).

(adensamento); fendas nas marcas das rodas do trator, presença de zonas compactadas de subsuperfície, empoçamento de água, erosão, aumento na necessidade de potência na máquina para o cultivo e a presença de restos de resíduos não decompostos meses após a incorporação (DIAS JÚNIOR, 2000; RIZZO, 2000).

Na definição do potencial de compactação do solo, um dos fatores considerados se refere às características naturais dos diferentes tipos de solo, onde as principais características potencializadoras são a classe do solo, a homogeneidade do perfil, a textura e a variação entre os seus horizontes. Os solos considerados de maior potencial natural de compactação apresentam horizontes homogêneos, textura argilosa a muito argilosa, sendo esta homogênea ao longo do perfil e estando, geralmente, associadas a um relevo plano ou suave ondulado que favorece a circulação das máquinas (KERTZMAN, 1996).

Em áreas de uso e ocupação com monocultura da cana-de-açúcar, os fatores que potencializam o processo de compactação dos solos são de ordem externa, ou seja, decorrentes de pressão de rodas, esteiras ou de outros equipamentos pesados, utilizados no cultivo, no controle de pragas e principalmente na colheita mecânica. Tal procedimento, quando realizado em condições de elevados conteúdos de água nos solos, causam alterações na estrutura, devido sua plasticidade em estado úmido, com consequente compactação dos solos, sendo que, segundo Severiano *et al.* (2010), ainda que a colheita seja realizada dentro da zona de friabilidade do solo pode provocar sua compactação adicional.

Estudos sobre processos de compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar vêm demonstrando que o sistema radicular das plantas tem seu desenvolvimento limitado pelo aumento na resistência à penetração (RP), principalmente quando o solo está com umidade no ponto de murcha permanente, cenário esse que ao promover a redução dos poros conduz à diminuição do suprimento de oxigênio, fazendo com que a absorção de nutrientes seja menor e a planta se torne mais suscetível a doenças, sobretudo nos períodos de estiagem (CASAGRANDE, 2002; OTTO *et al.*, 2011). Neste sentido, estudos apontam que quando a cana-de-açúcar é cultivada por um período maior tende a apresentar aumento no valor da densidade do solo, além de redução na porosidade total e da macroporosidade, ainda que o manejo altamente tecnificado seja apontado como o fator mais importante para instalação de tais alterações do que o tempo de cultivo (OLIVEIRA *et al.*, 1995; PRADO; CENTURION, 2001; SOUZA *et al.*, 2006; SEVERIANO *et al.*, 2009).

Silva e Ribeiro (2007) também observaram aumentos significativos nos valores de densidade do solo nos horizontes A e AB, em uma área cultivada há dois anos, mas, com

tendência a decréscimo nos anos seguintes, chegando, após vinte cinco anos de cultivo, a valores próximos aos verificados para vegetação natural. Tal resultado evidencia a ocorrência de grande impacto inicial nos solos, em virtude da remoção da vegetação anterior, assim como, do manejo durante os primeiros anos, mas com tendência a reestruturação ao longo dos anos, em virtude do “sistema radicular fasciculado da cultura e o seu caráter semiperene, com movimentação do solo apenas a cada seis anos” (SILVA; RIBEIRO, 2007 p. 68).

Considera-se, portanto, que o uso de gramíneas como a cana-de-açúcar pode auxiliar na recuperação de estruturas degradadas, uma vez que em decorrência de sua alta densidade de raízes promove a aproximação de partículas pela constante absorção de água no solo, assim como as renovações do sistema radicular e a uniforme distribuição de exsudatos no solo, os quais estimulam a atividade microbiana, cujos subprodutos contribuem para a formação e estabilização dos agregados do solo (RIZZO, 2000; VASCONCELOS *et al.*, 2010). Trata-se, portanto, de práticas edáficas benéficas do manejo. Contudo, há limites a se observar, onde os indicadores são considerados úteis na avaliar da qualidade de um solo.

2.3 Indicadores estruturais de qualidade física dos solos

A estrutura do solo significa o arranjo natural das suas partículas primárias e poros associados em unidades compostas, os agregados, que são separados entre si por planos de fraqueza (USDA, 1993). É possível dizer que nem todos os solos apresentam estrutura agregada, como no caso dos solos muito arenosos, como, por exemplo, os Neossolos Quartzarênicos, onde não há coesão entre as partículas, as quais se apresentam na forma de grãos simples. Ou ainda, ao se considerar os horizontes argilosos dos Gleissolos, quando as partículas de argila estão tão ligadas entre si e envolvidas com água que não permitem a formação de planos de fraqueza, se apresentando de forma maciça. Estes são solos considerados apédicos (BREWER, 1976; BULLOCK *et al.*, 1985), ou seja, sem estrutura agregada.

Ao contrário, nos solos com textura muito argilosa e elevado teor de ferro, como os Latossolos Vermelho distrofêrricos (LVdf), solos bastante intemperizados e argilosos, desenvolve-se a estrutura forte, muito pequena, granular, denominada microagregada típica (SCHNEIDER *et al.*, 2007). Os mecanismos que propiciam a agregação dos elementos do

solo são a floculação⁴, a cimentação⁵ e a fissuração⁶, através das quais os arranjos dos agregados formam a estrutura do solo (RUELLAN; DOSSO, 2003). Para tanto, a ação de forças físicas, químicas e biológicas são essenciais, como por exemplo, através das pressões de inchamento geradas pelo efeito osmótico dos cátions trocáveis, adsorvidos nas superfícies das argilas, ou pela ação de animais cavadores, pelo efeito físico de ligação por raízes finas e micélios de fungos, ou ainda, pela força do impacto mecânico das águas da chuva, do pisoteio de animais e do peso das máquinas (WHITE, 2009).

Para Pedrotti e Mélo Júnior (2009) os fatores que afetam a formação dos agregados são os cátions, a matéria orgânica, o sistema de cultura e o sistema radicular, as condições de umidade e os microrganismos do solo. Já os fatores adversos à manutenção dos agregados são a falta de cobertura do solo, as operações agrícolas excessivas, o aumento da concentração de sódio em relação ao cálcio e magnésio e as temperaturas elevadas. É importante destacar que para o entendimento dos processos pedogenéticos atuantes nos solos, a caracterização dos constituintes das estruturas se torna essencial, uma vez que estes revelam o estado de equilíbrio ou desequilíbrio destas no solo.

Resende *et al.* (2007), Schneider *et al.* (2007) e Santos *et al.* (2005) destacam que em relação à escala macroscópica, na descrição das estruturas deve ser dada ênfase ao grau de desenvolvimento das unidades estruturais, além da classe ou tamanho dos agregados e ao tipo ou forma da estrutura. Assim, o grau de desenvolvimento da estrutura expressa a intensidade das ligações dentro e entre os agregados do solo, onde a coesão intra-agregada forte é a base de um grau forte de estrutura (WHITE, 2009), a qual varia entre sem estrutura (apédico), formada por partículas primárias desagregadas (grãos simples ou maciça) e com estrutura (pédico), quando as partículas estão ligadas umas às outras com a presença de zonas de fraqueza que os separa. A classe da estrutura refere-se ao tamanho dos agregados em termos de grandeza, variando entre muito pequena, pequena, média, grande ou muito grande. O tamanho do agregado também varia em relação ao tipo de estrutura. É o grau de separação (fraca, moderada, forte) que define o tipo de estrutura do solo.

O tipo de estrutura se refere à forma que o agregado se apresenta. Segundo Santos *et al.* (2005) as estruturas normalmente encontradas no solos são: laminar, em que as partículas

⁴ Precipitação da fase dispersa de um colóide pela reunião de partículas individuais, formando pequenos grumos ou agregados (CURI, 1993).

⁵ As partículas são mantidas juntas por substâncias cimentantes tais como o húmus, CaCO₃ ou óxidos de silício, ferro e alumínio (CURI, 1993).

⁶ Fator abiótico da gênese da estrutura que pode se referir à fissuração por dessecação, com dessecação por evaporação direta ou provocada pela absorção de água pela vegetação, ou ainda fissuração por umedecimento relacionada a ação de contração ou resistência a ruptura criada por fortes gradientes hídricos (CURI, 1993).

estão arranjadas em agregados cujas dimensões horizontais são mais desenvolvidas que as verticais, exibindo aspecto de lâmina com espessura variável, estão associadas a solos de regiões secas, ou ainda, a processos de compactação dos solos; a prismática quando as partículas estão arranjadas em agregados cuja dimensão vertical é mais desenvolvida, típicas de horizonte B de solos salinos ou alcalinos; em blocos ou poliédrica quando as três dimensões da unidade estrutural são aproximadamente iguais (equidimensionais), apresenta-se na forma angular ou subangular, estando relacionada às condições de drenagem, aeração, hidromorfismo e desenvolvimento radicular da vegetação no solo; e a granular ou esferoidal semelhante a estrutura em blocos, diferenciada por suas unidades estruturais serem arredondadas, formando grânulos ou grumos que conferem alta porosidade ao solo. Esta estrutura granular, também conhecida como microestrutura, pode ser formada a partir de processos físicos, geoquímicos ou biológicos (COOPER; VIDAL-TORRADO; CHAPLOT, 2005) e é a mais favorável às culturas em geral (RUELLAN; DOSSO, 2003).

Esses tipos de agregados são chamados agregados secundários e são compostos por unidades menores visíveis em macro e/ou microescala, chamados agregados primários, os quais apresentam um arranjo interno de grãos e poros. A formação dos macroagregados está diretamente relacionada à estabilização dos microagregados em unidades estruturais maiores (WHITE, 2009). Consistência diz respeito à resistência de um agregado ou de um bloco à destruição por pressão entre os dedos, sendo que esta varia em função da umidade, como, por exemplo, um agregado duro a muito duro em contato com água pode se tornar friável e um agregado friável pode permanecer estável, ou seja, a friabilidade pode indicar que um estado de compactação na estação seca pode ser facilmente revertido.

Uma boa estrutura do solo apresenta, primeiramente, uma grande proporção de agregados, os quais, circundados por macroporos, permitem a circulação de água e ar, assim como a vida de microrganismos. Segundo Schneider *et al.* (2007) a estrutura, do ponto de vista agrícola, representa uma característica dinâmica de grande importância no comportamento do solo, uma vez que condiciona a porosidade do solo, influenciando em fatores como suprimento de água e ar para as plantas. A estrutura pode ser avaliada considerando a densidade do solo, sua geometria, infiltração e potencial de retenção de água e aeração, além de tamanho e continuidade dos poros que a compõem (PEDROTTI; MÉLLO JÚNIOR, 2009).

Complementando o estudo qualitativo das estruturas, tem-se a porosidade do solo, a qual representa elemento diagnóstico fundamental para a observação de mudanças na

estrutura dos solos. A porosidade se refere ao volume não ocupado por constituintes sólidos (componentes minerais ou orgânicos), mas apenas por líquidos e gases, sendo ainda considerada a via de transferência das atividades biológicas (RUELLAN; DOSSO, 2003). Essa propriedade do solo é determinada pelo arranjo ou pela geometria das partículas, a qual varia em tamanho, forma, regularidade ou tendência de expansão (no caso das argilas do tipo 2:1) e pela movimentação da água. A porosidade permite que o solo desempenhe um papel de grande importância no funcionamento da paisagem, sendo elemento de interface entre a atmosfera, a litosfera, a hidrosfera e a biosfera, por ser via de circulação e trocas.

A porosidade influencia a dinâmica das trocas gasosas entre solo e atmosfera no que se refere a: CO₂, NH₄, além de regular as circulações hídricas verticais e laterais, influenciando, também, na recarga do lençol freático e na composição química das águas, através da perda de elementos por contato. Sua redução também influencia na dinâmica do solo uma vez que dificulta a infiltração causando a enxurrada das águas e consequente erosão superficial e subsuperficial (RUELLAN; DOSSO, 2003).

A porosidade se modifica em função do manejo, assim, o solo quando protegido pela cobertura vegetal natural, sem ter sofrido intervenções antrópicas, se encontra em equilíbrio ecossistêmico também em termos de porosidade, prestando os serviços ambientais esperados. Considera-se que um solo em condições de equilíbrio possui cerca de 50-60% de seu volume ocupado por poros, enquanto que em um solo compactado a porosidade total varia em torno de 25%. Em relação ao tamanho dos poros, quando o solo se encontra compactado, a tendência é um aumento relativo do número de microporos em relação ao de macroporos, ou seja, todo solo possui poros, estes, no entanto, variam de número, tamanho, distribuição, forma e continuidade, dependendo do tipo de solo e do contato intergrãos ou interestruturas.

Assim, para melhor compreender o sistema poroso e seu comportamento associado à dinâmica físico-hídrica e geoquímica, seu estudo envolve uma avaliação quantitativa, através dos princípios da pedologia quantitativa ou pedometria, avaliada através de estudos de morfoporosidade ou da morfologia dos poros (CASTRO *et al.*, 2003), que permitem a quantificação global da porosidade, além de quantificar os tamanhos e conectividade dos poros com precisão, além de considerar critérios relativos a forma e à orientação dos poros (COOPER, 1999).

Os poros podem ser classificados em relação ao tamanho, em geral subdivididos em duas dimensões, sendo macroporos ou microporos. A macroporosidade é constituída por poros de diâmetros maiores que 30µm, onde a água se move por gravidade, permitindo sua

movimentação rápida por infiltração e percolação, contribuindo para a recarga dos níveis freáticos, além da livre movimentação do ar. Neles ocorre o desenvolvimento do sistema radicular além de abrigar a meso e micro fauna dos solos. Já a microporosidade apresenta, em geral, poros capilares, menores de 30µm de diâmetro que armazenam água retida a maiores pressões, com nutrientes dissolvidos, mas disponível para as raízes, sendo importante para a sua nutrição mineral (CHAUVEL, 1979; KIEHL, 1979).

Existem diversas possibilidades de mensuração do tamanho dos poros, que variam de autor para autor (BREWER, 1976; CHAUVEL, 1979; COOPER, 1999, dentre outros). Os poros podem ser classificados ainda de acordo com suas formas, gênese e funções (quadro 1).

Quadro 01: Classificação dos poros do solo e algumas funções.

Classes simplificadas	Classes*	Diâmetro efetivo mm	Características e funções
Macroporos	Macroporos	0,08 a > 5	Encontrada entre unidades estruturais. Drenagem de água gravitacional, difusão de gases; acomoda raízes e a biota do solo.
Microporos	Mesoporos	0,03-0,08	Retenção de água; movimento da água por capilaridade, habitat de fungos e de raízes finas.
	Microporos	0,005-0,03	Encontrada dentro das unidades estruturais. Retenção de água disponível para as plantas, habitat da maioria das bactérias.
	Ultramicroporos	0,0001-0,005	Presente em solos argilosos. Retenção de água não disponível para as plantas.
	Criptoporos	< 0,0001	Seu tamanho exclui todos os microrganismos e moléculas de maior tamanho.

Fonte: *BREWER (1976); *Soil Science Society of America* (1996)

Compondo as microestruturas, o espaço poroso do solo é formado por vários processos que resultam em poros de diferentes formas. Os poros do tipo empacotamento ou empilhamento resultam do amontoamento de agregados ou grãos de material grosseiro do solo (areias), sendo irregulares, não orientados e fortemente interconectados. Os poros tipo cavidades são relativamente grandes e apresentam formas de esféricas a alongadas, não são interconectadas a outros poros e em geral resultam de dissolução de minerais primários. Os canais por sua vez são poros alongados, de forma cilíndrica e diâmetro constante, na maior parte do comprimento escavados pela fauna ou flora. As câmaras e galerias são poros cavitários interconectados por canais compondo redes e se originam da ação biológica. As vesículas apresentam alisamento das paredes e formas arredondadas e regulares, e resultam de aprisionamento temporário de bolhas de gases na massa do solo. Já as fissuras são formadas

pela contração do solo por dessecação e formam rachaduras ou trincas, sendo mais proeminentes quando se trata de argilas expansivas (CASTRO, *et al.*, 2003).

Segundo Soares *et al.* (2005c) as práticas mecânicas afetam a estrutura original dos solos, modificando-a em virtude do peso de máquinas pesadas e do uso intenso de implementos agrícolas que modificam o tamanho dos agregados e dos poros, afetando a relação macroporos/microporos, com aumento na proporção de poros pequenos em relação aos grandes, reduzindo a produtividade, obrigando muitos agricultores a investimentos elevados na recuperação dos solos assim degradados. Situação essa que também tende a causar erosões aceleradas pela diminuição das taxas de infiltração e aumento do escoamento superficial, induzindo também a assoreamentos, perdas de nutrientes, queda na produtividade e poluição dos mananciais (ESPINDOLA, 2008).

Em relação aos impactos ambientais promovidos pelo cultivo da cana-de-açúcar, os relacionados à estrutura do solo são devidos ao preparo com sulcamento, adubação, controle químico de pragas, cultivo mecânico, queima e transporte dos colmos (PASQUALETTO; ZITO, 2000; MACEDO, 2005; UNICAMP/UNICA, 2005; WWF, 2008; EMBRAPA, 2011). Além desses, os impactos relacionados ao manejo com uso de colheitadeira mecânica, realizada em condições de elevados conteúdos de água nos solos, causam alterações na estrutura por compactação onde, segundo Severiano *et al.* (2010), mesmo que a colheita seja realizada na zona de friabilidade pode provocar compactação adicional do solo.

Nesse mesmo sentido, Silva *et al.* (1998) afirmam que o uso agrícola dos solos causa mudanças na morfologia dos horizontes, sobretudo nos horizontes superficiais, com formação de um horizonte Ap com sensível perda de estrutura no primeiro ano de cultivo. Exemplo de alteração física e morfológica de solos sob cultivo de cana-de-açúcar sob manejo intensivo e uso de maquinário pesado, também foi apresentado por Soares *et al.* (2005a), onde foram observadas alterações na densidade e macroporosidade dos solos, além de transformações na estruturas, passando de microagregada (típica dos latossolos) para estrutura em blocos, decorrente do preenchimento dos espaços vazios do solo por argila dispersa. Outros autores também destacaram as transformações na estrutura e porosidade dos solos em decorrência do cultivo de cana-de-açúcar (SEVERIANO *et al.*, 2009; CEDDIA *et al.*, 1999; OTTO *et al.*, 2011; PACHECO; CANTALICE, 2011), em que os parâmetros comuns se referem ao aumento na densidade do solo (DS) e da resistência à penetração (RP) de raízes com diminuição no índice de porosidade total (PT) dos solos.

Importante destacar, no entanto, que nem toda forma de uso modifica negativamente a estrutura do solo. Há até mesmo a possibilidade de o manejo melhorar esse atributo em um dado solo, por exemplo, ao incorporar biomassa, como é o caso das gramíneas que contribuem para a recuperação da estrutura e mesmo da fertilidade dos solos degradados por compactação (RIZZO, 2000).

Por outro lado, quando o cultivo ocorre com manejo em resíduos da cultura anterior (Sistema Plantio Direto) com é o caso da palha da cana-de-açúcar, que é uma gramínea, promove a conservação do solo, contribuindo para a melhoria da quantidade de matéria orgânica (MO), com reflexos positivos sobre o balanço de nutrientes e para a microbiota pedológica. Além disso, sua decomposição promove uma ação física e bioquímica com ação indireta de substâncias produzidas (polissacarídeos) que atua na estabilização dos agregados do solo (RIZZO, 2000; ANDRADE; DINIZ, 2007; SEVERIANO *et al.*, 2009). Acrescente-se que a MO resultante da degradação da biomassa morta é cimentante e promove a formação de agregados arredondados, considerados ideais para a maioria das plantas cultivadas (RUELLAN; DOSSO, 2003). O mesmo ocorre com o manejo fertirrigado uma vez que a vinhaça tende a elevar o teor MO nos solos (SILVA *et al.*, 2007), promovendo ainda elevação do potencial de agregação da estrutura do solo com aumento na dimensões e maior estabilidade estrutural, conforme observado por Carvalho *et al.* (2010).

Na avaliação da estrutura e porosidade dos solos deve-se considerar os níveis hierárquicos, desde os observáveis em campo até os observáveis em laboratório com o auxílio de microscopia óptica. Em campo, a avaliação da macroestrutura leva em conta a caracterização da geometria, dimensão e desenvolvimento dos agregados visíveis. Já em laboratório, as avaliações da microestrutura e da morfo porosidade (forma dos poros) abrangem todos estes aspectos, no entanto, devem ser considerados sob uma perspectiva de aumento ótico $> 5 \times$ (CASTRO *et al.*, 2003). O entendimento da dinâmica da microestrutura e morfo porosidade do solo quando associada a uma área de referência e outras manejadas é fundamental para o entendimento das mudanças impostas ao mesmo pelo uso, principalmente para compreender os processos acelerados como é o caso das práticas de manejo agrícola.

Nesse sentido, Souza *et al.* (2006) avaliando o uso intensivo do um Latossolo Vermelho eutrófico, situado no nordeste do estado de São Paulo, cultivado com cana-de-açúcar sob preparo superficial do solo e exposto a queima dos resíduos, apoiado na análise digital de imagens obtidas sobre lâminas delgadas e técnicas de micromorfologia, puderam observar uma redução no volume dos macroporos, no tamanho dos agregados e na taxa de

infiltração, em contraposição ao aumento da RP (valor médio 5,11 MPa) e da DS (valor médio 1,41 kg dm⁻³).

Já Soares *et al.* (2005a) estudaram a resposta de um LV em Bariri (SP) sob cultivo de citrus e de cana-de-açúcar, ambos sob sistema tradicional de manejo, e observaram processos de degradação da estrutura do solo por modificações na geometria dos macroporos e surgimento de poros planares e fissurados, os quais trouxeram reflexos negativos para o desenvolvimento radicular. Nas lâminas delgadas de solo observaram “películas de argila envolvendo grãos de quartzo e preenchendo espaços vazios, apresentando-se como pontes de argila iluvial ligando grãos de quartzo e microagregados” (SOARES *et al.*, 2005a p. 357). Já SOARES *et al.* (2005b), nesta mesma área de estudo, observaram alteração nos solos cultivados com cana-de-açúcar, os quais apresentaram aumento na DS (1,45 kg dm⁻³) e mudança na geometria dos macroporos, com preenchimento de espaços vazios por argila dispersa, alterando a estrutura do solo, passando de estrutura microagregada, com microestrutura caracterizada por distribuição relativa enáulica, para estrutura em blocos, com presença de distribuição relativa do tipo porfírica.

Silva *et al.* (1998), estudando a influência do cultivo da cana-de-açúcar em LA - Latossolos Amarelos no estado de Alagoas, observaram que o uso agrícola inicialmente causa mudanças na morfologia dos solos, com redução da macroporosidade dos solos e o desenvolvimento de um horizonte Ap, com sensível alteração na estrutura observada na escala microscópica, referente a uma distribuição relativa que passa do tipo enáulica a porfírica no horizonte AB (compactado). Esses autores puderam observar, em estudo micromorfológico, feições pedológicas constituídas por argilãs de iluviação e poros com preenchimento com argila, denunciando dispersão e mobilidade de argila, e evidenciando tendência de formação de um horizonte B textural em um solo com horizonte Bw.

2.4 Roteiro metodológico geral da pesquisa

O roteiro geral da pesquisa passou por três grandes etapas: a revisão da literatura para a aquisição das bases conceituais e metodológicas; a análise espacial do processo de expansão da cana-de-açúcar numa escala regional, ou seja, da MRQ que permitiu o delineamento amostral dos solos para os trabalhos de campo e laboratório; e o estudo

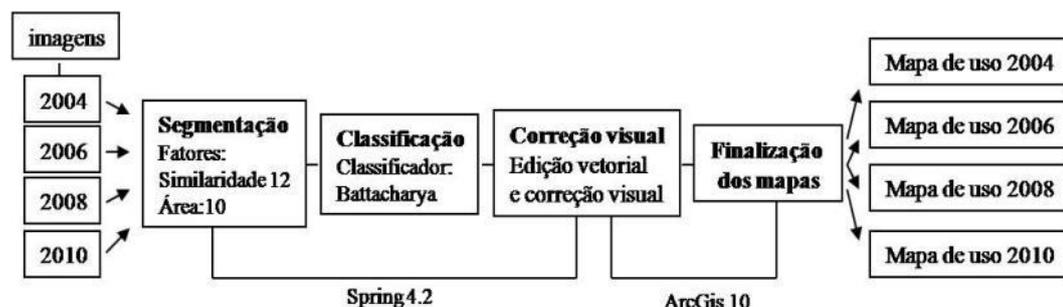
específico dos solos em campo e laboratório. O resultado da primeira etapa está distribuído praticamente em todos os capítulos desta tese. As demais etapas são descritas a seguir.

A análise espacial da expansão da cana-de-açúcar na MRQ foi feita de modo multitemporal do uso do solo com base em imagens de satélites das datas: 25/06/2004, 15/06/2006, 22/07/2008 e 26/06/2010, do satélite Landsat TM5, nas bandas 345/RGB, com resolução espacial de 30 metros, trabalhando-se na escala 1:50.000, considerada sua acurácia satisfatória para a dimensão da MRQ e os dados secundários disponíveis.

O período das imagens foi escolhido em função da sazonalidade climática e se refere a junho/julho, data que apresenta uma distância segura em relação ao período de colheita da cultura da soja na região Centro-Oeste (que se estende até abril), por outro lado, referente à época de colheita da cana-de-ano (SEAGRO, 2010). Desde modo, obteve-se uma maior visibilidade do alvo, uma vez que a cana colhida se destaca com contraste referente a solo exposto, a cana queimada apresentam resposta em cinza e a cana a ser colhida em verde intenso, relativo ao período mais fotossinteticamente ativo da planta. Foram realizados trabalhos de campo para validação do mapa de uso do ano de 2010/11. Tais imagens foram adquiridas gratuitamente através do site INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, cujas referências de localização são: órbitas 222 e 223, ponto 73.

Ao todo foram trabalhadas oito cenas, as quais foram manipuladas inicialmente no programa Spring 4.2 para a segmentação e classificação, posteriormente foram manipuladas para cruzamento de dados e finalizadas na forma de produto cartográfico no programa ArcGis 10. No processo de produção da série histórica dos mapas de uso foram seguidas as etapas descritas na figura 23.

Figura 23: Sequência de etapas e procedimentos utilizados para a elaboração dos mapas de uso da terra (solo) indicando os métodos e ferramentas utilizadas.



Para suprir o classificador Battacharya com informações que viabilizassem a identificação automática das regiões segmentadas da imagem, assim como para a correção visual da imagem classificada (produto cartográfico final), confrontada com a imagem original (Landsat TM5 345/RGB), foi criada uma chave de interpretação das imagens. Esta chave, segundo Santos *et al.* (1981), consiste nos critérios utilizados para identificar as categorias, destacadas na imagem com base na resposta espectral de cada uma e nos elementos identificáveis, tais como cor ou tonalidade, textura, limite e forma. Neste sentido, para a interpretação das imagens Landsat TM5 e mapeamento do uso da terra em diferentes datas foi criada a chave de interpretação exposta no quadro 02.

Quadro 02: Chave de interpretação das imagens de satélite Landsat TM5, 2004 a 2010.

Tipo de uso	Cor ou tonalidade	Textura	Limite	Forma
Cana-de-açúcar	verde claro (fotossinteticamente ativa) tom claro (solo exposto/cana colhida) tom escuro (cana queimada)	média/fina	definido	regular
Cultura anual	verde /vermelho	média	definida	regular
Pivô	verde claro	fina	definido	regular/esférico
Pastagem	rosado/marrom/esverdeado	média	definido	irregular
Vegetação	verde escuro	média/grosseira	definido	irregular/regular
Área urbana	tons claros	grosseira	definido	irregular
Drenagem	preto	fina	definido	irregular

Com vistas a compreender a expansão da cana-de-açúcar, procedeu-se ao cruzamento dos mapas de expansão com base no mapa de uso de 2010, confrontado com o mapa de solos realizado no ambiente do SIG ArcGis 10, através da ferramenta *Intersect*, que possibilita extrair do produto 1 (solos) apenas as áreas de intersecção com o produto 2 (polígonos de cana). O mesmo foi feito entre o mapa de uso de 2004 e os polígonos de cana-de-açúcar do mapa de 2010, a partir dos quais, ainda em ambiente de SIG, foi possível gerar tabelas com dados referentes às classes dos polígonos e áreas em ha e km². Através do cruzamento dos mapas (2004/2006, 2006/2008 e 2008/2010) com os polígonos de cana-de-açúcar (2010) foram elaborados produtos da síntese da dinâmica de expansão da cana-de-açúcar na MRQ.

Para detectar se havia conflitos de uso em relação ao uso do solo, procedeu-se à elaboração de produtos cartográficos analíticos através de cruzamentos do mapa de solos (foram considerados os atributos classe, textura, estrutura e homogeneidade) com o de declividade e de uso do solo, elaborados na etapa anterior. Os produtos gerados foram: mapa de capacidade de uso das terras, elaborado de acordo com o proposto por Lepsch *et al.* (1991),

que considera o uso do solo sob uma perspectiva conservacionista. Para este mapa foram estabelecidas quatro classes de capacidade, sendo:

- A II - terras cultiváveis com problemas simples de conservação. Áreas onde se encontram os LVdf associados às declividades baixas < 3%;
- B VI – terras cultiváveis em casos especiais por cultura permanente, adaptada para pastagem ou reflorestamento, com problemas especiais de conservação. Áreas dos LVd, LVAd e PVAd com declividades que variam entre 3 a 6%;
- B VII - terras cultiváveis em casos especiais de cultura permanente, adaptada para pastagem ou reflorestamento, com problemas complexos de conservação. Nesta classe foram considerados os RQ, com declividades que variam entre 9 a > 12%;
- C VIII – terras impróprias para uso agrícola, sendo destinadas para a preservação da fauna e flora. Referente às áreas de RL e GX, associados a uma declividade > 12%, sendo que os GX se localizam preferencialmente em áreas de preservação permanente;

Foram elaborados ainda mapas de discrepância entre uso e capacidade de uso, mapas de potencial e de risco à compactação. Os mapas de discrepância (ou conflito de uso) entre uso e capacidade de uso das terras foram elaborados considerando o uso dos anos de 2004 e de 2010, sendo o primeiro anterior à inserção da cana e o segundo quando da efetiva ocupação por esta cultura. Para estes foi estabelecido o critério de peso e influência, sendo:

- discrepância muito alta → uso 2 x > capacidade
- discrepância alta → uso 1 x > capacidade
- discrepância baixa → uso = capacidade
- discrepância nula → uso < capacidade.

A partir destes produtos foram elaborados os mapas analíticos do potencial e de risco à compactação dos solos para os anos de 2004 e 2010. Os cruzamentos foram realizados em ambiente do SIG ArcGis 10, considerando a sequência apresentada na figura 24.

Figura 24: Sequência dos cruzamentos e produtos gerados.



A metodologia para estabelecer classes de potencial e risco à compactação foi assim implementada: I- Determinação de pesos para cada uma das classes dos mapas de acordo com o grau de influência que possam apresentar, considerando solos de textura muito argilosa com maior peso; II- Correlação entre as classes dos diferentes mapas e os pesos (tabela 10 e 11); III- Definição de limiares (soma dos pesos) em associação às classes da legenda do produto final.

Tabela 10: Classes e pesos considerados no mapa de potencial de compactação dos solos.

Capacidade de uso	peso	Solos	peso
A II	4	LVdf	4
B VI	2	LVd	3
B VII	3	LVAd	3
C VIII	1	PVd	2
		RL – RQ	1
		GX	4

Tabela 11: Classes e pesos considerados no mapa de risco à compactação dos solos.

Potencial	peso	Uso	peso	Discrepância	peso
M. Alto	4	Cana-de-açúcar	4	M. alta	4
Alto	3	Pivô	4	Alta	3
Moderado	2	Área urbana	4	Baixa	2
Baixo	1	Cultura anual	3	Nula	1
		Pastagem	2		
		Vegetação	1		

As legendas foram assim definidas:

- Mapa de Potencial a compactação: Muito Alto peso variando de 6 a 7; Alto peso entre 4 a 5; Moderado peso 3; Baixo peso 2.
- Mapa de Risco a compactação: Muito Alto peso entre 7 e 8; Alto peso variando entre 5 e 6; Moderado peso entre 3 e 4; Baixo peso 1 e 2.

De posse desses mapas pode-se passar ao delineamento amostral dos solos e em seguida à abertura das trincheiras em campo, às descrições dos perfis de solo, realização de ensaios em campo e coleta de amostras para estudos em laboratório.

2.5 Delineamento e localização dos perfis amostrais

Neste estudo foram selecionadas áreas homogêneas representativas do histórico de expansão da cana-de-açúcar na MRQ relatado e considerando as características do meio

físico, a saber, geologia, geomorfologia, declividade e pedologia. Assim, selecionaram-se áreas ocupadas pelos LVdf argilosos, antes sob cultivo de grãos, sobretudo soja onde a expansão se deu inicialmente; além de áreas com LVd textura média, antes com pastagem, convertidos em cana-de-açúcar em um segundo momento (SILVA; CASTRO, 2011).

Foram selecionados oito sítios amostrais para a abertura de trincheiras e descrição de perfis de solo com cana-de-açúcar, observando características semelhantes em relação ao manejo: todos relativos ao 4º corte do 1º ciclo, plantados com a mesma variedade de cana (SP 813250), com cultivo e colheita fortemente mecanizada e sem queima (junho 2008, maio 2009, maio 2010) e mesmo preparo do solo, variando apenas em relação à fertirrigação com vinhaça (quadro 03). Apoiados nas práticas de preparo e de conservação promovidas nestes solos, entendemos que os vestígios dos cultivos anteriores foram eliminados. A opção de selecionar manejos com e sem fertirrigação com vinhaça advém do fato da vinhaça aportar matéria orgânica, o que contribuiria para a recuperação da estrutura dos solos.

Quadro 03: Preparo do solo utilizado nos oito pontos amostrais com cultura de cana-de-açúcar na região de Quirinópolis, Goiás.

USO ANTERIOR/CANA Perfil /Manejo*	PREPARO E CONSERVAÇÃO DO SOLO		
	Atividade	Quantidade	Período/ano
soja/cana 1A - LVdf 1B - LVdf 3B - LVd	Construção de terraços	-	Ago/2006
	Subsolagem	-	Ago/2006
	Grade pesada	-	Ago/2006
	Calagem	3 t/ha	Set/2006 - Jun/2009
	Gessagem	1,5 t/ha	Set/2006 - Jun/2009
	Fosfatagem	0,23 t/ha	Set/2006
pasto/cana 2A - LVdf 2B - LVdf 4B - LVd	Grade leve	-	Set/2006
	Dessecação (glifosato)	5 l/ha	Out/2006
	Sulcação e adubação (05-25-25)	0,6 t/ha	Nov/2006
	Cobrição (regent 800 WG)	0,25 kg/ha	Nov/2006
	Quebra lombo	-	Fev/2007
pasto/soja/cana 5B - LVd 6B - LVdf	Adubação de cobertura (31-00-00)	0,20 t/ha	Jun/2008- Jun/2009
	Herbicida pré-emergente	0,14 kg/ha	Jun/2008 - Jun/2009
	Controle de broca (vespa)	4 copos/ha	Dez/2008 – Dez/2009
	Controle de cigarrinha	0,8 kg/ha	Jan/2009 – Jan/2009
soja/cana 1A - LVdf pasto/cana 2A- LVdf	Fertirrigação (vinhaça)	150 m ³ /ha	Jun/2008

* fertirrigado (A), não fertirrigado (B)

Fonte: Adaptado de Borges (2011).

Convém ressaltar que a escolha dos sítios amostrais considerou observações preliminares, em que se constataram processos de compactação em diversos graus e tipos de

solos, bem como nas informações contidas no Plano de Manejo da Usina São Francisco⁷. Para viabilizar a análise comparada da qualidade física dos solos com e sem uso antrópico foram selecionadas duas áreas amostrais, relativas a vegetação natural para cada um dos referidos solos. Ao todo foram estudados dez perfis de solo com características físicas homogêneas (quadro 04), sendo oito referentes às substituições soja/cana, pasto/cana e sucessão de culturas (pasto/soja/cana), além de duas áreas de controle com vegetação (figura 25).

Quadro 04: Caracterização dos perfis de solo estudados.

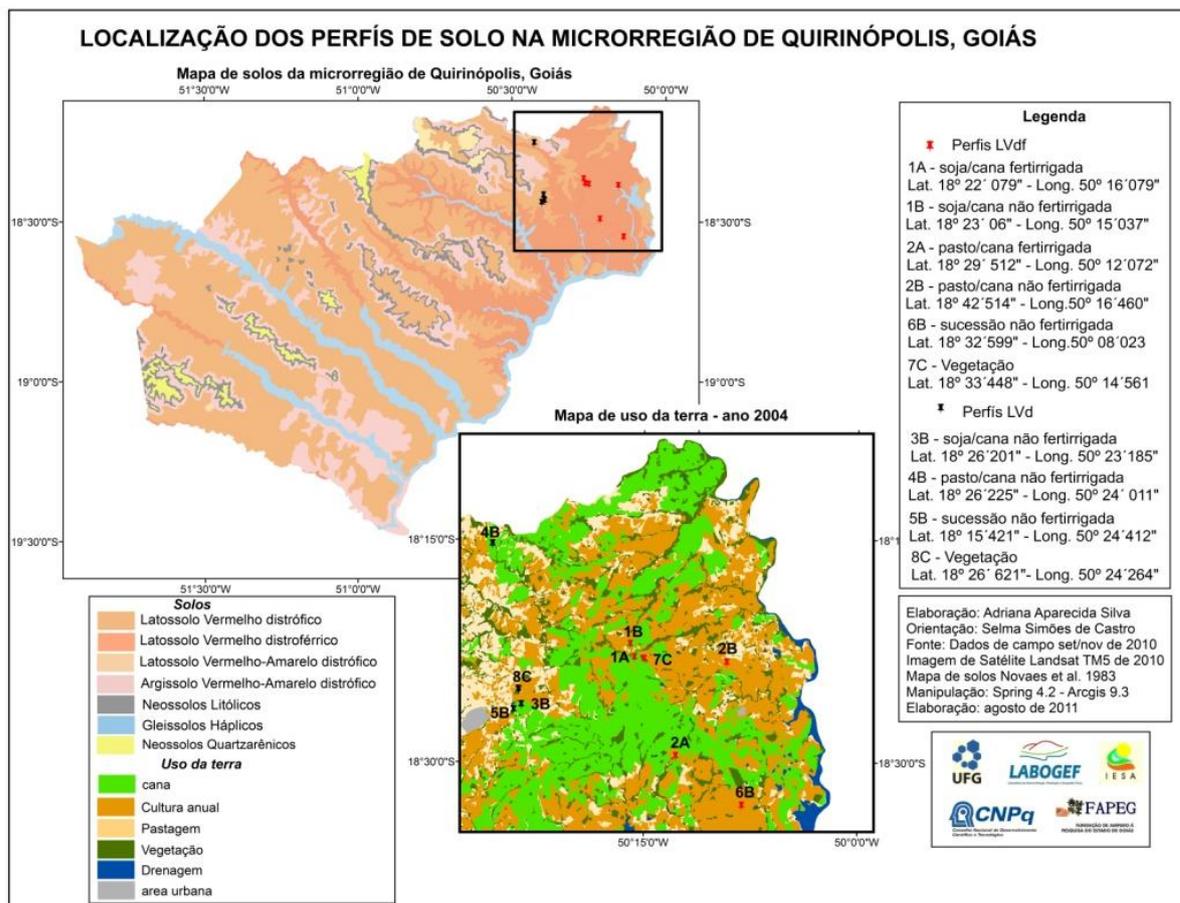
Perfil	Elementos do meio físico				Uso da terra anterior a cana/vegetação	Fertirrigação
	Solo	Geologia	Declividade	Altitude		
1 A	LVdf	Basalto	0 a 3%	576	Soja	Fertirrigada
1 B				540		Não fertirrigada
2 A				503	Pastagem	Fertirrigada
2 B				460		Não fertirrigada
6 B				458	Sucessão: pasto/soja/cana	
7 C				545	Vegetação natural	-
3 B				LVd	Arenito	0 a 3%
4 B	3 a 6%	595	Pastagem			
5 B	0 a 3%	633	Sucessão: pasto/soja/cana			
8 C	3 a 6%	589	Vegetação natural			-

Número seguido de a letra A refere-se a perfil com manejo fertirrigado. Número seguido de letra B refere-se a perfil sem fertirrigação. Número seguido de a letra C refere-se a perfil com vegetação.

Os perfis foram analisados em faces de trincheiras abertas (cerca de 2 x 1,5 x 2,5 m) com realização das descrições morfológicas relativas a espessura do horizonte, cor, textura, estrutura, consistência, porosidade, presença de nódulos ou concreções e transição entre horizontes, além de coleta de amostras deformadas (compostas) e indeformadas de cada um dos seus horizontes (anéis volumétricos com três repetições por horizonte e caixas para confecção de lâminas delgadas para descrição micromorfológica com uma repetição por horizonte) (quadro 05), seguindo-se as recomendações de Santos *et al.* (2005) quanto à coleta de amostras para análises físicas e de amostras indeformadas em anéis volumétricos; e de Castro *et al.* (2003) para a coleta de amostras indeformadas para confecção de lâminas delgadas para estudos micromorfológicos.

⁷ O manejo foi repassado pela Usina São Francisco S/A, que permitiu a abertura dos perfis de solos em suas propriedades.

Figura 25: Mapa de localização dos perfis de solos na microrregião de Quirinópolis, Goiás.



Quadro 05: Profundidade e manejo dos horizontes e perfis descritos em campo.

Nº	Solo	Perfil	Horizonte	Profundidade	Detalhamento do uso / manejo
1	LVdf	1A	A	0 – 13	soja/cana fertilrigado
2			AB	13 – 50	
3			BA	50 – 90	
4			Bw1	90 – 110	
5			Bw2	110 – 150+	
6		1B	A	0 – 23	soja/cana não fertilrigado
7			AB	23 – 65	
8			BA	65 – 88	
9			Bw1	88 – 116	
10			Bw2	116 – 150+	
11		2A	A	0 – 33	pasto/cana fertilrigado
12			AB	33 – 47	
13			BA	47 – 77	
14			Bw1	77 – 115	
15			Bw2	115 – 150+	
16		2B	A	0 – 15	pasto/cana não fertilrigado
17			AB	15 – 53 (65)	
18			Bw1	53 – 102	
19			Bw2	102 – 150+	
20		6B	A	0 - 28	sucessão pasto/soja/ cana não fertilrigado
21			AB	28 – 56	
22			Bw1	56 – 90	
23			Bw2	90 – 150+	
24		7C	A	0 – 20	

continua..

25			AB	20 – 53	vegetação natural
26			BA	53 – 90	
27			Bw1	90 – 130	
28			Bw2	130 – 150+	
29	LVd	3B	A	0 – 30	
30			AB	30 – 70	
31			BA	70 – 97	
32			Bw1	97 – 118	
33			Bw2	118 – 150+	
34		4B	A	0 – 20	pasto/cana não fertirrigado
35			AB	20 – 44	
36			BA	44 – 72	
37			Bw1	72 – 119	
38			Bw2	119 – 150+	
39		5B	A	0 – 29	sucessão pasto/soja/ cana não fertirrigado
40			AB	29 – 56	
41			BA	56 – 73	
42			Bw1	73 – 97	
43			Bw2	97 – 150+	
44		8C	A	0 - 13	vegetação natural
45	AB		13 – 41		
46	BA		41 – 60		
47	Bw1		60 – 88		
48	Bw2		88 – 150+		

A - perfil fertirrigado; B - não fertirrigado; C - vegetação natural.

Foram realizados dois trabalhos de campo para descrição morfológica, coletas de amostras e realização de ensaios de resistência mecânica à penetração. O primeiro trabalho de campo foi realizado do dia 01 a 03 de maio de 2010, período seco, quando foram descritos os perfis 1A, 1B, 2A, 2B e 7C e coletadas as amostras. Já o segundo trabalho de campo foi realizado do dia 03 a 07 de setembro de 2010, início do período úmido, quando foram descritos os perfis 3B, 4B, 5B, 6B e 8C e coletadas as amostras.

A verificação da resistência mecânica à penetração do solo (RP) foi feita ao lado das trincheiras por meio do penetrômetro vertical de impacto, modelo IAA/Planalçucar que possui na parte superior um êmbolo de 4 kg e uma haste graduada em cm. Com ele são promovidos impactos ao cair o êmbolo e avaliada a profundidade de penetração, considerando uma profundidade máxima de 60 cm (STOLF, 1983). A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em valores de RP foi obtida pela equação 1 (STOLF, 1991).

Equação 1

$$RP \text{ (kgf cm}^{-2}\text{)} = 5,6 + 6,89N$$

Onde RP = resistência do solo ou índice do cone e N = penetração unitária por um impacto.

Para a conversão de kgf cm⁻² para MPa, multiplicou-se o resultado obtido na equação pela constante 0,0981.

As figuras 26 a 36 ilustram aspectos relevantes das áreas e dos perfis de solos selecionados, além das coletas de amostras de solos e dos ensaios de campo e laboratório.



Figura 26: Foto - Área cultivada sobre a palhada da cana-de-açúcar.



Figura 28: Foto - Cabeleira da cana (SP 813250) cultivada em solo LVdf compactado, perfil 1B.



Figura 30: Foto - Perfil de solo LVdf, compactado, perfil 2B.



Figura 27: Foto - Paisagem da área do perfil 6B com LVdf relativo à sucessão pastagem/soja/cana.



Figura 29: Foto - Exemplo de perfil de solos LVd, não fertirrigado. Perfil 4B.



Figura 31: Foto - Detalhe da compactação do perfil 2B de solo LVdf.



Figura 32: Foto – Exemplo de procedimentos para descrição morfológica do perfil.



Figura 34: Foto – Realização de ensaio de resistência mecânica à penetração no solo.



Figura 33: Foto – Coleta de amostra indeformada em caixa retangular de papel cartão branco nas dimensões 12x7x6.



Figura 35: Foto – Coleta de amostras deformadas de solo.



Figura 36: Foto – Laboratório de micromorfologia de solos. Observação de lâmina delgada de solos em microscópio petrográfico óptico binocular.

Em laboratório as amostras foram preparadas para análises, sendo que as amostras deformadas destinaram-se às seguintes determinações: umidade gravimétrica, textura (em água e NaOH + Hexametáfosfato de Na pelo método do densímetro), argila dispersa em água, grau de floculação e teor de matéria orgânica (Dicromato de Na). As amostras indeformadas, coletadas em anéis volumétricos, serviram à determinação da densidade do solo (DS) (método do anel volumétrico), densidade de partículas (DP) (método do balão volumétrico) e cálculo da porosidade total (PT) (EMBRAPA, 1997).

As amostras indeformadas para o estudo micromorfológico foram coletadas em caixas retangulares de papel-cartão branco (12x7x6 cm) na forma de monolitos esculpido em cada um dos horizontes dos dez perfis de solo (CASTRO *et al.*, 2003). Em laboratório as amostras foram secas em estufa a 40° C e impregnadas sob vácuo com resina de poliéster (Crystal) para posteriormente serem cortadas, coladas em lâminas de vidro de 3 x 4 cm e polidas até alcançarem a espessura de 25 µm (BREWER, 1976 adaptado por CASTRO, 1985). Estas amostras foram analisadas em microscópio petrográfico óptico binocular (Olympus, modelo BX – 40), com aumentos progressivos de 2X a 10X. Os principais parâmetros micromorfológicos observados foram: distribuição relativa (trama), fundo matricial (matriz), microestrutura, (macro) porosidade dominante e feições pedológicas dominantes. As descrições das lâminas delgadas foram feitas conforme instruções de BULLOCK *et al.* (1985) e STOOPS (2003), tendo sido tomadas de fotomicrografias das características específicas de cada lâmina através de máquina fotográfica digital (Olympus, modelo Altra 20) acoplada ao microscópio.

2.6 Seleção de indicadores de avaliação da qualidade física do solo

A qualidade física dos solos foi avaliada através de indicadores macromorfológicos obtidos em campo e indicadores micromorfológicos e parâmetros analíticos físico/hídricos mensurados/avaliados em laboratório. As metodologias foram selecionadas tendo como base referencial bibliográfico relativo a estudos de avaliação da estrutura dos solos sob cultivo com cana-de-açúcar (SILVA, *et al.*, 1998; PRADO; CENTURION, 2001; CASAGRANDE, 2002; SOARES *et al.*, 2005(a); SOARES *et al.*, 2005(b); SILVA, *et al.*, 2007; SEVERIANO *et al.*, 2009; SILVA, *et al.*, 2009; ROQUE *et al.*, 2010; SEVERIANO *et al.*, 2010; OTTO *et al.*, 2011; PACHECO; CANTALICE, 2011).

Em campo os indicadores avaliados se referiram à morfologia dos solos, com ênfase na estrutura, consistência e resistência mecânica à penetração (RP). A estrutura, que define o padrão de arranjo dos agregados do solo, e a consistência, que se refere às manifestações das forças físicas de coesão e adesão entre as partículas e outros materiais dos solos, foram avaliadas com base em Santos *et al.* (2005). Já a RP que estima a resistência oferecida pelo solo à penetração mecânica, sendo avaliada através de penetrômetro vertical de impacto, modelo IAA/Planalçucar, de acordo com o estabelecido por Stolf (1983).

Em laboratório⁸ as avaliações da qualidade do solo foram realizadas através da mensuração dos valores de densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP), porosidade total (PT), textura, dispersão de argila (ADA), grau de flocculação (GF), teor de matéria orgânica (MO) e umidade gravimétrica, tendo como base o manual da EMBRAPA (1997). Posteriormente com o estudo da porosidade sobre lâminas delgadas com auxílio de técnicas micromorfológicas.

A DS varia em função da textura, profundidade e do grau de compactação do solo (KIEHL, 1979), e permite avaliar o sistema de drenagem, porosidade, condutividade hidráulica e permeabilidade do solo. A avaliação da densidade de partículas, que se refere ao volume de solo sem considerar a porosidade, foi utilizada para o cálculo da PT, a qual varia em função da textura, sendo expressa em porcentagem.

A análise da textura dos solos foi utilizada para classificação dos componentes sólidos, assim como para definição dos valores de ADA e GF. A ADA expressa alterações no teor de argila, que pela desagregação da estrutura leva à sua eluviação e formação de camadas adensadas ou compactadas. O GF, ao contrário, expressa a formação de agregados estáveis, onde ocorre maior aeração do solo, propiciando maior desenvolvimento radicular, suprimento de nutriente e armazenamento de água. Ambos recebem influência do teor de MO e são alterados quando do manejo no solo. A MO do solo define seu conteúdo de resíduos animais e vegetais parcialmente decompostos ou ressintetizados, sendo expressa em g dm^{-3} (FREIRE, 2006). A vinhaça, subproduto da cana-de-açúcar, é rica em nutrientes, sendo constituída por 2 a 6% de sólidos, onde se destaca a MO (constituída de ácidos orgânicos), além de minerais como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , cujas quantidades variam com o tipo de mosto utilizado na destilaria (MIRANDA, 2009; SILVA, 2007).

Os indicadores micromorfológicos foram obtidos no laboratório de microscopia junto ao LABOGEF/IESA e *Laboratory of Pedology* da *University of Guelph*, Ontário, Canadá, as

⁸ As análises foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física (LABOGEF/IESA/UFG), no Laboratório de Física de Solos (LFS/EA/UFG) e na Solocria Ltda.

mesmas foram descritas quanto às suas características micromorfológicas, com ênfase na microestrutura e porosidade dos solos. As microestruturas do solo foram descritas de acordo com o arranjo dos elementos presentes, sendo sua descrição feita de acordo com o STOOPS e JONGERIUS (1975), BREWER (1976), BULLOCK *et al.* (1985) e STOOPS (2003), com auxílio de microscópio petrográfico binocular da Olympus BX40, no qual foi acoplada a máquina digital para tomada de fotomicrografias (CASTRO *et al.*, 2003; CASTRO, 2008). As características observadas foram:

- a) Forma dos agregados - de acordo com o arranjo entre as partículas, as quais podem variar entre: esferoidais, em blocos, laminares ou em prismas;
- b) Pedalidade – relacionado ao grau e desenvolvimento da microestrutura, variando entre: bem desenvolvida, moderadamente desenvolvida e fracamente desenvolvida;
- c) Tamanho e abundância – relativo à dimensão dos agregados, com base na escala micrométrica e proporção total e relativa ocupada na lâmina delgada;
- d) Acomodação entre os agregados – relativo ao grau de encaixe entre as paredes dos agregados, que variam entre: acomodados, parcialmente acomodados e não acomodados;
- e) Padrões de distribuição dos agregados – podendo se referir a uma distribuição básica ou por referência.
- f) Padrões de forma, dimensão e distribuição dos agregados e dos poros visíveis visualmente e com análise de imagens.

CAPITULO 3

POTENCIAL E RISCO DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS DA MICRORREGIÃO DE QUIRINÓPOLIS, SUDOESTE DO ESTADO DE GOIÁS

Introdução

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são utilizados para a aquisição, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados espaciais, tendo sido amplamente utilizados desde meados dos anos de 1960 na elaboração de produtos cartográficos analíticos que requeriam espacialização. Exemplos de sua utilização demonstram sua viabilidade no estudo das questões ambientais, como, por exemplo, relacionados à agricultura (FORTES, *et al.*, 2003; MACHADO *et al.*, 2003; FARACO *et al.*, 2008). Esses sistemas permitem ainda a elaboração de produtos cartográficos de previsão de impactos, os quais, por meio de análise integrada dos fatores ambientais, permitem a identificação e localização de informações geográficas, além da obtenção dos respectivos indicadores, como, por exemplo, focando as potencialidades, vocação e fragilidades do meio natural (ZACHARIAS, 2010). A partir de análise diagnóstica e prognóstica pode-se obter indicadores para implementar medidas corretivas ou mitigadoras visando a recuperação e preservação dos solos, principal suporte da produção agrícola.

A agricultura, quando mal praticada, pode levar à perda da capacidade produtiva do solo em médio e longo prazo, possibilitando a instalação de processos de degradação. Vários estudos destacam os impactos promovidos pela cultura da cana-de-açúcar ao solo e ao meio ambiente, os quais se associam às diversas etapas do processo produtivo (PASQUALETTO; ZITO, 2000; MACEDO, 2005; UNICAMP/UNICA, 2005; FONSECA; KRUGLIANSKAS, 2008; EMBRAPA, 2011). Dentre os impactos do cultivo da cana-de-açúcar relacionados diretamente aos solos esta a compactação, causada pelo uso de maquinário pesado no cultivo e na colheita mecanizada. A compactação dos solos, um dos principais impactos quando a cultura é fortemente mecanizada em todas as fases do processo, desde o preparo do solo até a colheita, provoca alterações nas suas características naturais, como redução de seu volume e de sua macroporosidade, aumento da densidade e da resistência à penetração radicular, além de alteração do fluxo de água, de ar, de calor e de disponibilidade de água e nutrientes para as

plantas (CAMARGO; ALEONI, 1997; RIZZO, 2000; TRINDADE *et al.*, 2008; REICHERT *et al.*, 2010).

Estudos específicos sobre a compactação em área de cana-de-açúcar demonstram que o sistema radicular da planta tem seu desenvolvimento limitado pelo aumento na resistência à penetração, principalmente quando o solo está em umidade no ponto de murcha permanente, e pela redução no suprimento de oxigênio, fazendo com que a absorção de nutrientes seja menor e a planta se torne mais suscetível a doenças, sobretudo nos períodos de estiagem (CASAGRANDE, 2002; OTTO *et al.*, 2010). Além disso, observa-se redução da PT, com aumento relativo da microporosidade em relação à macroporosidade e aumento na DS (CENTURION *et al.*, 2001; SOUZA *et al.*, 2005; SEVERIANO *et al.*, 2010).

Culturas de ciclo curto, como a soja, costumam ser mais impactantes do que as de ciclo longo, como a cana, em virtude do preparo com revolvimento anual do solo, apesar do uso de práticas mecânicas que afetam a sua estrutura, além do manejo envolvendo práticas de irrigação (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005). No caso da cultura da cana-de-açúcar, o ciclo é prolongado, de 12 a 18 meses para o 1º corte, chamado de cana, seguido de uma sucessão de colheitas anuais que podem chegar a 5º ou mesmo 6º cortes, chamadas de soca para o 2º ciclo e de ressoca para os demais.

No entanto, como a soja, a cultura da cana também utiliza frequentemente de maquinário pesado no preparo do solo, no cultivo e principalmente na colheita, o qual vem tornando comum os problemas de compactação dos solos cultivados após um tempo, sendo variável, sobretudo em função do tempo de uso com cana, dos atributos do solo, do clima e do manejo (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Uma carregadeira de cana, por exemplo, pode causar compactação em até 10 cm de profundidade, já um sistema de transporte via “biminhão”, em que as carrocerias podem levar até 30 t cada uma quando cheia, podem chegar a até 30 cm de compactação (CASAGRANDE, 2002).

A compactação do solo afeta diversas escalas, sendo que no geral se inicia na escala microscópica e passa à macroscópica, para posteriormente generalizar para as unidades de mapeamento e os próprios ambientes de produção na paisagem. As principais consequências da compactação além das relatadas anteriormente se referem a falhas na densidade de cobertura do solo, diminuição da produção e da produtividade, apodrecimento de raízes, dissociação ferro-argila e o desmantelamento dos agregados do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997; PEDROTTI; MÉLLO JÚNIOR, 2009) sendo estes importantes fatores de redução da fertilidade (RALISCH *et al.*, 2002).

A MRQ, situada na Mesorregião Sul do estado de Goiás, região Sudoeste de Planejamento, é considerada como um cenário representativo desse processo recente de expansão da cana-de-açúcar em Goiás (CASTRO *et al.*, 2010; BORGES, 2011), a qual se destaca pela elevada concentração de usinas/destilarias de açúcar e álcool, apresentando sete unidades industriais, quatro em funcionamento e três em implantação (SILVA; CASTRO, 2011), como já exposto. Vale ressaltar que o cultivo da cana-de-açúcar se iniciou após 2004, com primeira safra colhida em 2006/2007, esta região antes, se destinava ao cultivo de grãos (milho e soja) em áreas de Latossolos Vermelho distroféricos (LVdf) e de pecuária extensiva, nos Latossolos Vermelho distróficos (LVd) (SILVA; CASTRO, 2011).

Os solos considerados como de maior potencial natural de compactação presentes na MRQ são os LVdf e LVd que apresentam horizontes homogêneos, textura argilosa a média, associados a relevo plano ou suave ondulado. Tais solos foram o alvo preferencial no processo de expansão da cana-de-açúcar no Centro-Sul do Cerrado (MANZATTO *et al.*, 2009; CASTRO *et al.*, 2010; PRADO, 2011).

Considerando o solo, o relevo e a capacidade de uso das terras é possível construir uma perspectiva de potencial de compactação, através de correlação espacial de atributos do meio físico com ênfase nos solos, expressa em produtos cartográficos, uma vez que são as características do solo e dos demais elementos da paisagem que vão constituir este potencial ou não. Associando a estes fatores o uso atual e a discrepância entre uso e capacidade de uso é possível elaborar cenários de graus de risco à compactação. Para tanto, através do uso de SIG apresentamos uma proposta metodológica para a avaliação do potencial e do risco à compactação dos solos, tendo com área os solos da MRQ.

3.1 Capacidade de uso das terras

A capacidade de uso da terra é considerada uma classificação que visa o uso racional do solo. Para a MRQ foram estabelecidas quatro classes de capacidade de uso (figura 37) sendo encontrada uma maior área relativa à capacidade BVI com 1.031.316 ha ou 64,18% da área da microrregião, em seguida a classe A II com 380.58 ha ou 23,68%, C VIII com 129.363 ha ou 8,07% e B VII referente a 65.309 ou 4,07% (tabela 12). Tais dados indicam que parte da área da MRQ (23,68%) apresenta boa capacidade para o uso agrícola, com problemas simples de conservação, relativos a níveis de fragilidade natural de alguns tipos de

solo, o que inclui problemas com manejo tecnificado, principalmente no caso dos solos de textura argilosa a muito argilosa.

Figura 37: Mapa da capacidade de uso das terras da microrregião de Quirinópolis, Goiás.

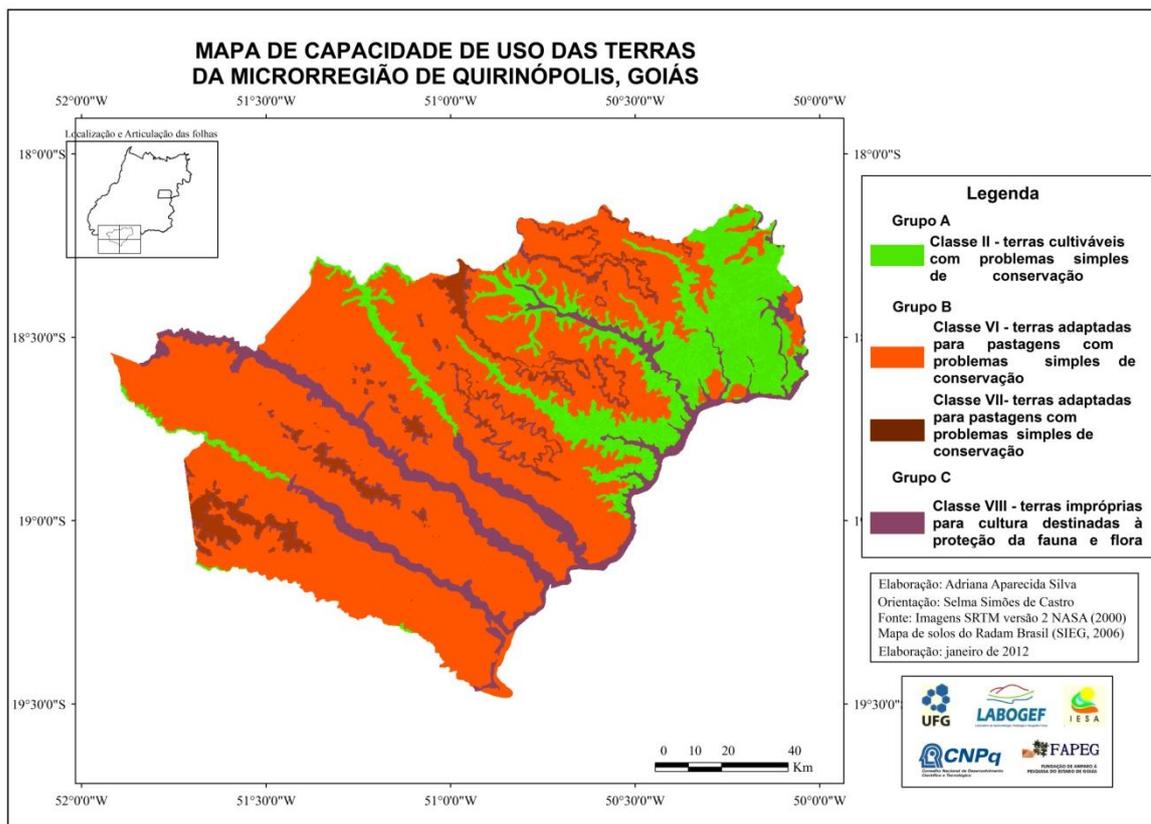


Tabela 12: Classe de capacidade de uso das terras da microrregião de Quirinópolis, Goiás.

Classes	Área em ha	%
A II	380.548,100	23,68
B VI	1.031.316,900	64,18
B VII	65.309,100	4,07
C VIII	129.636,200	8,07
Total	1.606.810,300	100

É preciso considerar, porem, que a maior parte da microrregião (68,25%) apresenta áreas com problemas de conservação, as quais só podem ser cultivadas com culturas permanentes, se observadas práticas conservacionistas da qualidade do solo, tais como, manejo com sistema de rotação de culturas, plantio direto, com reduzido número de passadas de máquinas e de revolvimento dos solos.

3.2 Discrepâncias entre uso e capacidade de uso das terras

A capacidade de uso da terra não define seu efetivo uso, uma vez que raramente é considerada pelos produtores. Neste sentido é importante saber se há compatibilidade ou não entre a capacidade natural de uso e o uso efetivo das terras. Para tanto, foram considerados os usos da terra dos anos de 2004 e 2010, visando entender se a cana-de-açúcar imprime aumento na discrepância com o uso, o que possibilitaria a instalação de impactos ambientais.

- **Discrepância entre uso e capacidade de uso das terras em 2004**

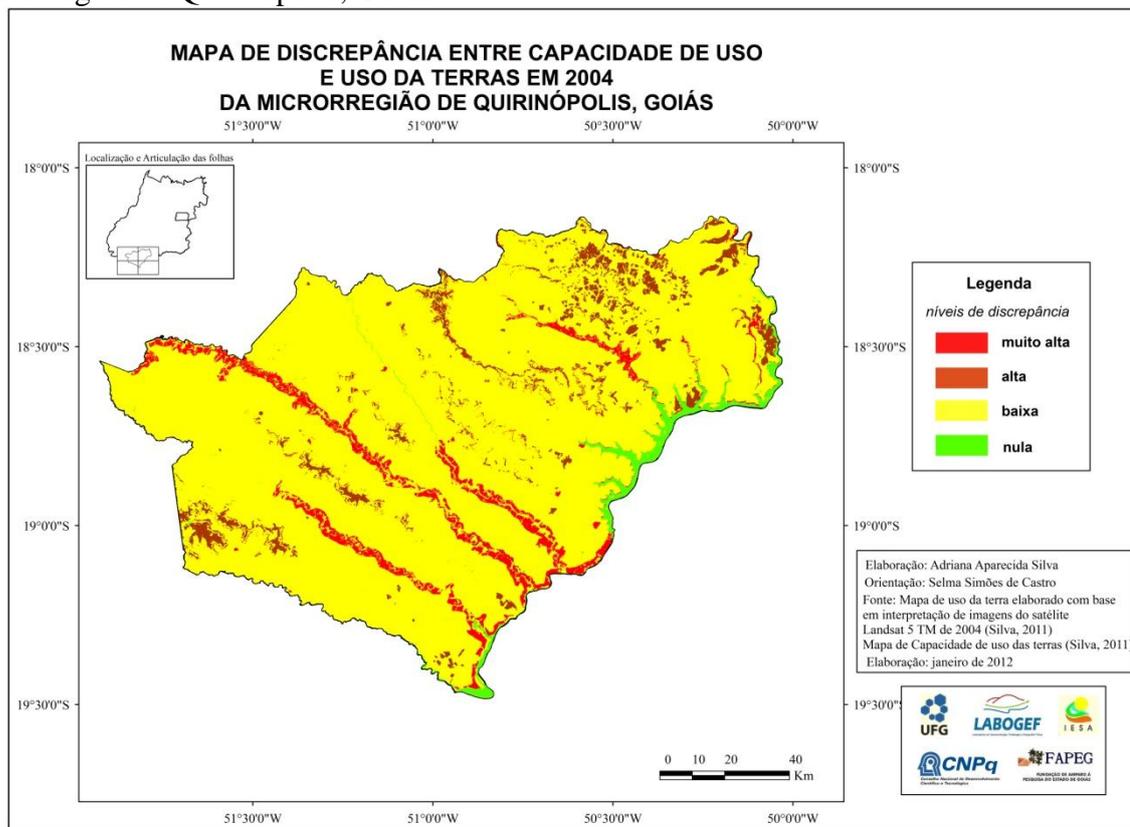
O uso da terra na MRQ no ano de 2004 apresentava uma área maior ocupada pela pastagem, referente a 72,58%, seguida de vegetação natural 15,42%, cultura anual 9,31%, pivô 0,05%, área urbana 0,12% e drenagem 2,52% (SILVA; CASTRO, 2011). Confrontando estes usos com a capacidade de uso, a MRQ apresentava uma baixa discrepância de usos, ocupando 1.403.312 ha correspondente a 87,34% da área total, relativo a áreas de pastagem, o que não significa que não sofresse compactação pelo pisoteio do gado, esta, porem, não foi avaliada neste estudo.

Em relação à discrepância muito alta a área foi de 90.909 ha ou 5,66%, relativa às áreas com capacidade de uso C VIII, que deveriam ser para preservação, mas, que apresenta uso destinado a pastagem. Já as áreas onde foi encontrada discrepância alta, com 66.286 ha ou 4,12%, apresentaram capacidade de uso B VII, ou seja, relativa a áreas aptas a culturas especiais, pastagem e reflorestamento, mas que, no entanto, estão sendo utilizadas com cultura anual, manejo considerado impróprio dentro da perspectiva de conservação das classes de capacidade de uso propostas por Lepsch (1991) (figura 38) (tabela 13).

Tabela 13: Níveis de discrepância entre capacidade de uso e uso das terras em 2004 na microrregião de Quirinópolis, Goiás.

Níveis	Área em ha	%
Muito alta	90.909,000	5,66
Alta	66.286,700	4,12
Baixa	1.403.312,300	87,34
Nula	46.302,300	2,88
Total	1.606.810,300	100

Figura 38: Mapa da discrepância entre capacidade de uso e uso das terras em 2004 na microrregião de Quirinópolis, Goiás.



Convém chamar a atenção para o fato de que quase 90% da área apresentava baixa discrepância de uso em 2004, logo se havia impactos eles devem ter sido decorrentes do manejo das terras ou restritos às poucas áreas de alta a muito alta discrepância.

- **Discrepância entre uso e capacidade de uso em 2010**

A cana-de-açúcar inserida na MRQ em 2004 chega em 2010 com uma área de produção correspondente a 7,23%. De acordo com estudos anteriores esta cultura ocupou inicialmente áreas de cultura anual e, posteriormente, de pastagem. O uso da terra em 2010 se referia a pastagem 57,63%, cultura anual 16,68%, vegetação natural 15,38%, cana-de-açúcar 7,23%, manejo intensivo com pivô central 0,03%, área urbana 0,12% e drenagem 2,93% (SILVA; CASTRO, 2011).

Contrapondo estes dados com os de capacidade de uso, as áreas de discrepância muito alta já representaram 107.205 ha ou 6,67% e alta 152.440 ha ou 9,49% sendo relativas, neste momento, não apenas às áreas com capacidade de uso C VIII, destinadas ao uso com pastagem, como também às áreas de capacidade de uso BVI, com problemas especiais de preservação e com uso atual cana-de-açúcar, cujo cultivo é reconhecidamente intensivo. As

áreas com discrepância baixa somam 1.291.700 ha correspondendo a 80,39% da área total, significando uma redução de cerca de 10% em relação a 2004 e se referem à área com capacidade de uso BVI, compatível com o uso predominante pastagem. A discrepância nula com 55.464 ha ou 3,45% e se refere a áreas dos corpos d'água (figura 39) (tabela 14).

Figura 39: Mapa da discrepância entre capacidade de uso e uso das terras em 2010 na microrregião de Quirinópolis, Goiás.

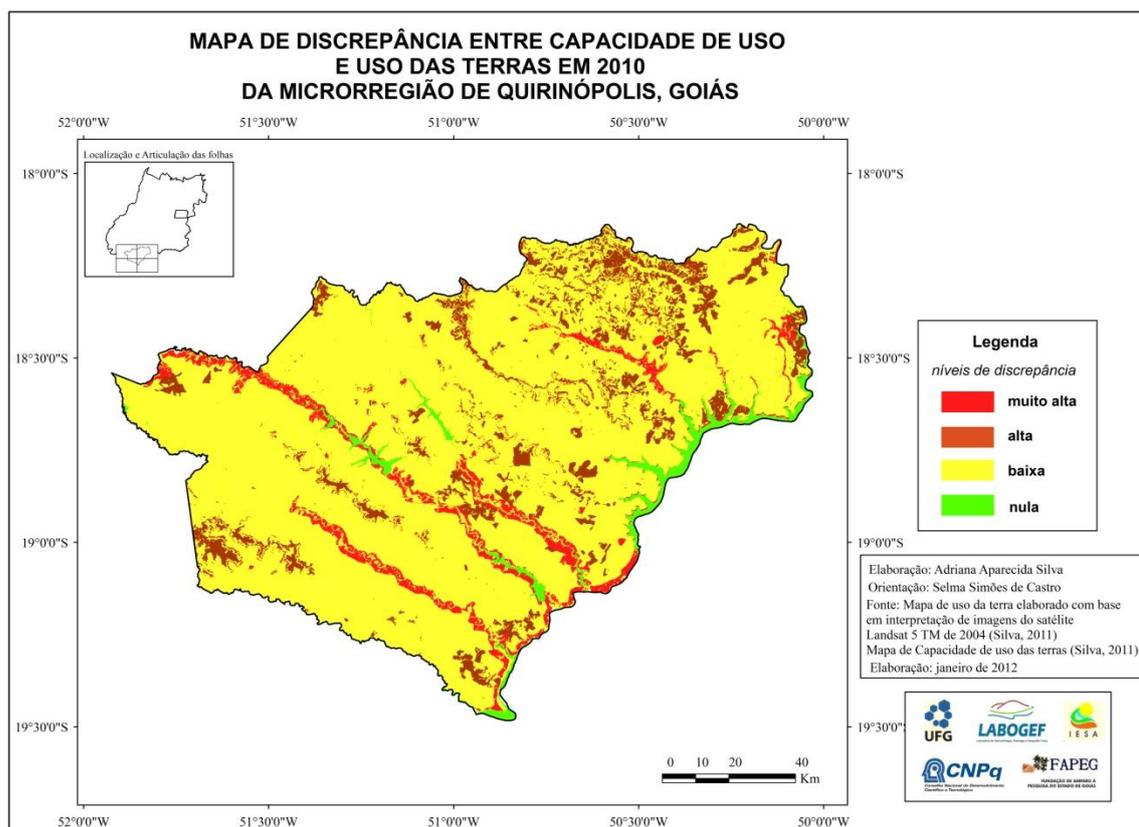


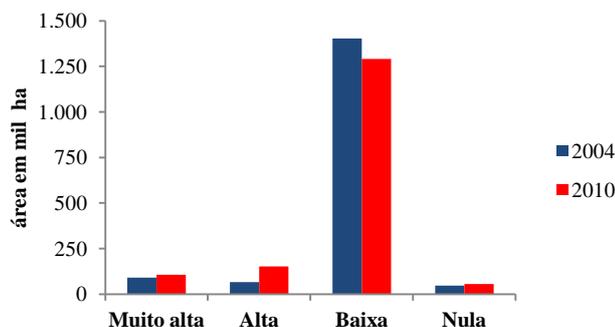
Tabela 14: Discrepância entre capacidade de uso e uso das terras em 2010 na microrregião de Quirinópolis, Goiás.

Níveis	Área em ha	%
Muito alta	107.205,200	6,67
Alta	152.440,700	9,49
Baixa	1.291.700,200	80,39
Nula	55.464,200	3,45
Total	1.606.810,300	100

Correlacionado os dois mapas de discrepância entre capacidade de uso e uso da terra (figura 40) pode-se observar um aumento em relação à discrepância muito alta e alta entre 2004 e 2010 que somadas passam de 9,78% para 16,16%. Tal fato se deve a inclusão do

cultivo de cana-de-açúcar em áreas com capacidade de uso BVI, além, não raro, do deslocamento do cultivo de grãos em substituição à pastagem nessas áreas.

Figura 40: Discrepância comparada entre os anos de 2004 e 2010 na microrregião de Quirinópolis, Goiás.



Em decorrência destes aumentos, tem-se a redução nas áreas com discrepância baixa, que passam de 87,34% para 80,39%, devido à substituição de áreas de pastagem em favor do aumento nas áreas de cultivo anual e, principalmente, da inserção da cana-de-açúcar. Já o aumento observado na discrepância nula é devido à ocorrência de três áreas de barragem, classificadas no mapa de uso da terra como drenagem.

Tais dados revelam uma mudança no uso dos solos subsequente à inserção do cultivo de cana-de-açúcar, uma vez que os níveis de discrepância alta e muito alta aumentaram. Neste caso, teme-se que esta mudança no uso possa promover a instalação de impactos nos solos, dentre eles a compactação, que se associa às áreas de agricultura com manejo altamente tecnificado, como é o caso da cultura da cana-de-açúcar.

3.3 Potencial de compactação dos solos

O potencial compactação indica a probabilidade de ocorrência em virtude de características naturais, tendo sido avaliadas as características relativa a textura, se muito argilosa, argilosa ou média, sua homogeneidade ao longo do perfil e se esta associada a um relevo plano ou suave ondulado. Em relação aos tipos de solos da MRQ estes se referem a Latossolos Vermelhos distróficos 48,76%, Latossolos Vermelho distroférico 28,39%, Latossolos Vermelho-Amarelo distróficos 1,22%, Argissolos Vermelho-Amarelo distróficos 11,68%, Neossolos Litólicos 3,40%, Gleissolos háplicos 3,24% e Neossolos Quartzarênicos órticos 1,21%, como já exposto (SILVA; CASTRO, 2011).

Foi observada para MRQ maior área relativa a um alto potencial de compactação em 1.071.772 ha correspondentes a 66,70% da área, associada aos LVd, LVAd e PVAd, áreas com capacidade de uso relativa a classe B VI, ou seja aptas para pastagem, com problemas simples de conservação. O potencial muito alto representa área de 511.831 ha ou 31,85%, relativo a solos do tipo LVdf e GX, com capacidade de uso na classe A II, passível de uso agrícola com problemas simples de conservação. As áreas com baixo potencial se referem a apenas 23.206 ha ou 1,45%, e se encontram associadas principalmente aos Neossolos Quartzarênicos (RQo) e Litólicos (RQl) e à capacidade de uso das terras C VIII, terras destinadas a proteção da fauna e flora (tabela 15). Apesar de a MRQ apresentar características favoráveis de aptidão agrícola para do cultivo de cana-de-açúcar em grande parte de suas áreas, estas, no entanto, em decorrência principalmente das características dos solos, indicam alto potencial de compactação (figura 41).

Figura 41: Mapa do potencial de compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás.

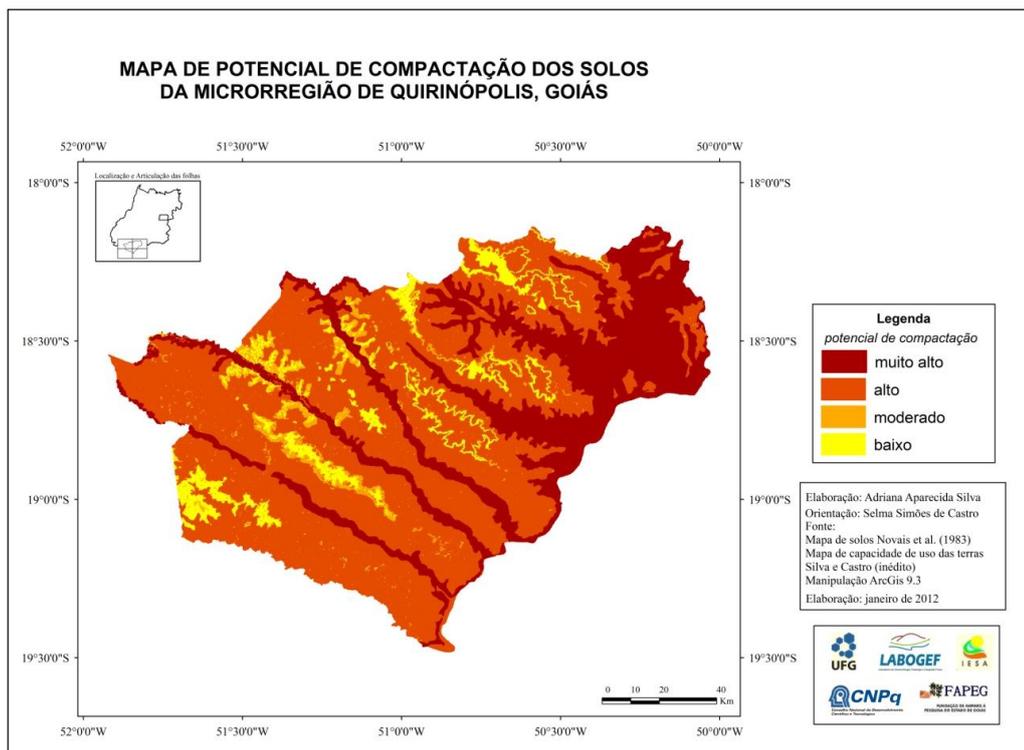


Tabela 15: Potencial de compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás.

Potencial	Área em ha	%
Muito alto	511.831,500	31,85
Alto	1.071.772,100	66,70
Baixo	23.206,700	1,45
Total	1.606.810,300	100

Esse fato está associado principalmente à textura e estrutura, uma vez que os solos argilosos são naturalmente propensos à compactação devido a sua alta plasticidade e coesão entre partículas, onde a resistência destes solos decresce com a umidade, chegando à formação de estruturas laminares, devido à deformação da estrutura original (KERTZMAN, 1996; CAMARGO; ALLEONI, 1997). Importante considerar que Severiano *et al.* (2009) também encontraram suscetibilidade à compactação em Latossolos de textura média, quando estes apresentam estrutura granular estando relacionada a altos conteúdos de umidade, o que ocorre devido à baixa capacidade de suporte de carga, significando elevado potencial de degradação estrutural dos solos e por isso a instalação de processos de compactação.

3.4 Risco à compactação dos solos

Risco indica a probabilidade de ocorrência de eventos ou processos, associados à ideia de vulnerabilidade devido ao grau de conflito entre o potencial existente e os processos induzidos (CASTRO *et al.*, 2005). No caso da compactação dos solos, considerando o potencial alto e muito alto observado no mapa da figura 41, associado à variação na discrepância entre os anos de 2004 e 2010 (figura 38 e 39) é preciso avaliar o risco de compactação compatível com o uso da terra. Para tanto foram elaborados dois mapas de risco à compactação para os usos relativos aos anos de 2004 e de 2010.

- **Risco à compactação dos solos em 2004**

A MRQ no ano de 2004 apresentou 395.959 ha ou 24,64% de área referentes a um risco baixo de compactação, sendo estas relativas às áreas com potencial baixo a moderado e baixa discrepância entre uso e capacidade de uso das terras. Áreas com risco moderado de compactação dos solos representaram 830.132 ha ou 51,66% sendo referentes a um potencial de compactação alto, porém, com discrepância de uso baixa, relativo principalmente ao uso pastagem, mas, com capacidade B VI, ou seja, adaptado para pastagem.

Áreas com risco alto à compactação dos solos ocupavam 221.286 ha, ou 13,77%, as quais apresentavam muito alto potencial à compactação e discrepância variando entre baixa e alta. Já as áreas com risco muito alto neste período representam 97.583 ha ou 6,07% sendo relativas a potencial e discrepância muito alta, referindo-se às áreas com solos de textura argilosa e com capacidade de uso relativo a preservação da fauna e flora, porém destinadas ao

uso agrícola (figura 42, tabela 16).

Figura 42: Mapa de risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao uso de 2004.

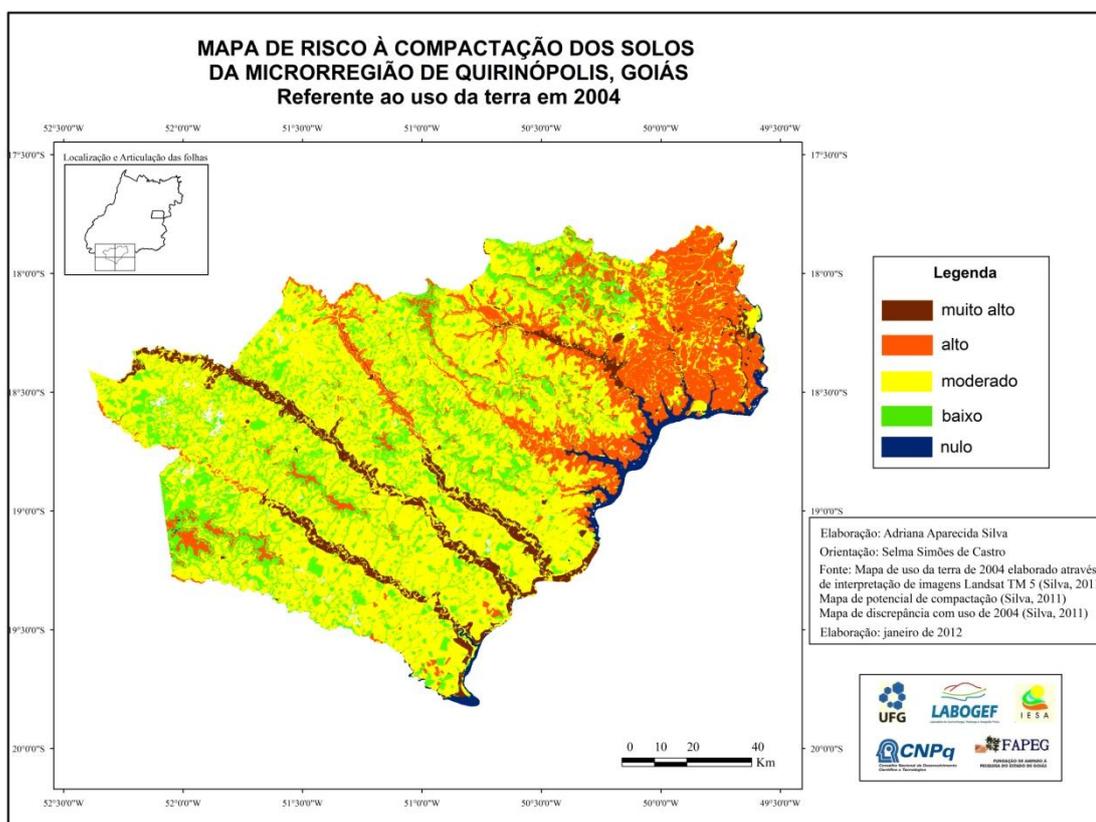


Tabela 16: Risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao uso do ano de 2004.

Risco	Área em ha	%
Muito alto	97.583,200	6,07
Alto	221.286,400	13,77
Moderado	830.132,600	51,66
Baixo	395.959,900	24,64
Nulo	61.848,200	3,85
Total	1.606.810,300	100

- **Risco à compactação dos solos em 2010**

Para o ano de 2010 a análise do risco à compactação do solo considerou também as áreas com cultivo de cana-de-açúcar, que representavam 7,23% da microrregião. Neste ano o uso da terra apresentou um risco muito alto à compactação referente a 140.782 ha ou 8,76% da área da microrregião, estando associada a áreas de potencial e discrepância muito alta,

relativos às áreas de cultivo de cana-de-açúcar. O risco alto representou 281.385 ha ou 17,51%, associado ao potencial muito alto e alto de compactação, onde às discrepâncias variam de baixas a altas, em áreas de cultura anual de soja ou milho. Chama a atenção o fato desse alto a muito alto risco estar concentrado a nordeste da MRQ, onde se encontram os LVdf, que correspondem aos solos da maior aptidão agrícola e por onde a cana-de-açúcar iniciou o processo de inserção na área, onde contem a maior mancha contínua da cultura em 2010 (figura 43, tabela 17).

Figura 43: Mapa de risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao uso de 2010.

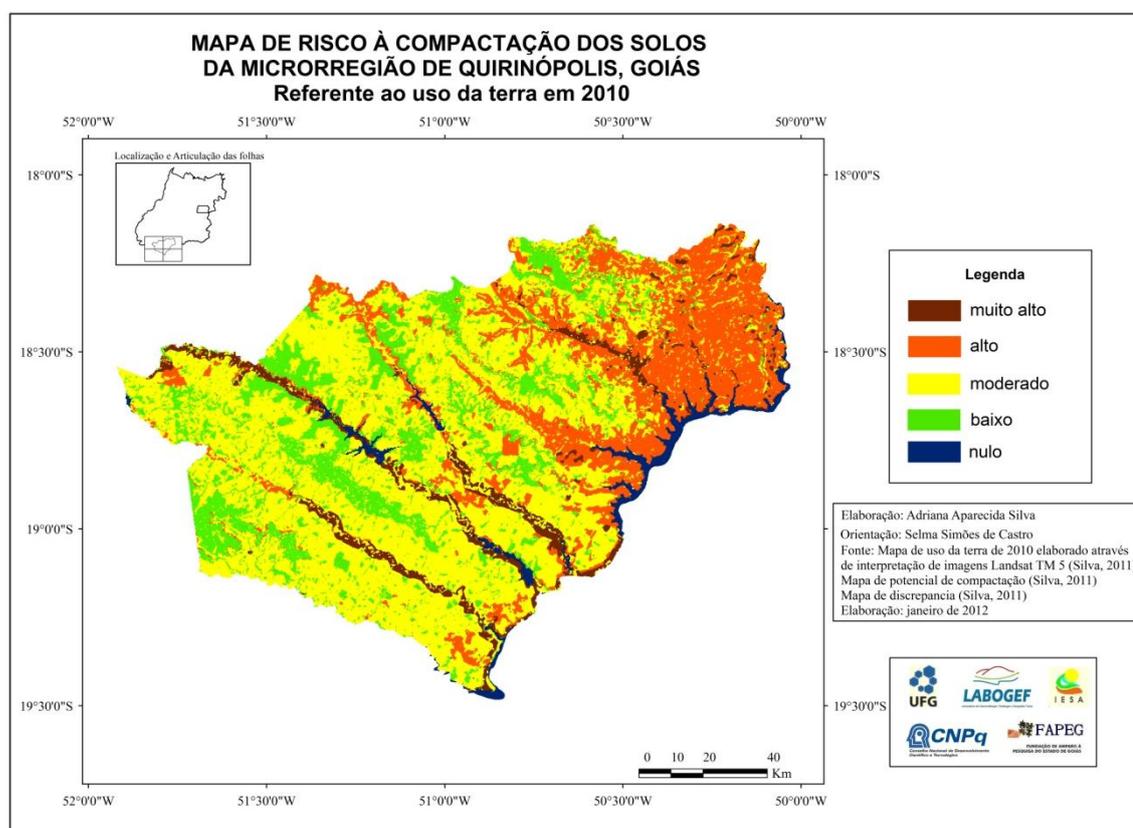


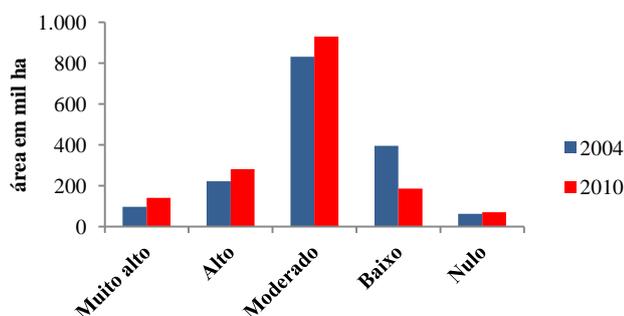
Tabela 17: Risco à compactação dos solos da microrregião de Quirinópolis, Goiás, referente ao ano de 2010.

Risco	Área em ha	%
Muito alto	140.782,200	8,76
Alto	281.385,400	17,51
Moderado	928.928,600	57,81
Baixo	185.249,900	11,53
Nulo	70.464,200	4,39
Total	1.606.810,300	100

Áreas com risco moderado continuam sendo as maiores em termos de extensão e aumentam em relação a 2004, representando agora 928.928 ha ou 57,81%, que se referem ao potencial alto a compactação, porém com baixa discrepância entre uso e capacidade de uso da terra em 2010. São áreas que ainda estão com pastagem. Por fim, áreas com risco baixo a compactação somam 185.249 ha ou 11,53% da MRQ, estando relacionadas ao potencial moderado a baixo e discrepância baixa entre uso e capacidade de uso das terras, sendo utilizadas geralmente para pastagem e vegetação natural.

Considerando os anos analisados, 2004 e 2010, observa-se uma variação bastante importante do risco à compactação dos solos na MRQ, referente a um aumento nas classes de risco muito alto ao moderado, com destaque para este último predominante nos dois anos analisados e a redução do risco baixo à compactação. Tal dinâmica se deve, em grande parte, à substituição de culturas que cederam lugar para a cana-de-açúcar, sendo a cultura anual em um primeiro momento e a pastagem em um segundo. Há ainda situações onde a pastagem cedeu lugar para a cultura anual, a qual em grande parte dos casos é praticada visando o preparo dessas áreas (degradadas ou não) para a cana-de-açúcar, prática bastante conhecida no setor (ABDALA; CASTRO, 2010; BORGES, 2011). A Figura 44 sintetiza o exposto.

Figura 44: Dinâmica do risco à compactação na MRQ entre os anos de 2004 e 2010.



Assim, no período analisado, pode-se considerar que o cultivo da cana-de-açúcar influenciou a qualidade do solo, aumentando o risco à instalação de processos de compactação, mas não de modo alarmante, decorridos seis anos. O fator principal está na utilização de maquinário pesado nas diferentes fases de manejo, desde o preparo do solo até a colheita mecanizada, além de essa cultura ter se instalado em solos com maior potencial natural de compactação. No caso da MRQ, como exposto, o preparo do solo empregou máquinas para subsolagem, gradagem pesada, gradagem leve, carregamento e transporte de

mudas, além do uso de colheitadeira mecânica nas colheitas realizadas em 2008, 2009 e 2010. Além disso, sofreu fertirrigação em vários talhões e controle de pragas.

Conclusões

A MRQ apresenta 64,18% de suas terras com classe de capacidade de uso B VI, indicada para uso com pastagem, e, em casos especiais, para cultura permanente, além de outros 23,68% relativos à classe A II, referente a terras cultiváveis com problemas simples de conservação. Estas, portanto são as melhores terras da microrregião. O início da expansão de cultivo de cana-de-açúcar ocorreu justamente na área da classe A II o que, em princípio, não apresenta fator limitante, uma vez que o tipo de cultura/manejo não é considerado na análise, porém, seus solos apresentam elevado conteúdo de argila, fator que em associado a outras características do solo e do relevo potencializam a compactação. Já em um segundo momento expansão ocorre em áreas da classe de capacidade B VI, as quais apresentam restrições ao cultivo intensivo que podem ser resolvidas com práticas simples de conservação.

Constatou-se um incremento na discrepância do uso e a capacidade de uso das terras entre os anos de 2004 (antes da cana) e 2010 (com cana consolidada sobre solos com capacidade de uso A II e B VI). A discrepância foi de cerca de 6,5% nos níveis muito alta e alta, contrapondo-se à redução em 6,95% das áreas com nível de discrepância baixa. Estes resultados sugerem que a cana-de-açúcar, que faz uso de manejo altamente tecnificado, pode ser problemática para a maior parte das terras da microrregião, podendo deflagrar a instalação de impactos ambientais, principalmente compactação.

Nesse sentido, avaliando o potencial de compactação do solo, observou-se que em virtude do tipo de solo predominante ser o latossolo de textura média a argilosa, o potencial de compactação varia de alto a muito alto, respectivamente. Assim, somando-se os dois, o risco de compactação é grande (26,27% da área) e, concentra-se em áreas de LVdf, a NE da área, onde teve início a conversão canavieira em áreas antes com culturas anuais de grãos, principalmente soja.

Comparando-se os riscos dos dois anos, 2004 e 2010, pode-se concluir que os níveis alto e muito alto ampliaram em termos de área após a chegada da cana, saltando de 20% para cerca de 27%. Tais dados justificam o aprofundamento dos estudos pedológicos do comportamento estrutural e analítico dessas duas classes de solo, LVdf e LVd, ora avaliados geocartograficamente. Para tanto, sítios representativos dos históricos de sucessão de uso, dos manejos e dos graus variados de compactação devem ser considerados, como se verá a seguir.

CAPITULO 4

INDICADORES MACRO E MICROMOFOLÓGICOS DA QUALIDADE FÍSICA DO LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NA MICRORREGIÃO DE QUIRINÓPOLIS, GOIÁS

Introdução

A expansão da cana-de-açúcar na MRQ ocorre a partir de 2004 e teve sua primeira safra colhida em 2006/2007, quando a área plantada foi de 5.688 ha (BORGES, 2011). Essa área se expandiu rapidamente chegando a 125.896 mil ha na safra 2011/2012 (CANASAT, 2012). Nessa microrregião dominam os Latossolos, solos em geral aptos a uso intensivo quando bem manejados, sendo especificamente os Latossolo Vermelho distróféricos (LVdf) e Latossolo Vermelho distróficos (LVd).

Inicialmente a cana se expande sobre o melhor solo da região, o LVdf, de textura argilosa, o qual cobre área relativamente pequena, antes cultivados principalmente com grãos. Em seguida, uma vez ocupados estes solos, a cana prosseguiu sobre áreas de pastagem, sobretudo nos LVd (SILVA; CASTRO, 2011), solos de textura média e elevado teor de argila dispersa, sendo, por isso, considerados mais frágeis e menos aptos ao cultivo intensivo. Por outro lado, tal solo se encontra mais distante das usinas sucroalcooleiras e também fora do raio de fertirrigação com vinhaça, impossibilitando, até o presente momento, o uso deste tipo de fertilizante. Por essa razão foi menos atraente, mas, esgotadas as áreas de LVdf, o LVd foi aos poucos sendo incorporado ao cultivo da cana (BORGES, 2011), quando se substituiu preferencialmente áreas de pastagem e secundariamente de grãos (SILVA; CASTRO, 2011). Em alguns casos, antes do plantio da cana, os solos ocupados com pastagem foram submetidos ao plantio com soja, objetivando a recuperação do solo degradado, principalmente por compactação. Tais solos foram devidamente preparados da mesma forma para receber o plantio da cana-de-açúcar.

Os Latossolos se caracterizam por apresentar perfil homogêneo associado a um relevo plano a suave ondulado, com moderada a elevada aptidão agrícola para cultivos intensivos, ainda que sejam passíveis de correção e adubação. São solos altamente suscetíveis à compactação quando apresentam textura muito argilosa a argilosa e, sofrem degradação completa da estrutura por esse processo quando apresentam textura média (KERTZMAN,

1996; TRINDADE *et al.*, 2008). Esse potencial é ainda maior quando submetido a manejo altamente tecnificado, com uso de maquinário pesado em todas as fases agrícolas, do plantio à colheita, como é o caso da cana-de-açúcar. Por isso a necessidade de adoção de critérios para avaliar as condições atuais da qualidade destes solos, em especial considerando este potencial de compactação e o fato da expansão do cultivo de cana-de-açúcar ser ainda recente nessas áreas, tornando possível evitar esse tipo de degradação da qualidade do solo.

A qualidade do solo pode ser entendida como a sua capacidade em exercer as suas funções dentro dos limites de capacidade de uso da terra, não considerando o solo apenas como um fator de produção, mas, como parâmetro de qualidade ambiental (DORAM; PARKIN, 1994). Na avaliação da qualidade física do solo se destaca a estrutura, uma vez que do ponto de vista do uso agrícola esta é considerada a mais importante das propriedades dos solos, por condicionar a porosidade e o suprimento de água e ar para as plantas (SCHNEIDER *et al.*, 2007; PEDROTTI; MÉLLO JÚNIOR, 2009). A estabilidade estrutural dos solos está relacionada à solidez de um agregado e à estabilidade de certos tipos de porosidade (RUELLAN *et al.*, 1993). Transformações nas propriedades dos solos, que reduzam sua capacidade de sustentar o crescimento vegetal ou que impliquem em riscos ambientais, causam impactos negativos à sua qualidade (REICHERT *et al.*, 2010).

Na avaliação da estrutura dos solos deve-se considerar a análise multiescalar, variando desde a escala da paisagem até a do microscópio, a partir dos níveis de organização da cobertura pedológica (RUELLAN; DOSSO, 2003). A escala da paisagem corresponde, grosso modo, à de semidetalhe, sendo a morfológica intermediária, relativa à observação dos perfis de solo em campo, e a micromorfológica considerada escala de detalhe e mesmo de ultradetalhe, observável em laboratório com auxílio de microscópio petrográfico. Em campo, a avaliação da macroestrutura do solo leva em conta forma, dimensão e grau de desenvolvimento dos agregados visíveis. Em laboratório, as avaliações em microestrutura abrangem todos estes aspectos, são observáveis sob aumento ótico > 5 X e permitem reconhecer facilmente e quantificar os efeitos da compactação sobre o sistema poroso, contribuindo para avaliar seu funcionamento hídrico (CASTRO *et al.*, 2003).

Os indicadores macromorfológicos são obtidos da descrição morfológica dos perfis de solo. Em termos de compactação é dada ênfase na estrutura e consistência, relacionadas aos históricos do uso e manejo a que os solos foram submetidos. Frequentemente, são complementados pela avaliação de atributos físico-hídricos e de matéria orgânica, podendo ser acompanhados também, de ensaios de campo como os de resistência mecânica à

penetração, dentre outros. Os indicadores micromorfológicos, relativos à microestrutura e porosidade são observados ao microscópio óptico petrográfico sobre lâminas delgadas de amostras indeformadas de solos, e servem para caracterizar e discutir os efeitos dos processos de compactação ao nível das mudanças de arranjo dos constituintes, de modo a detectar as estruturas associadas ao processo e mesmo de aspectos que permitem avaliar a sua resiliência (KERTZMAN, 1996; CAMARGO; ALLEONI, 1997; DIAS JUNIOR, 2000).

4.1 Indicadores macro e micromorfológicos de qualidade física do Latossolo Vermelho distroférico

- **Caracterização morfológica do LVdf**

O quadro 06 apresenta a síntese das características morfológicas dos perfis selecionados para a obtenção dos indicadores de qualidade do solo, identificados como: 1A (soja/cana fertirrigado); 1B (soja/cana não fertirrigado); 2A (pasto/cana fertirrigado); 2B (pasto/cana não fertirrigado); 6B (sucessão pasto/soja/cana não fertirrigado) e 7C (vegetação natural).

Os resultados mostram que nos perfis 1A (soja/cana fertirrigada), 1B (soja/cana não fertirrigado) e 2A (pasto/cana fertirrigado) desenvolveu-se estrutura em blocos subangulares pequenos a médios nos horizontes superficiais (A, AB e BA) em contraste com a granular, típica de Latossolos, nos horizontes subsuperficiais Bw1 e Bw2. No 2B (pasto/cana não fertirrigada) a estrutura já se apresenta laminar grande nos horizontes A e AB, em blocos subangulares no Bw1 e granular apenas no Bw2. O perfil 7C (vegetação natural) apresenta estrutura granular a grumosa no horizonte A e granular pequena a muito pequena nos AB, BA e Bw. Tais estruturas permitem constatar que, no geral, há predominância de estruturas em blocos médios a pequenos nos horizontes superficiais dos perfis com cana-de-açúcar.

Ainda no mesmo quadro, em relação à consistência a seco, nos perfis 1B e 2B se apresentam dura a muito dura nos horizontes A, AB e BA, passando a ligeiramente dura nos Bw1 e macia nos Bw2. Nos perfis 2A e 6B é ligeiramente dura nos horizontes A a BA, voltando a macia nos Bw. No perfil 7C é dura a ligeiramente dura nos horizontes A a BA, passando à macia nos Bw. A consistência úmida por sua vez se apresenta firme em todos os horizontes superficiais dos perfis cultivados com cana-de-açúcar e friável a muito friável nos horizontes subsuperficiais, com exceção para o horizonte AB do perfil 2B onde a consistência

continua muito firme. Para o perfil 7C a consistência úmida encontrada foi muito friável em todos os horizontes, o que é típico de Latossolos bem desenvolvidos e manejados. A plasticidade e pegajosidade, relativas à consistência molhada, indicam que se trata de solos muito plásticos e pegajosos quando manejados próximo à capacidade de campo, permitindo avaliar que se trata de alto potencial de compactação, como é o caso dos perfis 2B (pasto/cana não fertirrigada), 1A (soja/cana fertirrigada) e 1B (soja/cana não fertirrigada).

Quadro 06: Atributos morfológicos do Latossolo Vermelho distroférico.

Horiz. cm	Estrutura	Consistência			Transição
		seco	úmido	molhado	
Perfil 1A- soja/cana fertirrigada					
A 0 – 13	Blocos subangulares pequenos	D	FI	PPL, PPE	G, O
AB 13 – 50	Blocos subangulares médios a pequenos	LD	FI	PL, MPE	D, O
BA 50 – 90	Blocos subangulares pequenos	D	FR	PL, MPE	C, O
Bw1 90 – 110	Granular pequena	LD	FR	PL, MPE	D, O
Bw2 110 – 150+	Granular pequena	M	MFR	PL, PE	
Perfil 1B- soja/cana não fertirrigada					
A 0 – 23	Blocos subangulares médios	D	FI	PPL, PPE	G, O
AB 23 – 65	Blocos subangulares médios a pequenos	MD	FI	PL, PE	D, P
BA 65 – 88	Blocos subangulares pequenos	MD	FI	PL, MPE	D, P
Bw1 88 – 116	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	PL, MPE	D, O
Bw2 116 – 150+	Granular pequena	M	MFR	PL, MPE	
Perfil 2A- pasto/cana fertirrigada					
A 0 – 33	Blocos subangulares pequenos	M	MFR	PL, LPE	G, P
AB 33 – 47	Blocos subangulares médios a pequenos	LD	FR	PL, PE	C, P
BA 47 – 77	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	PL, PE	G, I
Bw1 77 – 115	Granular pequena	M	FR	LPL, LPE	D, P
Bw2 115 – 150+	Granular pequena	M	MFR	LPA, LPE	
Perfil 2B- pasto/cana não fertirrigada					
A 0 – 15 (20)	Laminar grande	MD	MFI	LPL, LPE	D, O
AB 15 – 53 (65)	Laminar grande	MD	MFI	LPL, PPE	D, P
Bw1 53 – 102	Blocos subangulares médios	LD	MFR	LPL, MPE	G, O
Bw2 102 – 150+	Granular pequena	LD	MFR	MPL, MPE	
(perfil 6B) sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada					
A 0 – 28	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	NPL, LPE	C, O
AB 28 – 56	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	LPL, LPE	A, P
Bw1 56 – 90	Blocos subangulares pequenos	LD	MFR	LPL, LPE	A, P
Bw2 90 – 150+	Granular pequena	M	MFR	LPL, LPE	
Perfil 7C- vegetação natural					
A 0 – 20	Granular pequena a grumosa	D	MFR	MPL, PE	G, P
AB 20 -53	Granular pequena	LD	MFR	PL, PE	G, P
BA 53 – 90	Blocos angulares grandes que desfazem em grânulos pequenos	LD	MFR	LPL, PE	C, O
Bw1 90- 130	Blocos angulares médios que desfazem em grânulos pequenos	M	MFR	PPL, PPE	C, P
Bw2 130 – 150+	Blocos angulares pequenos	M	MFR	PL, PE	

Consistência seca: M = macia, LD = ligeiramente dura, D=dura, MD=muito dura; **Consistência úmida:** MFR = muito friável, FR = friável, FI = firme; MFI = muito firme; **Consistência molhada:** NPL = não plástica, PPL = pouco plástica, LPA = ligeiramente plástica, PL = plástica, MPL = muito plástica; PPE = pouco pegajosa; LPE = ligeiramente pegajosa, PE = pegajosa, MPE = muito pegajosa; **Transição:** A = abrupta, C = clara, G = gradual, D = difusa; P = plana; O = ondulada, I = irregular, D = descontínua.

No geral, as características morfológicas apresentadas (quadro 06) sugerem que já ocorre degradação estrutural compatível com compactação dos solos, evidenciada por alterações na estrutura e consistência seca, com exceção do perfil 2B que já indica compactação. Kertzman (1996), estudando solos similares, definiu as consistências dura a muito dura, quando no estado seco, como indicadoras de médio a alto grau de compactação. Aplicando essa interpretação nos perfis ora estudados, a maior alteração estrutural foi observada no perfil 2B, relativo à substituição pasto/cana não fertirrigada, devido presença de estrutura laminar muito dura nos horizontes A e AB e firme a muito firme no estado úmido. Características que indicam compactação, a qual foi atribuída ao preparo do solo em período úmido, conforme relato do manejo disponibilizado pela Usina São Francisco.

A menor degradação foi observada no perfil 2A (pasto/cana fertirrigada) que apresenta estrutura em blocos pequenos com consistência macia no horizonte A e Bw1 e Bw2 e ligeiramente dura no AB e BA, porém muito friável a friável no estado úmido. Considerando os seis perfis, o perfil 7C é o único que não está compactado, como era esperado. Os perfis 1A, 1B, 2A e 6B apresentam compactação fraca e o perfil 2B apresenta compactação forte nos horizontes superficiais. Em nenhum deles o Bw foi afetado, no máximo o AB, logo trata-se de compactação superficial.

Mesmo tendo passado pelo mesmo processo de preparo mecânico descompactador (subsolagem, grade pesada e grade leve), o qual teria reduzido bastante ou mesmo eliminado compactação herdada dos cultivos e manejos anteriores, o comportamento atual com cana-de-açúcar não é uniforme entre os perfis. Há que se considerar que as próprias operações de preparo com uso de maquinário pesado tendem a deformar a estrutura do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997; DIAS JUNIOR, 2000), além disso, desde 2006 já foram realizadas três colheitas mecanizadas (junho/ 2008, maio/2009 e maio/2010), a qual faz uso de maquinário pesado. Casagrande (2002) alerta que uma carregadeira de cana pode causar compactação em até 10 cm de profundidade, já um sistema de transporte via “biminhão”, em que as carrocerias podem levar até 30 t cada uma quando cheia, podem chegar a até 30 cm de compactação.

- **Atributos físico/hídricos e teor de matéria orgânica do LVdf**

A tabela 18 apresenta os resultados analíticos relativos à textura, argila dispersa em água (ADA), Densidades do solo (DS) e de partículas (DP), porosidade total (PT) e teor de Matéria Orgânica (MO) dos solos estudados. Corroborando as observações de campo, a textura é argilosa para todos os perfis estudados com relativamente baixa dispersão da argila

em água (ADA). Esta pode ser explicada pelos altos teores de óxidos de Fe, característica comum de solos originados de rochas basálticas com o LVdf, confirmando resultado encontrado em solos similares por Vitorino *et al.* (2003) e Azevedo e Bonumá (2004). Os teores mais elevados de ADA ocorrem apenas no horizonte A dos perfis 1A (soja/cana fertirrigada) e 2A (pasto/cana fertirrigada), mas também no 7C (vegetação) o que pode indicar que o próprio solo já teria essa característica.

Tabela 18: Atributos físicos e teor de matéria orgânica do Latossolo Vermelho distroférrico.

Perfil/Horizonte	Textura g kg ⁻¹			Classe textural	ADA	GF	Densidade		PT	MO
	Prof. em cm	Areia	Silte				Argila	Solo		
(Perfil 1A) soja/cana fertirrigada										
A 0-13	420	110	470	Argilosa	10	81	1,08	2,78	61	17
AB 13-50	400	100	500	Argilosa	4	93	1,07	2,64	59	10
BA 50-90	370	120	510	Argilosa	4	93	0,91	2,77	67	6
Bw1 90-110	500	100	400	Argilo arenosa	0	100	0,94	2,70	65	3
Bw2 110-150+	570	90	340	Argilo arenosa	2	96	1,03	3,14	67	2
(Perfil 1B) soja/cana não fertirrigada										
A 0-23	470	110	420	Argilo arenosa	2	96	1,28	2,60	50	22
AB 23-65	450	110	440	Argilosa	2	97	1,28	2,70	53	11
BA 65-88	390	110	500	Argilosa	0	100	1,13	2,79	59	6
Bw1 88-116	370	120	510	Argilosa	2	96	1,11	2,78	60	3
Bw2 116-150+	420	110	470	Argilosa	0	100	1,06	2,77	62	2
(Perfil 2 A) pasto/cana fertirrigada										
A 0-33	540	90	370	Argilo arenosa	10	79	1,15	2,88	60	18
AB 33-47	470	110	420	Argilo arenosa	0	100	1,05	2,64	60	10
BA 47-77	460	110	430	Argilo arenosa	4	92	1,03	3,11	67	6
Bw1 77-115	570	90	340	Argilo arenosa	0	100	1,03	3,11	67	2
Bw2 115-150+	690	70	240	Franco argilo arenosa	0	100	1,06	2,63	60	2
(Perfil 2B) pasto/cana não fertirrigada										
A 0-15 (20)	300	130	570	Argilosa	2	95	1,50	3,08	51	17
AB 15-53 (65)	350	120	530	Argilosa	2	96	1,29	2,24	42	10
Bw1 53-102	450	110	440	Argilosa	2	96	1,10	2,65	59	7
Bw2 102-150+	500	100	400	Argilo arenosa	2	96	1,05	2,58	59	2
(Perfil 6B) sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada										
A 0-28	470	110	420	Argilo arenosa	0	100	1,22	2,25	33	10
AB 28-56	400	120	480	Argilosa	0	100	1,36	2,46	45	7
Bw1 56-90	420	110	470	Argilosa	0	100	1,27	2,27	44	6
Bw2 90-150+	420	110	470	Argilosa	0	100	1,15	2,30	50	7
(Perfil 7C) vegetação natural										
A 0-20	500	100	400	Argilo arenosa	8	88	1,16	2,70	57	29
AB 20-53	470	110	420	Argilo arenosa	10	83	1,03	2,48	58	11
BA 53-90	370	120	510	Argilosa	4	94	1,00	2,78	64	7
Bw1 90-130	360	120	520	Argilosa	4	92	1,01	2,77	63	3
Bw2 130-150+	390	110	500	Argilosa	0	100	0,98	3,13	69	2

ADA = argila dispersa em água; GF = grau de flocculação; PT = porosidade total; MO = matéria orgânica.

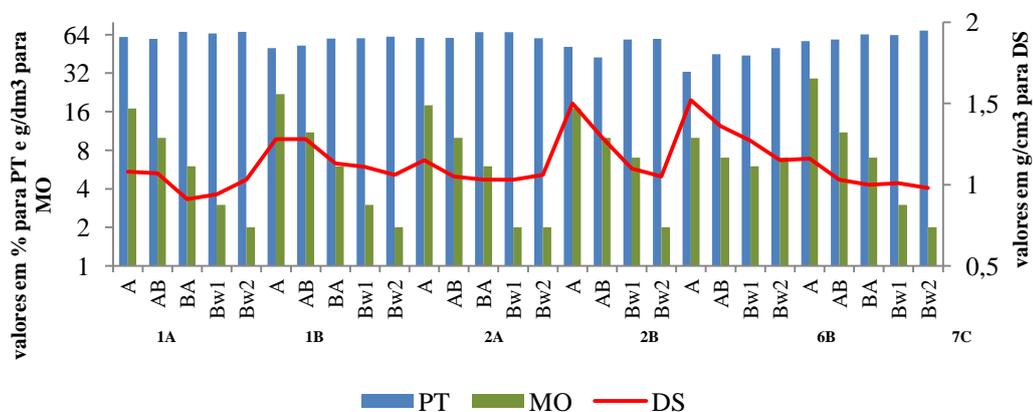
Em todo caso, nos demais horizontes deste perfil 7C e nos demais a dispersão é muito baixa (< 4%), sendo zero em todos os horizontes do perfil 6B (sucessão pasto/soja/cana não

fertirrigada). Alguns autores consideram que a vinhaça melhora a agregação dos solos o que permite uma maior infiltração da água e diminuição de argila dispersa, variando em relação a sua constituição, quantidade de matéria orgânica e de cátions K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (RIBEIRO *et al.*, 1983). Porém, não se observa diferença notável entre perfis fertilizados e não fertilizados. Há que se assinalar que se trata da MO total, a qual corrigida para o C orgânico indicaria baixos teores, exceto para os horizontes A e AB, como esperado.

Inversamente proporcional à ADA, o grau de floculação (GF) apresenta valores maiores nos horizontes subsuperficiais em relação aos superficiais, como era esperado, por estarem pouco afetados pelo manejo. O perfil 6B apresentou todos os horizontes com argila 100% floculada, como é próprio desse tipo de solo.

Os dados relativos aos atributos físico/hídricos e de MO, quando comparados os perfis com cana-de-açúcar com os da área de controle, indicam que ocorreram alterações na qualidade física dos LVdf. Como parâmetros foram considerados os índices apresentados por Kertzman (1996) para solos com mesmas características, onde os valores de DS entre 1,2 e 1,39 $g\ cm^{-3}$ sendo indicativos de compactação média e valores superiores a 1,40 de alta compactação. Nos perfis analisados, valores compatíveis com compactação alta foram encontrados nos horizontes A e AB do perfil 2B (pasto/cana não fertilizada) e média para o perfil 1B (soja/cana não fertilizada). Em relação à PT, ainda segundo o mesmo autor, valores menores que 54% são indicativos de alta compactação, como os encontrados nos horizontes A e AB dos perfis 2B, 1B e 6B todos relativos ao manejo não fertilizado (figura 45).

Figura 45: Distribuição dos valores de DS, PT e MO nos perfis de Latossolo Vermelho distroférico.



DS= densidade do solo; MO = matéria orgânica; PT = porosidade total.

Considerando o cultivo em resíduos culturais da palhada da cana-de-açúcar, prática usada, que fornece MO aos solos, tem-se que todos os horizontes A dos perfis 1A, 1B, 2A e 2B apresentam valores altos de MO, mas ainda assim inferiores ao perfil referência 7C. O mesmo não ocorre no perfil 6B, cujo manejo é tradicional, sem resíduos, fator que também responde aos baixos valores de PT encontrados. Por outro lado, temos que a fertirrigação com vinhaça ainda não elevou notavelmente o teor de MO nos perfis 1A e 2A, o que poderia ser explicado pelo fato da vinhaça ter sido aplicada apenas uma vez e abaixo do volume permitido (150 m³/ha) (BORGES, 2011). No entanto, observou-se relação dentre a fertirrigação e os menores valores de DS e maiores de PT dos perfis fertirrigados em relação aos demais, o que se explicaria pela capacidade da vinhaça em contribuir com MO e assim melhorar a agregação do solo e a dimensão dos agregados, conferindo-lhe maior estabilidade estrutural e porosidade (macro e micro), confirmando o observado em outros solos por Silva *et al.* (2007) e Carvalho *et al.* (2010).

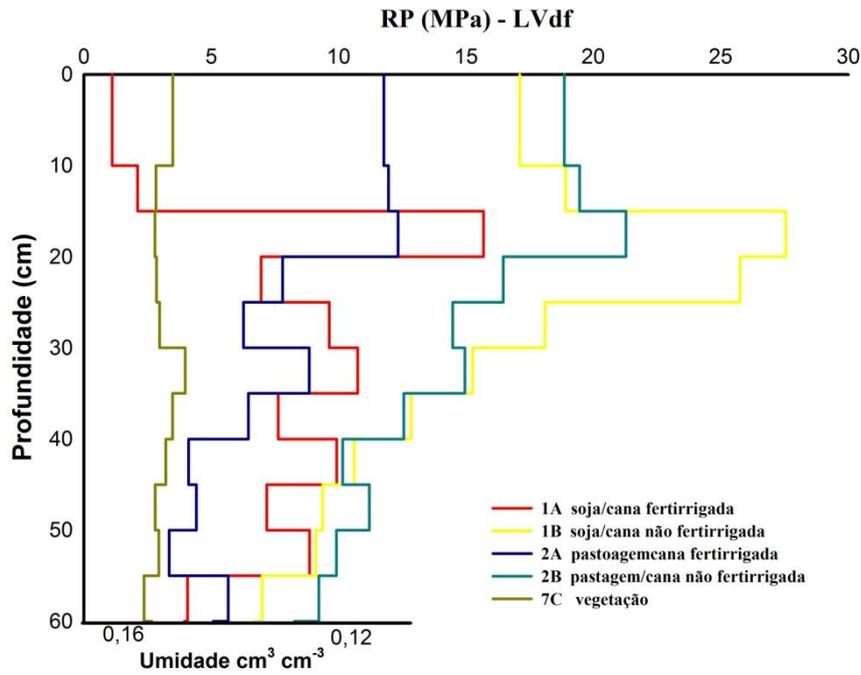
Chama a atenção as DP elevadas, superiores à do quartzo, às vezes superiores a 3, indicando presença de minerais pesados, o que se explicaria também pelo teor elevado de nódulos de ferro, como esperado para esses solos. O fato das DS serem todas maiores do que 1, e do 7C as apresentar também ao redor de 1, com destaque os perfis 2B e 6B, e secundariamente 2A, que são indicadoras de compactação, contudo esta ainda não é severa após seis anos de cultivo. Apenas dois perfis, 2B e 6B, inspiram mais cuidados e secundariamente o 1A e 2A, que já comecem a se destacar. Portanto, a ADA e o GF ainda apresentam indicadores relativamente satisfatórios, embora em superfície já revelem mudanças estruturais. A vinhaça, mesmo tendo sido aplicada uma única vez, parece estar trazendo benefícios ainda que sutis para a estrutura e a PT dos perfis fertirrigados.

- **Resistência mecânica à penetração do LVdf**

Os resultados dos ensaios de resistência à penetração (RP), apresentados na figura 46, revelam maiores valores em subsuperfície, com destaque para os perfis 1B (soja/cana não fertirrigada) com ~15 a 25 MPa, o 2B (pasto/cana não fertirrigada) com ~15 a 20 MPa e 1A (soja/cana fertirrigada) relativo a cerca de 15 MPa, ambos entre 15 e 20/25 cm de profundidade. O perfil 2A (pasto/cana fertirrigada) se diferencia dos anteriores por apresentar maiores resistências em superfície, entre 0 e 20 cm (~12 MPa) de profundidade. O perfil 7C (vegetação) apresentou os menores valores de RP, conforme esperado. O perfil 6B foi

desconsiderado nesta análise pelo fato do campo ter ocorrido em período úmido (início de novembro).

Figura 46: Valores de RP em profundidade dos solos Latossolo Vermelho distroféricos.



Esses valores poderiam ser considerados altos e indicativos de compactação extremamente alta, não fosse o fato da coleta de dados ter sido realizada em estação seca, quando a umidade gravimétrica variou entre $\sim 0,12$ a $\sim 0,16 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$, sem alterações significativas entre os perfis. Segundo Kertzman (1996) quando a umidade se encontra abaixo da capacidade de campo, em função do tipo de solo e do período de coleta, um aumento de 5% na umidade aumenta de 3 a 4 vezes os valores de RP. Vaz *et al.* (2002) também encontraram para um LVdf valores de resistência variando de 15 MPa para umidade de $0,2 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ até $< 5 \text{ MPa}$ para valores de umidade $0,4 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Tais dados que evidenciam a dependência entre umidade e RP e explicariam as altas RP encontradas, pois que os valores de umidade encontrados foram bem inferiores aos detectados por esses autores. Procedendo-se a uma correção nos valores, mesmo assim chama a atenção o fato das RP serem relativamente elevadas, alcançando profundidades de até 60 cm, sobretudo entre 40 e 60 cm, o que preocupa em termos de baixa retenção de umidade desses solos onde as raízes teoricamente estariam dependentes dela.

Outros fatores que influenciam os resultados da RP são conteúdo de MO, a DS e a textura, uma vez que a fração argila aumenta a coesão entre as partículas do solo e favorece a agregação. Além disso, quanto maior o teor de argila, menor o tamanho dos poros e maior a resistência em uma dada densidade (REICHERT *et al.*, 2010; SANTOS *et al.* inédito). As maiores RP foram observadas entre 0 e 25 cm, sendo mais representativa entre e 15 e 25 cm, relativas aos perfis 1B (soja/cana) e 2B (pasto/cana), ambos não fertirrigados, justamente onde as DS são mais elevadas em todos os perfis.

De um modo geral foi observada redução na qualidade física dos solos, com leve desvantagem para os perfis onde não ocorre o manejo com fertirrigação de vinhaça, especialmente no perfil 2B, preparado durante estação chuvosa, como já exposto. Tal processo é compatível com níveis alto a moderado de compactação dos solos, nos horizontes superficiais (tipo compactação rasa), as quais pode-se considerar como consequência do tráfego de maquinaria pesada, típico do manejo de cana-de-açúcar tecnificada (colheita mecanizada).

Tais dados reforçam ainda a ideia de que as condições de qualidade física dos solos observadas na MRQ se associam ao uso atual com cana-de-açúcar conforme resultados semelhantes encontrados por Silva; Cabeda (2006), Silva *et al.* (2009), Severiano (2010) e por Pacheco e Cantalice (2011). Quanto aos perfis com manejo fertirrigado com vinhaça, estes apresentaram comportamento ligeiramente melhor em relação à qualidade física, especificamente com relação aos indicadores estrutura, DS, PT e RP, ainda que não tenham elevado substancialmente o teor de MO no solo.

- **Caracterização micromorfológica do LVdf**

A caracterização micromorfológica é apresentada na tabela 19 e permite constatar que os perfis estudados apresentam matriz do solo composta predominantemente por material fino argilo-ferruginoso compondo agregados arredondados (estrutura granular) pequenos e às vezes pequenos blocos subarredondados, ambos separados por poros de amontoamento interagregados nos horizontes subsuperficiais Bw. Já nos superficiais percebe-se aumento dos blocos pequenos a médios, também constituídos por material fino argilo-ferruginoso, porém cimentando grãos grosseiros separados por poros fissurais em geral finos. Percebe-se, no entanto, a pouca contribuição de material grosseiro (areia, silte), porém a presença de minerais ferruginosos opacos (tipo magnetita) e de nódulos ferruginosos hematíticos na função de material grosseiro. Tais características são típicas do LVdf (Embrapa, 2006).

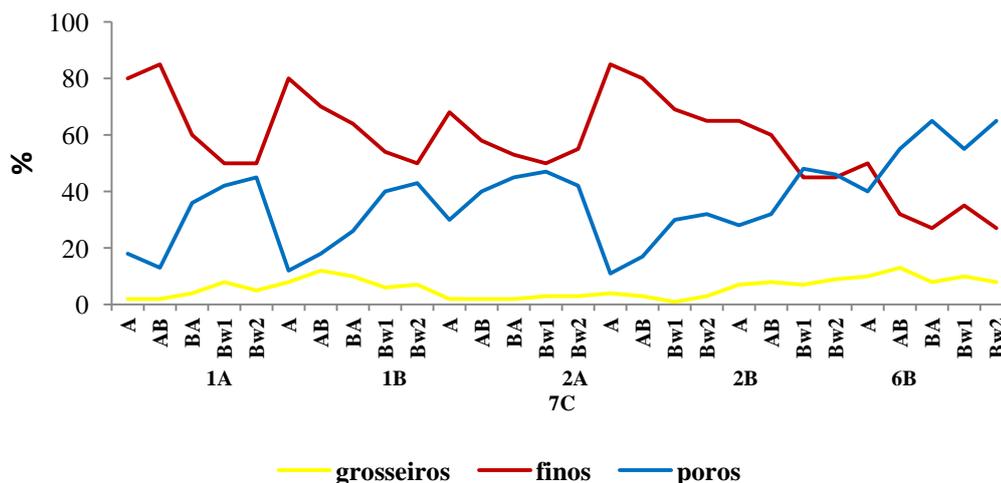
Tabela 19: Caracterização micromorfológicos do Latossolo Vermelho distroférico.

Hor cm	Microestrutura	Porosidade (dominante)	Feições
PERFIL 1A- soja/cana fertirrigada			
A 0-13	Blocos subangulares mm, forte a moderada	Interagregada fina a muito fina; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (18) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (28)
AB 13-50	Blocos subangulares mm, forte a moderada	Interagregada, fina a média; canais e fissuras mm	Nódulos de Fe (15) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (45)
BA 50-90	Blocos subarredondados e subangulares, forte a moderada	Interagregada fina a muito fina; canais mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (50)
Bw1 90-110	Blocos subarredondados e subangulares mm, forte	Interagregada média a fina; canais e fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (3); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (45)
Bw2 110-150+	Blocos subarredondados mm, forte	Interagregada média a fina; canais mm	Nódulos de Fe (8) e carvão mm (2); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (46)
PERFIL 1B- soja/cana não fertirrigada			
A 0-23	Blocos subarredondados mm, fraca	Interagregada fina a muito fina; fissuras mm	Nódulos de Fe (20) e carvão mm (10); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (2)
AB 23-65	Blocos subangulares mm, moderada a fraca	Interagregada fina a média; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (20)
BA 65-88	Blocos subangulares mm, moderada a forte	Interagregada fina a média; canais e fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (3); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (40)
Bw1 88-116	Blocos subangulares e subarredondados mm, forte	Interagregada fina a muito fina; canais e fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (2); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (18)
Bw2 116-150+	Blocos subangulares e subarredondados mm, forte	Interagregada média a fina; câmaras e cavidades mm	Nódulos de Fe (8) e carvão mm (2); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (26)
PERFIL 2A – pasto/cana fertirrigada			
A 0-33	Blocos subangulares mm, forte a moderada	Interagregada fina a muito fina; canais e fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (30)
AB 33-47	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Interagregada fina a muito fina; cavidades mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (23)
BA 47-77	Blocos subangulares mm, forte a moderada	Interagregada fina a muito fina; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (22)
Bw1 77-115	Blocos subarredondados e subangulares mm, forte	Interagregada fina a muito fina; cavidades mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (32)
Bw2 115-150+	Blocos subarredondados e subangulares mm, forte	Interagregada fina a muito fina; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (8) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (27)
PERFIL 2B – pasto/cana não fertirrigada			
A 0-15 (20)	Blocos subangulares mm, moderada a fraca	Interagregada pouca, fina; fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (7); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (5)
AB 15-53	Blocos subangulares mm, fraca	Interagregada, pouca, fina; cavidade e fissuras mm	Nódulos de Fe (8) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (12)
Bw1 53-102	Blocos subangulares mm, forte a moderada	Interagregada fina; canais, câmaras e fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (45)
Bw2 102-150+	Blocos subangulares e subangulares mm, forte	Interagregada, fina; fissuras, canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (3); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (43)
PERFIL 6B – sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada			
A 0-28	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Interagregada fina a muito fina; canais e fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (3); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (13)
AB 28-56	Blocos subarredondados mm, forte	Interagregada fina a muito fina; cavidades e fissuras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (3); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (42)
Bw1 56-90	Blocos subangulares e subarredondados mm, forte	Interagregada fina a média; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (8) e carvão mm (3); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (35)
Bw2 90-150+	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Interagregada média a fina; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (8) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (23)
PERFIL 7C –vegetação natural			
A 0-20	Blocos subarredondados mm, forte a fraca	Interagregada média; canais, cavidades e fissuras mm	Nódulos de Fe (15) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (50)
AB 20-53	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Interagregada média a fina; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (15) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (60)
BA 53-90	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Interagregada média a fina; câmaras mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (8); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (55)
Bw1 90-130	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Interagregada média a fina; canais e cavidades mm	Nódulos de Fe (10) e carvão mm (5); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (48)
Bw2 130-150+	Blocos subarredondados e subangulares mm, forte	Interagregada fina a muito fina; canais e câmaras mm	Nódulos de Fe (8) e carvão mm (3); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (37)

Em todos os perfis atualmente com cana-de-açúcar o material fino ocupa maior área nas lâminas, como nos horizontes A e AB, correspondendo a cerca de 80% nos perfis 1A (soja/cana fertirrigada), 1B (soja/cana não fertirrigada) e 2B (pasto/cana não fertirrigada) e cerca de 60% para o perfil 2A (parto/cana fertirrigada) e 6B (sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada). Esses valores decrescem em profundidade para até a média de 50% para os horizontes BA, Bw1 e Bw2 nos perfis 1A e 1B, fato associado ao aumento da porosidade. Nos perfis 2A e 6B essa redução é menos expressiva, mesmo assim ficando entre 50 a 55%.

Os poros visíveis nas lâminas apresentam participação reduzida nos horizontes superficiais nos perfil 1A, 1B e 2B, de cerca de 15%, dobrando nos perfis 2A e 6B para 30%. A porosidade é crescente em profundidade, representando 30% nos horizontes Bw do perfil 2B e 40% nos perfis 1A, 1B, 2A e 6B. O perfil de referência 7C (vegetação) apresenta maior porosidade quando comparado aos perfis com cana-de-açúcar, embora com menores valores em superfície (A, AB) (~50%) e maiores em subsuperfície (BA, Bw1, Bw2) (~65%). Nesse perfil o material fino fica reduzido, passando de <50% na superfície a cerca de 20% em profundidade. No conjunto de perfis o material grosseiro é igualmente distribuído e representa aproximadamente 10% da área total da lâmina de cada horizonte de todos os perfis. A figura 47 sintetiza o exposto.

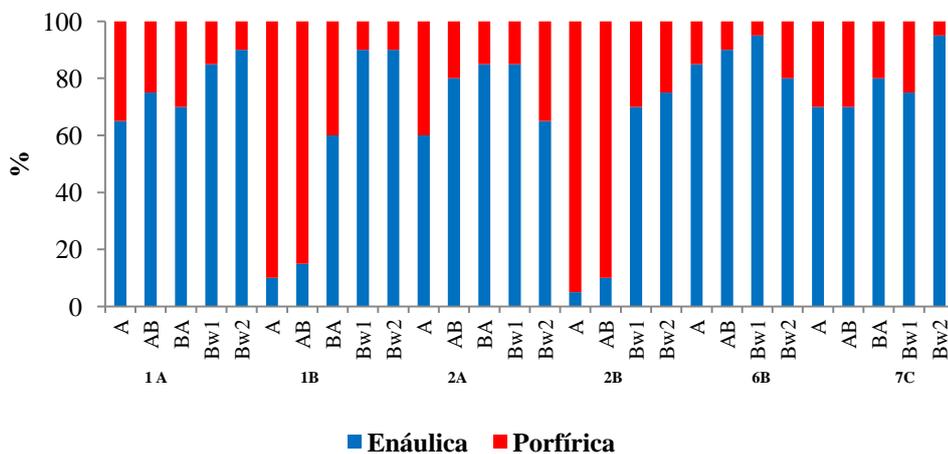
Figura 47: Distribuição dos componentes do fundo matricial das lâminas delgadas dos perfis de LVdf.



Ocorrem dois tipos de distribuição relativa, a enáulica e a porfírica. O perfil 7C (vegetação) apresentou distribuição relativa enáulica dominante em todos os horizontes (cerca de 80%), com pequenas zonas adensadas porfíricas bem distribuídas, correspondentes a cerca

de 20% da área da lâmina, como esperado para LVdf. Já nos demais perfis 1A (soja/cana fertirrigada) e 2A (pasto/cana fertirrigada) predomina a distribuição relativa contínua enáulica nos horizontes superficiais A, AB e BA, mas decresce a cerca de 60% da área das lâminas. Tais zonas adensadas correspondem à distribuição porfírica em cerca de 30% da lâmina nos horizontes superficiais, contra cerca de 90% nos horizontes Bw, portanto diminuem notavelmente em profundidade, nos horizontes subsuperficiais, para menos que 10%. Merecem destaque os perfis 1B e 2B que apresentam nos horizontes A e AB predomínio da distribuição relativa do tipo porfírica (~90%), mas nos horizontes BA e Bw retomam a distribuição relativa enáulica. A figura 48 ilustra o exposto.

Figura 48: Distribuição relativa dos horizontes do LVdf.



No geral, a figura 48 permite constatar o predomínio da distribuição enáulica com percentuais menores de porfíricas, estas indicadoras de compactação. Entretanto, como no caso as porfíricas, não se apresentam de forma contínua nos horizontes de todos os perfis, com exceção dos horizontes A e AB dos perfis 1B (soja/cana não fertirrigada) e 2B (pasto/cana não fertirrigado), na qual predominam, na prática indicam compactação fraca ou ainda incipiente.

A distribuição enáulica se apresenta muito pequena a pequena, subarredondada, com pedalidade forte a moderada (indicadora de microagregação), em que o material fino caulínico-ferruginoso se encontra dissociado do material grosseiro quartzoso fino, com macroporosidade interagregada de empilhamento média a fina. Os horizontes Bw são similares aos anteriormente descritos, onde dominam a distribuição enáulica e porosidade

intergranular fina, além de canais e/ou cavidades milimétricas. Os perfis apresentam ainda feições de preenchimento por material do próprio horizonte (tabela 19).

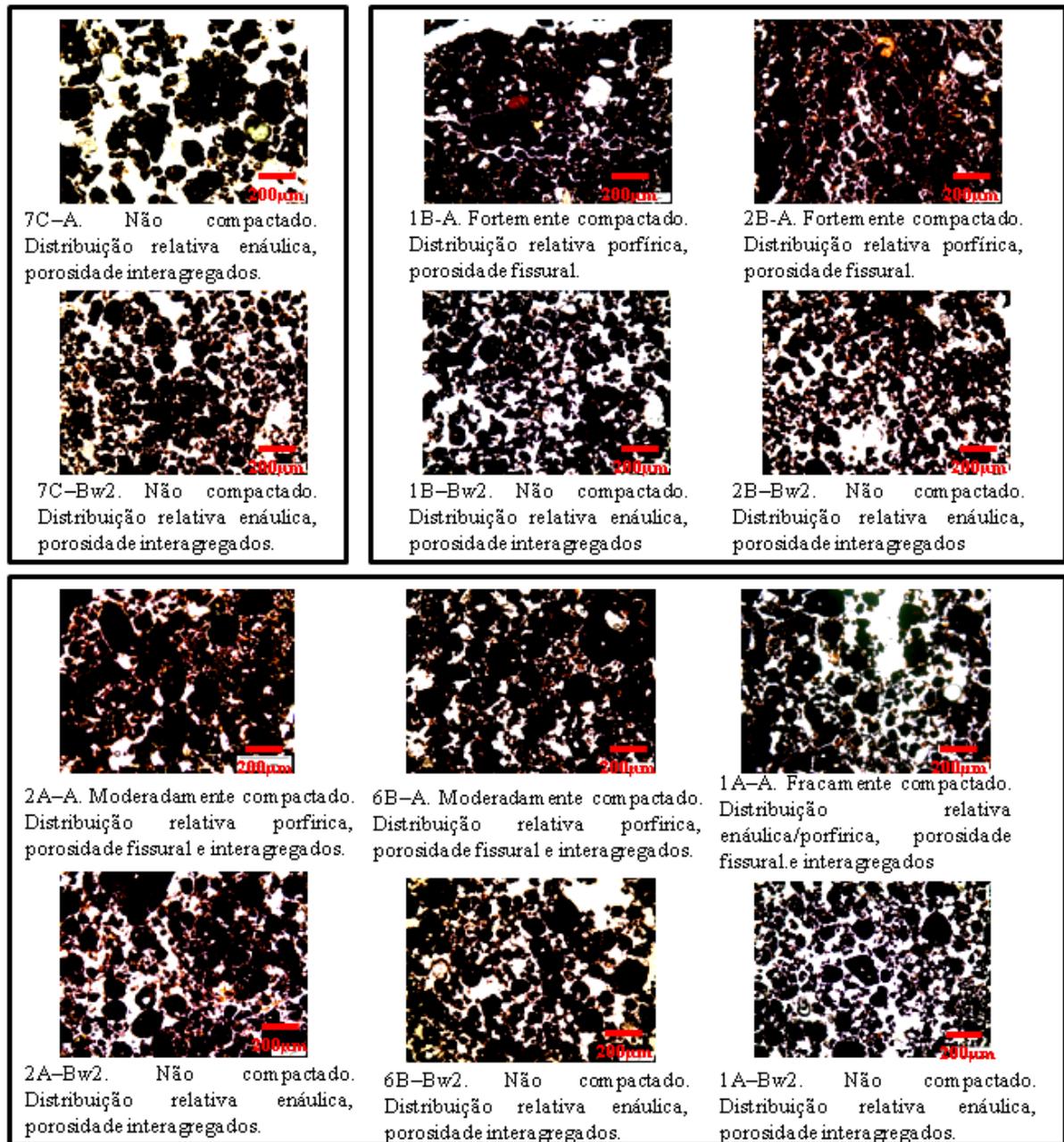
Os perfis 1B (soja/cana não fertirrigado) e 2B (pasto/cana não fertirrigado) apresentam os horizontes A e AB com blocos subangulares e subarredondados grandes, relacionados à distribuição porfírica, com pedalidade fraca a moderada, constituída por uma associação entre a fração fina caulínico-ferruginosa e o a fração grosseira quartzosa médio, e predomínio de porosidade fissurada fina a muito fina. Nos horizontes BA e Bw domina a distribuição enáulica, pedalidade forte (microagregada), com pequenas zonas adensadas porfíricas em blocos subarredondados pequenos. Predomina a macroporosidade intergranular de empilhamento, com canais, cavidades e/ou câmaras milimétricas associadas à mesofauna, além de feições de preenchimento com material do próprio horizonte.

O perfil 7C (vegetação) também apresenta fração caulínico-ferruginosa, com distribuição enáulica fortemente desenvolvida em todo o perfil. Apresenta poros intergranulares e interagregados médios a finos, e presença de inúmeros canais, cavidades e câmaras milimétricas a subcentimétricas indicativas de boa atividade biológica (raízes e mesofauna) em todo o perfil. Raízes fasciculadas finas ocorrem nos poros maiores, em vários estágios de decomposição. Este perfil apresenta feições de preenchimento com material do próprio horizonte (tabela 19).

O estudo micromorfológico revelou que a distribuição enáulica domina nos horizontes Bw de todos os perfis, independentemente do uso com cana-de-açúcar e em todos os horizontes do perfil 7C (vegetação). Tal distribuição relativa é típica dos latossolos em geral e em particular dos LVdf com elevado teor de Fe_2O_3 . Revelou também que essa distribuição muda para porfírica, compondo pequenas zonas adensadas, nos horizontes superficiais, principalmente dos solos com cana-de-açúcar, destacando-se os perfis 1A (soja/cana fertirrigada) e 2A (pasto/cana fertirrigada), associadas a blocos pequenos a médios, o que é compatível com processo de compactação, conforme observado por Silva *et al.* (1998) e por Soares *et al.* (2005a). Nesses perfis, a compactação foi interpretada como moderada devido à descontinuidade dessas zonas compactadas.

A figura 49 ilustra as distribuições relativas, a porosidade e as feições de preenchimento observadas nos diferentes perfis.

Figura 49: Fotomicrografias das lâminas delgadas dos horizontes representativos dos perfis de LVdf. Note-se que a fração sólida corresponde à cor escura e os poros à clara (esbranquiçada).



Já nos perfis 2B (pasto/cana não fertirrigada) e 1B (soja/cana não fertirrigada) a estrutura porfirica predomina, sendo mais contínua nos horizontes superficiais A e AB, indicando forte compactação superficial. O perfil 7C não apresenta sinais de compactação, como esperado (figura 49). Tais tipos de estruturas são denominadas por Bullock *et al.* (1985) como estruturas complexas (enáulicas) e estruturas em blocos subangulares (porfirica).

Em síntese, as modificações na microestrutura dos solos afetaram principalmente os horizontes superficiais, corroborando observações de campo, dados analíticos e ensaios de resistência dos perfis estudados. Neles os efeitos de compressão direta do maquinário pesado são os responsáveis, portanto, pela redução da porosidade e sua mudança de intergranular para fissurada, bem como pela mudança nesses mesmos horizontes da distribuição relativa enáulica (microagregada) para a porfírica, embora na maior parte dos perfis ainda descontínua, exceto no 2B, como também observado por outros autores, como por exemplo Kertzman (1996) e Silva *et al.* (1998).

4.2 Indicadores macro e micromorfológicos de qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico

- **Caracterização morfológica do LVd**

O quadro 07 apresenta as características morfológicas dos perfis de LVd em que se pode constatar de um modo geral, certa homogeneidade em relação à macroestrutura desses solos, considerando desde os perfis com cana-de-açúcar até o perfil de referência, corroborando, como dito anteriormente, às características dos LVd (EMBRAPA, 2006). Predomina a estrutura em blocos angulares pequenos que se desfazem em granular pequena a muito pequena em todos os horizontes dos perfis atualmente com cana-de-açúcar, a saber 3B (soja/cana), 4B (pasto/cana) e 5B (pasto/soja/cana), exceto os horizontes A destes, que apresentaram blocos subangulares médios, e mesmo no perfil controle 8C (vegetação).

Ainda no quadro 07, a consistência seca se apresentou-se dura, de modo relativamente constante em profundidade e ao longo dos perfis com cana-de-açúcar, com exceção do horizonte A dos perfis 3B (soja/cana) e 4B (pasto/cana) onde é solta e do perfil 5B (pasto/soja/cana) que passa a ligeiramente dura em profundidade. O perfil 8C (vegetação) apresentou consistência seca solta no horizonte A, ligeiramente dura nos horizontes AB, BA e Bw1 e macia no horizonte Bw2, comportando-se como uma massa de solo fracamente coerente que se desfaz em granular pequena. A consistência úmida destes solos de apresentou firme nos horizontes AB de todos os perfis, no A do perfil 5B e no BA do perfil 4B, todos com cana-de-açúcar. Nos demais horizontes de todos os perfis a consistência úmida é friável, revelando que a dureza é plenamente reversível. Em relação à consistência molhada, esta se apresentou no geral ligeiramente plástica e pegajosa em todos os horizontes de todos os perfis,

sendo pegajosa nos horizontes AB e BA do perfil 3B, não plástica e não pegajosa no horizonte BA do perfil 5B, e plástica no horizonte A do perfil 8C.

Quadro 07: Atributos morfológicos do Latossolo Vermelho distrófico.

Horizonte cm	Estrutura	Consistência			Transição
		seco	úmido	molhado	
PERFIL 3B – soja/cana não fertirrigada					
A 0 – 30	Blocos subangulares pequenos	S	FR	LPL, LPE	D, O
AB 30 – 70	Blocos subangulares pequenos	D	FI	LPL, PE	D, P
BA 70 – 97	Blocos subangulares pequenos	D	FR	LPL, PE	C, P
Bw1 97 -118	Blocos subangulares pequenos	D	FR	LPL, LPE	C, P
Bw2 118 – 150+	Blocos subangulares pequenos	D	FR	LPL, LPE	
PERFIL 4B – pasto/cana não fertirrigada					
A 0 - 20	Blocos subangulares médios	S	FR	LPL, LPE	G, O
AB 20 – 44	Blocos subangulares pequenos	MD	FI	LPL, LPE	C, O
BA 44 – 72	Blocos subangulares pequenos	D	FI	LPL, LPE	C, P
Bw1 72 -119	Blocos subangulares pequenos	D	FR	LPL, LPE	C, P
Bw2 119 – 150+	Blocos subangulares pequenos	D	FR	LPL, LPE	
PERFIL 5B – sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada					
A 0 – 29	Blocos subangulares médios	D	FI	LPL, LPE	C, O
AB 29 – 56	Blocos subangulares pequenos	MD	FI	LPL, LPE	C, O
BA 56 – 73	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	NPL, NPE	C, P
Bw1 73 -97	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	LPL, LPE	C, P
Bw2 97 – 150+	Granular pequena	LD	FR	LPL, LPE	
PERFIL 8B – vegetação natural					
A 0 – 13	Blocos subangulares pequenos	S	FR	PL, LPE	C, P
AB 13 – 41	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	LPL, LPE	C, P
BA 41 – 60	Blocos subangulares pequenos	LD	FR	LPL, LPE	A, P
Bw1 60 -88	Blocos angulares pequenos	LD	FR	LPL, NPE	C, P
Bw2 88 – 150+	Blocos angulares pequenos	M	FR	LPL, LPE	

Consistência seca: S = solta, M = macia, LD = ligeiramente dura, MD=dura, M=muito dura; Consistência úmida: FR = friável, FI = firme; Consistência molhada: NPL = não plástica, LPA = ligeiramente plástica, PL = plástica; NPE = não pegajosa; LPE = ligeiramente pegajosa, PE = pegajosa; Transição: A = abrupta, C = clara, G = gradual, D = difusa; P = plana; O = ondulada.

A consistência seca dura a muito dura seria indicadora de compactação dos perfis 3B (exceto no horizonte A), 4B e 5B (apenas nos horizontes A e AB). Neste último, em profundidade e mesmo no 8C predomina a consistência ligeiramente dura. Contudo, o fato de se mostrar friável em todos os perfis, exceto nos horizontes AB dos perfis 3B, 4B e 5B onde é firme, aponta na direção de não compactação, exceto nestes últimos horizontes citados, os quais se apresentariam compactados.

Importante lembrar que estes solos passaram por processo de preparo mecânico igual ao LVdf, que envolveu subsolagem, grade pesada e grade leve, o que teriam reduzido ou eliminado o efeito dos usos e manejos anteriores (DIAS JÚNIOR, 2000). No entanto, este

preparo ocorreu no ano de 2006, após o que já foram realizadas três colheitas mecanizadas (junho/ 2008, maio/ 2009 e maio/2010), como no LVdf, o que permite supor que a colheita mecanizada poderia ser a provável causa da mudança estrutural destes solos, conforme observado também por Casagrande (2002).

- **Atributos físico/hídricos e teor de matéria orgânica do LVd**

A tabela 20 apresenta os resultados analíticos obtidos para os perfis do LVd. Os dados revelam diferenciação textural entre os horizontes superficiais e subsuperficiais, pois que nos superficiais A, AB e BA a textura é franco-argilo-arenosa e nos horizontes Bw1 e Bw2 é argilo-arenosa, exceto nos horizontes Bw do perfil 3B, de textura franco-argilo-arenosa em todo o perfil. Esse aumento da fração argila nos horizontes subsuperficiais é esperado para solo de textura média como o LVd (EMBRAPA, 2006). A redução da fração argila nos horizontes superficiais A e AB de todos os perfis, inclusive para o perfil 8C, considerado de referência é acompanhada pelo aumento dos valores de ADA, o que é próprio desse tipo de solo, e não necessariamente decorrente do manejo, dado que o 8C também apresenta o mesmo comportamento.

Tabela 20: Atributos físicos e teor de matéria orgânica do Latossolo Vermelho distrófico.

Horizonte cm	Textura g Kg ⁻¹			Classe textural	ADA %	GF %	Densidade		PT %	MO g dm ⁻³
	Areia	Silte	Argila				Solo g dm ⁻³	Part. g dm ⁻³		
PERFIL 3B – soja/cana não fertirrigada										
A 0 – 30	640	80	280	Franco argilo arenoso	12	60	1,69	2,46	31	17
AB 30 – 70	620	80	300	Franco argilo arenoso	12	65	1,51	2,20	32	9
BA 70 – 97	570	90	340	Franco argilo arenoso	0	100	1,52	2,60	41	6
Bw1 97 -118	570	90	340	Franco argilo arenoso	2	94	1,43	2,56	44	3
Bw2 118 – 150+	570	90	340	Franco argilo arenoso	0	100	1,43	2,67	46	2
PERFIL 4B – pasto/cana não fertirrigada										
A 0 – 20	590	90	320	Franco argilo arenoso	8	78	1,64	2,38	31	10
AB 20 – 44	580	90	330	Franco argilo arenoso	4	89	1,53	2,45	37	8
BA 44 – 72	570	90	340	Franco argilo arenoso	0	100	1,44	2,49	42	6
Bw1 72 -119	560	80	360	Argilo arenoso	0	100	1,30	2,55	49	3
Bw2 119 – 150+	540	90	370	Argilo arenoso	0	100	1,40	2,57	45	3
PERFIL 5B – sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada										
A 0 – 29	570	90	340	Franco argilo arenoso	10	76	1,83	2,55	28	14
AB 29 – 56	570	90	340	Franco argilo arenoso	12	67	1,42	2,39	40	9
BA 56 – 73	550	100	350	Franco argilo arenoso	2	95	1,46	2,50	41	6
Bw1 73 -97	540	90	370	Argilo arenoso	0	100	1,28	2,53	49	3
Bw2 97 – 150+	540	90	370	Argilo arenoso	0	100	1,37	2,55	46	2
PERFIL 8C – vegetação natural										
A 0 – 13	570	90	340	Franco argilo arenoso	10	72	1,63	2,31	30	18
AB 13 – 41	570	80	350	Franco argilo arenoso	10	76	1,49	2,35	37	10
BA 41 – 60	550	100	350	Franco argilo arenoso	0	100	1,47	2,42	39	6
Bw1 60 -88	540	90	370	Argilo arenoso	2	95	1,53	2,48	38	3
Bw2 88 – 150+	540	90	370	Argilo arenoso	4	91	1,53	2,55	40	3

ADA = argila dispersa em água; GF = grau de floculação; PT = porosidade total; MO = matéria orgânica.

Foram observados valores elevados de DS para todos os horizontes A de todos os perfis ($> 1,63$), sendo que no perfil 5B (sucessão pasto/soja/cana) chega a $1,83 \text{ g cm}^{-3}$ no horizonte A, considerado como valor crítico. Valores de DS entre $1,40$ a $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ nos solos de textura média como os observados (tabela 20) são atribuídos frequentemente a algum grau de compactação (REICHERT *et al.*, 2003). Paralelamente, os valores de GF se apresentaram menores nos horizontes superficiais, indicando possível instabilidade estrutural nesses horizontes.

Em relação à PT ocorre aumento em profundidade em todos os perfis, como esperado, sendo que no perfil 8C (vegetação natural), nota-se maior homogeneidade entre os valores. Nos horizontes superficiais A dos perfis 3B (soja/cana), 4B (pasto/cana) e 5B (pasto/soja/cana) observa-se valores próximos a 30% de PT. Não foi observada uma redução acentuada na PT dos perfis cultivados em relação ao perfil referência, o que faz supor que a relação entre macro e microporos é que pode estar sendo alterada, como é típico de horizontes compactados (DIAS JÚNIOR, 2000).

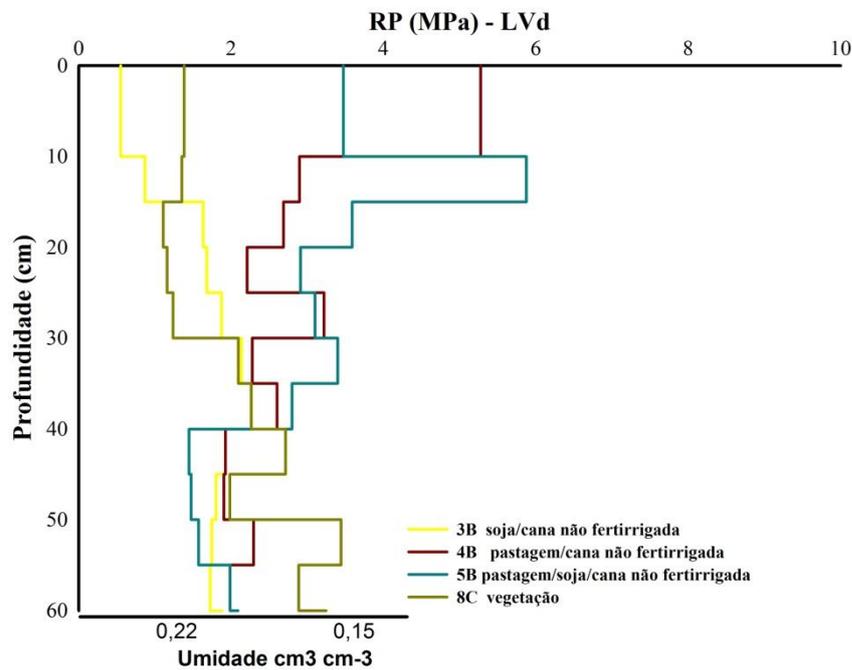
Os valores de MO mais elevados estão nos horizontes A e AB, decrescendo em direção aos Bw, característica comum destes solos, como ocorre aqui em todos os perfis. Porém observa-se que neles os valores são menores do que no perfil de referência 8C. Os menores valores de MO são encontrados nos horizontes A e AB do perfil 4B (10 g cm^{-3}). Observa-se, portanto, redução nos valores de MO dos solos cultivados, ainda que estes ocorram em manejo sob cultivo em resíduos de palhada da cana-de-açúcar, o qual tende a preservar a MO nos horizontes superficiais, mas, deve-se lembrar que se trata do primeiro ciclo e no 4º corte da cana. Por outro lado, corrigindo-se esses valores para o C Orgânico pode-se concluir que os teores não são elevados. Importante ressaltar que esses perfis não são fertirrigados com vinhaça, logo os teores mais elevados de MO nos horizontes superficiais pode estar relacionado com o manejo na palhada.

Em síntese, os atributos físicos e de MO apresentam evidências de degradação dos solos, marcados pelos valores elevados de ADA em contraposição a valores reduzidos de GF, nos horizontes superficiais A e AB do solo. É sabido que a dispersão de argila pode acarretar sua eluviação e migração (translocação) para os horizontes inferiores dos solos, levando ao encrostamento superficial por adensamento. O aumento da DS nos horizontes superficiais A e AB do perfil 4B (pasto/cana) e 5B (pasto/soja/cana) sugerem isso. Apenas para o horizonte A de todos os perfis foi observada baixa PT, indicativa de restrições à infiltração de água, raízes e de trocas de calor e de gases com a atmosfera.

- **Resistência mecânica à penetração do LVd**

A figura 50 mostra os valores de RP registrados para os perfis de LVd em estação úmida. Os resultados indicam que os perfis 4B (pasto/cana) e 5B (pasto/soja/cana) apresentaram as maiores resistências, com valores próximos a 6 MPa, considerados limitantes à penetração de raízes, variando em profundidade entre 0 e 10 cm para o 4B e de 10 e 15 cm para o 5B (SILVA *et al.*, 2011).

Figura 50: Valores de RP em profundidade nos Latossolo Vermelho distróficos.

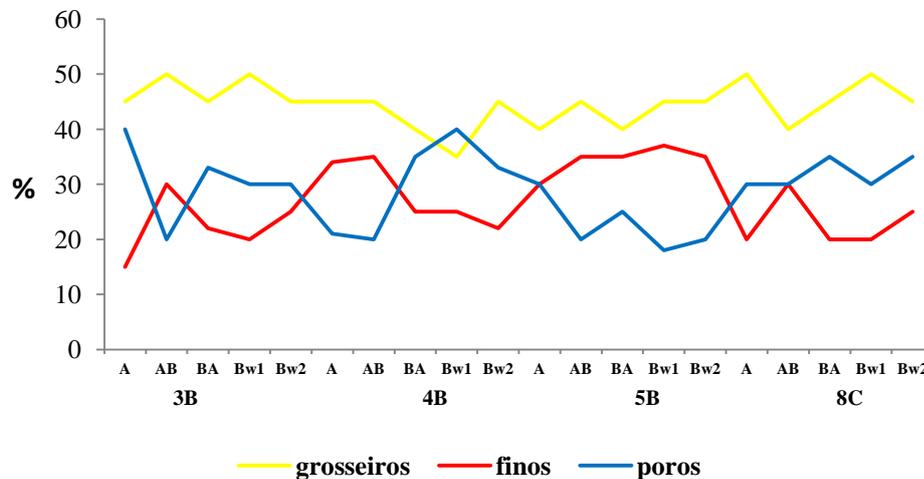


Os valores de RP variam em relação à umidade, o conteúdo de MO e de argila e à DS, entretanto, valores maiores do que 2,5 a 3MPa são, em geral, considerados indicadores de compactação. Assim, os perfis 3B (soja/cana) e 8C (vegetação) não apresentaram valores de RP que evidenciem compactação, ao contrário dos demais (4B e 5B) que apresentam resistência até cerca de 30 cm, profundidade compatível com o efeito oriundo de máquinas pesadas utilizadas nos tratos agrícolas, sobretudo na colheita mecanizada como já exposto. Tal potencial de compactação ocorre mesmo se tratando de solos de textura média, como é o caso, uma vez que estes apresentam maior capacidade de suporte de carga, em razão das frações grosseiras que podem aumentar as forças de atrito e assim dissipar a energia (VAZ *et al.*, 2002; ROQUE *et al.*, 2010).

- **Caracterização micromorfológica do LVd**

A figura 51 apresenta o balanço dos constituintes da matriz do solo com base na observação microscópica de amostras em lâminas delgadas. A matriz dos LVd é composta no geral por um teor de material grosseiro maior do que de material fino, com comportamento das curvas relativamente paralelo. Em solos de textura média, a fração grosseira é constituída por grãos de quartzo de tamanho médio a pequeno, e raramente, por nódulos de ferro, como é típico dessa classe de solos (EMBRAPA, 2006). O material fino apresenta menores teores no horizonte A dos perfis 3B (soja/cana) e 8C (vegetação) de cerca de 15 a 20%, e aumenta nos horizontes AB chegando a 30%, voltando a reduzir no BA e Bw1 para 20% e a aumentar ligeiramente no Bw2, para 25%. Os perfis 4B (pasto/cana) e 5B (pato/soja/cana) apresentam os valores mais elevados de material fino nos horizontes A e AB (~35%) que permanecem constantes nos demais horizontes do perfil, porem reduzem nos horizontes BA e Bw1 do perfil 4B (20%) com aumento no Bw2 (30%).

Figura 51: Distribuição dos componentes do fundo matricial das lâminas delgadas dos perfis de LVd.

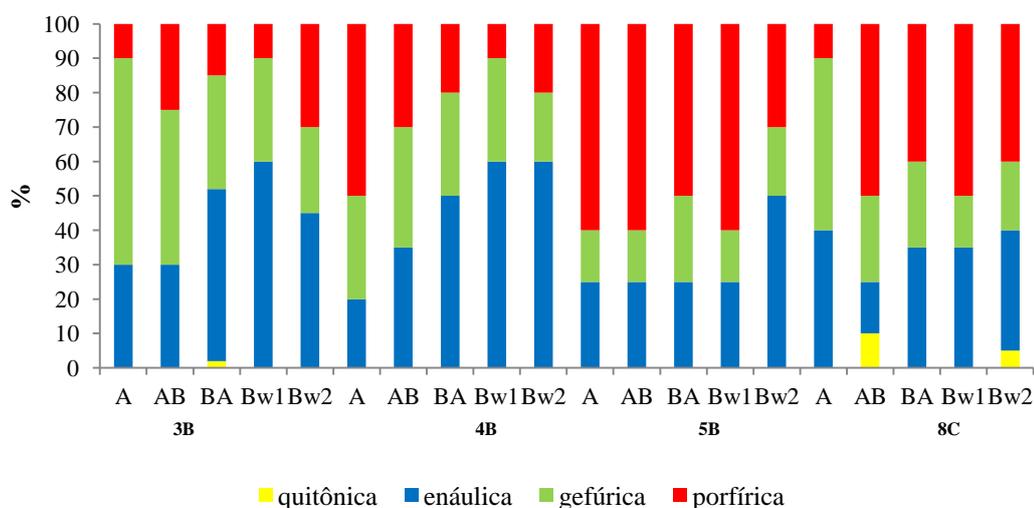


Segundo a mesma figura, os poros apresentam percentuais de concentração elevados no horizonte A do perfil 3B (~40%), que reduzem no AB (20%) e voltam a crescer se nos demais horizontes. O perfil 4B também apresenta porosidade reduzida nos horizontes A e AB, cerca de 20%, aumentando nos demais horizontes, chegando a 45% de poros no horizonte Bw1. O perfil 5B apresenta cerca de 30% de porosidade no horizonte A, reduzida para 20% no AB, 25% no BA e 20% nos Bw. O perfil 8C com vegetação apresenta porosidade variando

em torno de 30 a 35%, sendo relativamente homogênea em todos os horizontes. Assim, as variações encontradas nos demais perfis podem estar associadas ao manejo.

A figura 52 mostra a distribuição relativa entre as frações fina e grosseira dos solos LVd. Tal distribuição, diferentemente do LVdf, se apresenta com três tipos distintos, sendo: enáulica (microagregada), gefúrica (pontes ligando grãos grosseiros) e porfírica (grosseiros cimentados por finos), além de rara distribuição quitônica (películas de finos envolvendo os grosseiros). Nos perfis 3B (soja/cana) e 4B (pasto/cana) predominam a distribuição do tipo enáulica e gefúrica, e secundariamente, nas zonas adensadas, predomina a distribuição porfírica, embora menos representativa no perfil 3B (<20%) em comparação ao 4B, onde representam 50% do horizonte A e 30% no horizonte AB. No perfil 5B (pasto/soja/cana) observa-se o predomínio (60%) da distribuição porfírica nos horizontes A, AB, BA e até no Bw1.

Figura 52: Distribuição relativa dos horizontes do LVd.



A distribuição porfírica, sobretudo quando ocorre nos horizontes superficiais acima de horizontes enáulicos, costuma ser considerada indicadora de horizonte compactado, conforme observado por Silva *et al.* (1998) e por Soares *et al.* (2005a), dentre outros. Corrobora essa interpretação o fato dela ocorrer nos horizontes superficiais. O perfil 8C (vegetação) apresenta distribuição relativa gefúrica, enáulica e porfírica bem distribuídas entre si. Pontualmente, observou-se distribuição relativa quitônica nos horizontes AB e Bw2, estas em pequena proporção (<8%). A figura 52 e a tabela 21 permitem observar ainda que é possível distinguir três conjuntos de comportamento quanto à distribuição relativa nos perfil.

Tabela 21: Caracterização micromorfológicos do Latossolo Vermelho distrófico.

Horiz cm	Microestrutura/pedalidade	Porosidade (dominante)	Feições
PERFIL 3B- soja/cana não fertirrigada			
A 0 - 30	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregados, fina; cavidades e canais mm	Nódulos de Fe mm (1); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (21)
AB 30 - 70	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; cavidades e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (20)
BA 70 - 97	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Intergrãos e interagregados, fina a muito fina; cavidades e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (35)
Bw1 97 - 118	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Intergrãos e interagregados, fina a muito fina; cavidades mm	Nódulos de carvão mm (1); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (33)
Bw2 118 - 150+	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Intergrãos e interagregados, fina a muito fina; cavidades e canais mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (30); Excrementos mm (1)
PERFIL 4B - pasto/cana não fertirrigada			
A 0 - 20	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregados, fina a muito fina; canais e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (20)
AB 20 - 44	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; canais e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (28)
BA 44 - 72	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; canais e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (35)
Bw1 72 - 119	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; canais e câmaras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (36)
Bw2 119 - 150+	Blocos subangulares mm, forte a moderada	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; cavidades mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (40)
PERFIL 5B – sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada			
A 0 - 29	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; cavidades, e fissuras mm	Nódulos de carvão mm (2); Canais preenchidos com material do próprio horizonte (20)
AB 29 - 56	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; cavidades e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (23)
BA 56 - 73	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; cavidades e canais mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (23); Excrementos mm (1)
Bw1 73 - 97	Blocos subarredondados mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; cavidades e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (26)
Bw2 97 - 150+	Blocos subarredondados mm, forte a moderada	Intergrãos e interagregada, fina a muito fina; cavidades mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (30)
PERFIL 8C – vegetação natural			
A 0 - 13	Blocos subarredondados e grumos mm, moderada	Intergrãos e interagregados média a fina, cavidades e canais mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (17)
AB 13 - 41	Blocos subarredondados e grumos mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregados média a fina, cavidades, canais e fissuras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (20)
BA 41 - 60	Blocos subarredondados e grumos mm, moderada a fraca	Intergrãos, interagregados, média a fina; cavidades e canais mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (23)
Bw1 60 - 88	Blocos subarredondados e grumos mm, moderada a fraca	Intergrãos e interagregados, média a fina; canais e câmaras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (30)
Bw2 88 - 150+	Blocos subarredondados e grumos mm, moderada a fraca	Intergrãos, interagregados, média a fina; cavidades e câmaras mm	Canais preenchidos com material do próprio horizonte (60)

Primeiro o comportamento dos perfis 3B (soja/cana) e 4B (pasto/cana) que apresentam os horizontes A e AB com estrutura gefúrica associada à porfírica, mais evidente

no horizonte A do perfil 4B, relativa a uma fraca compactação. Segundo, o relativo ao perfil 5B (pasto/soja/cana) que apresenta predomínio de distribuição porfírica, nesse caso, relacionado a processos mais intenso de compactação (KERTZMAN, 1996; CASTRO *et al.*, 2003). Por fim, o perfil 8C (vegetação) que apresenta estrutura em blocos subarredondados e grumos pequenos, com pedalidade moderada, associada à distribuição relativa enáulica-gefúrica, dominante em todos os horizontes, associada a pequenas zonas porfíricas adensadas, porém não compactado. Este perfil apresenta porosidade dominante intergrãos e interagregados médios a finos, associado a inúmeras cavidades milimétricas, indicativas de boa atividade biológica em todo o perfil (tabela 21).

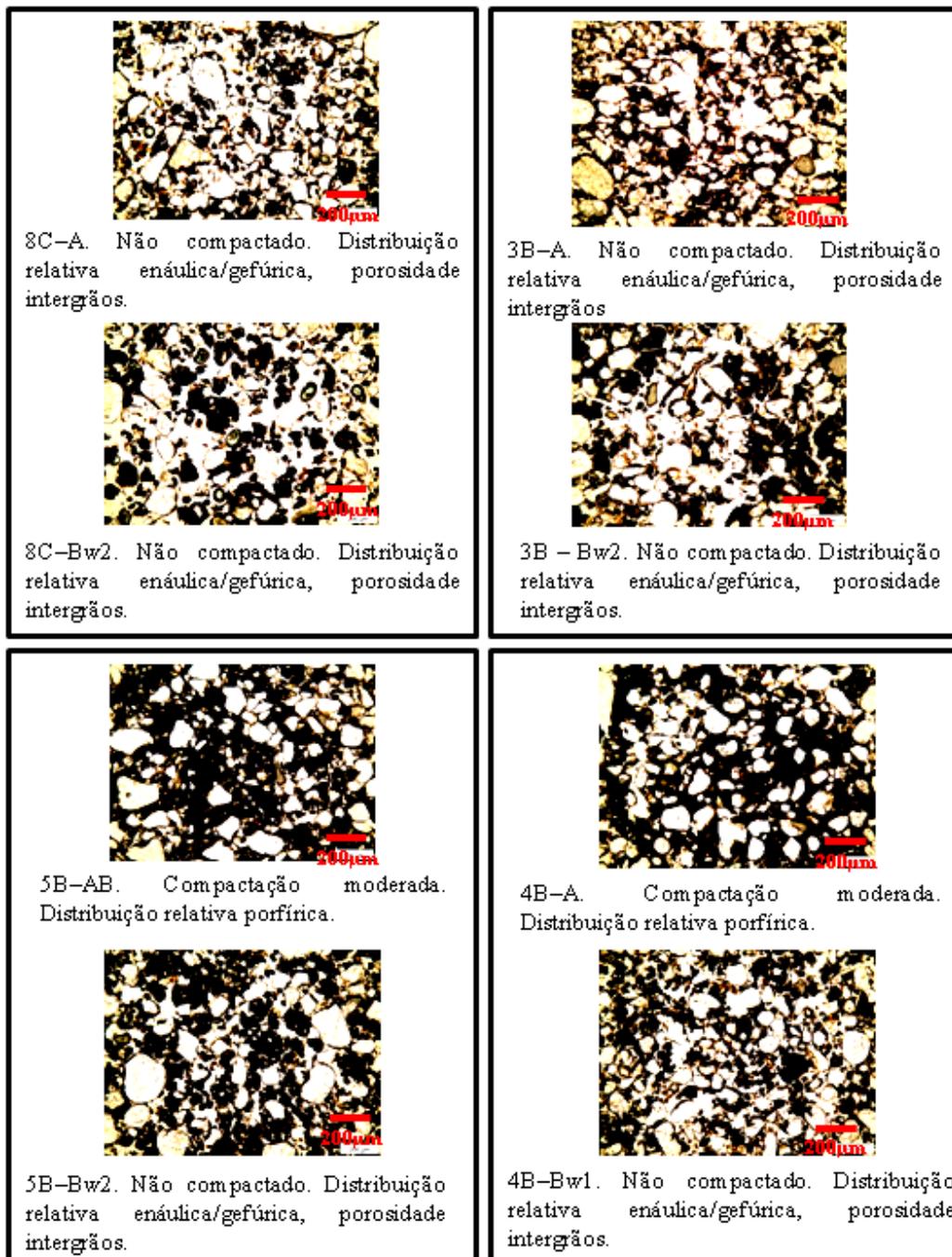
Nos horizontes BA do perfil 3B (soja/cana) e 4B (pasto/cana) e nos Bw de todos os perfis com cana-de-açúcar predominam as distribuições enáulicas e gefúricas, relacionadas à microestrutura em blocos subarredondados pequenos de pedalidade forte a moderada. Na distribuição enáulica/gefúrica o material fino se encontra total ou parcialmente dissociado da fração grosseira, que é quartzosa fina. Mas, nas zonas adensadas porfíricas, as quais se encontram predominantemente nos horizontes A e AB do perfil 4B e nos horizontes A, AB, BA e Bw1 do perfil 5B (pasto/soja/cana), a fração grosseira está cimentada pelos finos isotrópicos (tabela 21).

A distribuição enáulica é padrão em Latossolos, sobretudo argilosos e ricos em ferro e, ou alumínio e indica boa evolução geoquímica e pedogenética do tipo ferralítica. As distribuições gefúrica e quitônica costumam ser herdadas da rocha matriz ou resultar de processos de eluviação e perda de finos, sobretudo em horizontes superficiais, como lembram Castro *et al.* (2003). Já a distribuição porfírica ocorre comumente em solos de textura média, com baixo teor de ferro, alumínio ou matéria orgânica, e em horizontes saprolíticos, podendo ser herdada da rocha matriz, ou provocada por compactação ou adensamento.

Soares *et al.* (2005b) observaram características similares nos LV por eles estudados, que se iniciam com a formação de películas finas de argila dispersa envolvendo grãos de quartzo e preenchendo os espaços vazios unindo os grãos aos microagregados. Nesse caso, o cultivo intenso da cana-de-açúcar modificou a estrutura da camada superior do perfil, causando dispersão e eluviação da argila e conseqüentemente sua degradação por compactação. O perfil 8C, de referência, ao contrário, apresenta uma distribuição constante ao longo de todos os horizontes, onde a atividade biológica (flora e fauna), evidenciadas pela presença intensa de feições de preenchimento, com diferentes graus indicam que estes solos estão biologicamente trabalhados, não caracterizando, horizontes compactados.

A figura 53 ilustra os resultados apresentados para os horizontes superficiais A e AB e subsuperficiais Bw1 e Bw2, em que o perfil 5B foi interpretado como de compactação moderada, pela redução da porosidade e formação de zonas adensadas de distribuição porfírica e os perfis 3B e 4B, de compactação fraca, por apresentar tais características, porém, em menor frequência e mais descontínuas.

Figura 53: Fotomicrografias das lâminas delgadas dos horizontes representativos dos perfis de LVd. Note-se que a fração sólida corresponde à cor escura e os poros à clara (esbranquiçada).



Em síntese, as modificações observadas referem-se formação de zonas compactadas que afetaram principalmente os horizontes superiores dos perfis de solos (A e AB), sobretudo do perfil 5B (sucessão pasto/soja/cana) e foram associadas ao efeito do maquinário que reduz a porosidade visível nas lâminas e instabiliza a estrutura dos solos, características corroboradas pelos demais dados relativos à morfologia dos solos em campo, aos valores de ADA, DS, consistência, sobretudo seca, e os ensaios de RP. Os dados observados para os perfis cultivados com cana-de-açúcar, no entanto, quando comparados com os relativos ao perfil de controle (8C) não evidenciam grandes diferenças, o que remete ao fato de que a área de vegetação não estava plenamente preservada de interferências antrópicas.

Conclusões

Os indicadores macro e micromorfológicos de qualidade física dos solos foram considerados satisfatórios, por permitirem constatar diferentes graus de compactação. Dentre os indicadores macromorfológicos os que melhor ilustraram o processo foram a estrutura, a consistência seca, DS e RP. Em relação aos indicadores micromorfológicos os considerados mais eficazes foram a distribuição relativa, em que as tramas porfíricas evidenciaram processos de compactação dos solos, paralelamente às enáulicas (microagregadas) que indicaram a não compactação, as quais são típicas dos horizontes diagnósticos Bw dos Latossolos bem desenvolvidos. As distribuições relativas gefúricas e quitônica indicam transições.

Os Latossolos Vermelho distroféricos, ainda que tenham apresentado maiores evidências de compactação, em suas áreas relativas ao manejo fertirrigado com vinhaça apresentaram melhor qualidade física dos solos, indicada pelos menores valores de DS e RP, assim como melhor preservação da macro e da microestrutura dos solos. Considera-se que a fertirrigação, ainda que não tenha aumentado o teor de MO, devido à uma única aplicação realizada até o momento, já apresenta evidências de benefício estrutural dos solos, com aumento na macroporosidade, fato relacionado possivelmente ao maior poder de agregação e à atividade da microbiota dos solos.

Os Latossolos Vermelho distróficos por sua vez apresentaram evidências de instabilidade estrutural, compatíveis com compactação moderada, as quais foram observadas através principalmente dos parâmetros dispersão de argila e da distribuição relativa da estrutura em microescala. Nestes solos não foi realizado a fertirrigação com vinhaça o que impossibilitou a análise de recuperação da estrutura.

Todos os perfis cultivados apresentaram alguma mudança estrutural com ênfase na compactação a qual foi atribuída ao manejo fortemente tecnificado da cana-de-açúcar com uso de maquinário pesado em todas as fases do processo agrícola. Considerando-se que todos os solos, exceto os relativos aos perfis de referência (7C e 8C), receberam o mesmo preparo mecânico descompactante, a maior compactação superficial foi observada no perfil 2B do LVdf (pasto/cana não fertirrigado) quando comparado aos perfis antes cultivados com soja, pasto ou sucessão de ambos, justifica-se pelo preparo ter sido realizado em período úmido.

CAPITULO 5

SÍNTESE MULTIESCALAR E MULTICRITERIAL COMPARADA DOS RESULTADOS

A análise multitemporal do uso e ocupação das terras da MRQ, com base na interpretação de imagens de satélite, possibilitou avaliar a substituição de usos antes consolidados como grãos e pastos, do setor grãos/carne, e sua dinâmica na reconfiguração da paisagem, induzidas pela inserção e expansão acelerada de áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Tal processo, favorecido no país pela consolidação do Plano Nacional de Agroenergia (BRASIL, 2006), se materializou nesta microrregião em dois momentos distintos. O primeiro, entre 2004 e 2006, com substituição de áreas de soja por cana-de-açúcar, com 0,36% (5.790 ha) de área plantada. O segundo entre 2006 e 2008 e se efetiva a partir de 2010, quando a conversão de uso dominante passa a ser da pastagem pela cana-de-açúcar, sendo relativa a 51,17% (25.915 ha) representando a maior área, ainda que a expansão ocorra fortemente em áreas de cultura anual, passando a 37,38% (18.921 ha) do total da microrregião, com um incremento de 13.189 ha.

Atualmente a expansão ocorre quase que exclusivamente em áreas de pastagem, induzida pela instalação de novas usinas, rumo a oeste e noroeste da MRQ. Em termos espaciais em um primeiro momento, a cana-de-açúcar ocupou os municípios de Quirinópolis e Gouvelândia, para em seguida se dirigiu (e ainda se dirige) rumo a oeste nos municípios de Lagoa Santa, Cachoeira Alta, São Simão e Itarumã, devido a instalação de novas usinas (MAPA, 2010), como mostram as imagens do ano de 2010. Observou-se também que a maior parte das substituições vem ocorrendo sobre áreas de pastagem, o que já representa 33,01% (38.280 ha) da área MRQ, ainda que a substituição de cultura de grãos continue ocorrendo (23,31% ou 27.040 ha). Tal incremento de áreas envolveu mais municípios da MRQ, onde três novas usinas encontram-se em instalação em Caçu (Usina Rio Claro, registrada), usinas Rio Doce I, situada em Cachoeira Alta, Rio Doce II, situada em Caçu e Usina Complexo Bioenergético, situada na divisa entre Caçu e Itarumã (MAPA, 2010).

Três tipos de sucessão de uso antecederam a inserção da cana-de-açúcar e acompanharam esses momentos de expansão: no primeiro momento a sucessão foi predominantemente da cultura da soja pela cana-de-açúcar; e no segundo momento passa a ser

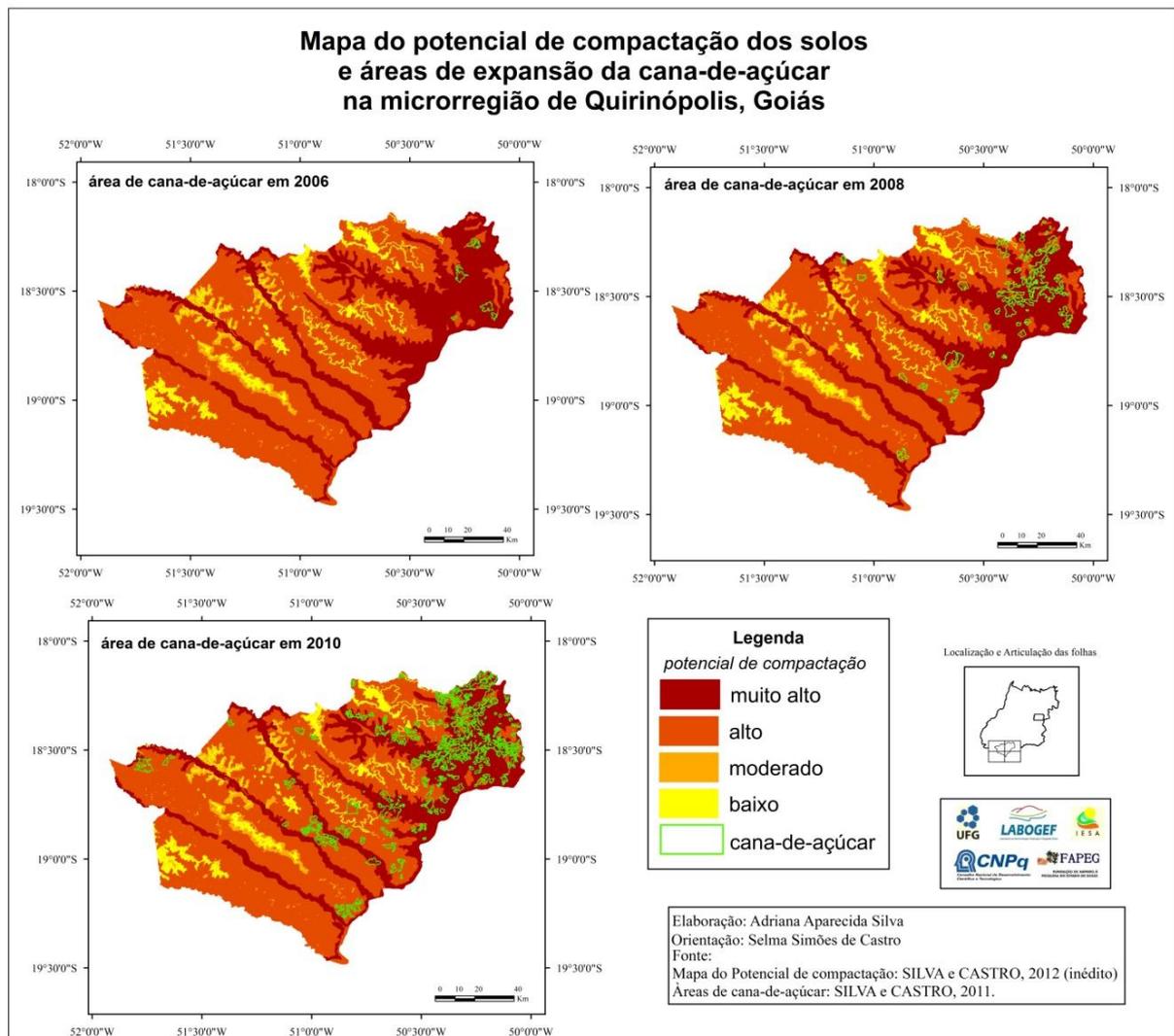
da pastagem para a cana-de-açúcar, concomitante com a sucessão pasto/soja/cana. Esta última se deu como consequência da conversão do uso para cultivo da cana-de-açúcar, onde as áreas de soja foram deslocadas para áreas de pastagem, caracterizando um novo tipo de substituição de cultura, pasto/soja antes do plantio da cana, onde os solos estavam mais degradados como forma de preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar. Tais dinâmicas podem ser explicadas em termos de investimentos no controle de impactos, no caso de compactação de solos, dado que as terras da MRQ apresentavam potencial de compactação, além disso, é fato que as usinas estavam em construção, captando recursos financeiros dos grupos empreendedores, e por isso iniciaram o processo produtivo nos melhores solos.

Assim, a substituição de culturas ocorre na MRQ a partir de 2004, com primeira safra colhida em 2007, e deu-se em áreas que se encontravam em melhores condições, uma vez que a *commodity* soja era cultivada em solos de elevada aptidão agrícola (BORGES, 2011), em rotação com milho e favorecendo um bom preparo e manutenção da fertilidade e da conservação do solo, ainda que apresentando potencial natural de compactação muito alto. Na sequência, em 2008 a cana-de-açúcar além de continuar se expandindo sobre áreas com potencial muito alto de compactação (59,2% das áreas de expansão), também se expande sobre áreas com potencial alto (40% das áreas de expansão), destinadas tanto ao cultivo de grãos como de pastagem. Tal cenário se mantém no ano de 2010, com maior expansão em áreas de muito alto potencial de compactação (51,7%) e secundariamente relativas a alto potencial de compactação (46,5%), ainda que desde 2008 a maior parte das substituições de cultura se refiram a áreas com pastagem extensiva. Considera-se ainda a inserção da cana-de-açúcar em áreas com potencial baixo e moderado com menor relevância em termos de área (tabela 22, figura 54).

Tabela 22: Áreas de cultivo de cana-de-açúcar em relação ao potencial de compactação e ao ano mapeado.

Potencial	2006		2008		2010	
	área em ha	%	área em ha	%	área em ha	%
muito alto	5.790,55	100	29.970,00	59,2	60.000,00	51,7
alto	0,00	0,0	20.269,00	40,0	53.903,00	46,5
moderado	0,00	0,0	0,00	0,0	600,00	0,5
baixo	0,00	0,0	402,00	0,8	1.500,00	1,3
TOTAL	5.790,55	100	50.641,00	100	116.003,00	100

Figura 54: Mapa do potencial de compactação dos solos e sua relação espacial com as áreas de expansão de cultivo de cana-de-açúcar nos anos de 2006, 2008 e 2010.



Em termos pedológicos e processo de expansão da cana-de-açúcar na MRQ ocorreu primeiramente em substituição a áreas de Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), para em um segundo momento, esgotada a oferta dessas áreas mais “nobres”, substituir áreas de pastagem nos Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e outros solos com menor ocorrência na MRQ, além de menor aptidão agrícola. O problema é que devido às características desses melhores solos, homogêneos, argilosos a argilo-arenosos, geralmente, associados a relevos planos ou suave ondulados, estes apresentam elevado potencial de compactação.

Considerando a relação entre o potencial de compactação, o uso/capacidade de uso das terras e a discrepância entre estes, consubstanciada no mapa do risco à compactação dos solos da MRQ, pode-se constatar que as áreas com risco muito alto apresentam potencial e

discrepância muito alta, fato que se explica pelo domínio dos solos de textura argilosa e com capacidade de uso relativa a preservação da fauna e flora, porem destinadas ao uso agrícola, em especial ao cultivo altamente tecnificado da cana-de-açúcar. Isso porque, além do potencial natural dos solos, a cana-de-açúcar faz uso de manejo intensivo altamente tecnificado com maquinário pesado no cultivo e na colheita, o que efetivamente altera a estrutura dos solos potencializando a ocorrência de impactos, dentre os quais a compactação dos solos, corroborando resultados semelhantes encontrados na literatura já citada. As áreas com risco alto a compactação associam-se a solos com muito alto a alto potencial à compactação, mas com baixa a alta discrepância entre uso de capacidade de uso.

Avaliando-se os solos preferenciais do processo de expansão da cana-de-açúcar na MRQ, os LVdf (sobretudo no primeiro momento da expansão) e os LVd (no segundo momento), em relação à sua qualidade física, visando caracterizar os efeitos dessa dinâmica sobre solos com elevados riscos à compactação, mudou-se de escala na pesquisa. Foram privilegiados os indicadores relacionados a estrutura e porosidade dos perfis representativos de solos cultivados com cana-de-açúcar, considerando-se os parâmetros macromorfológicos, físico/hídricos e micromorfológicos, com vistas a avaliar a qualidade físicas dos solos, tomando-se o cuidado para selecionar-se também duas áreas de referência com cobertura vegetal natural. Admitiu-se que o preparo inicial dos solos (subsolagem, gradagem pesada, gradagem leve) teria promovido eliminação pelo menos parcial de efeitos dos usos anteriores nos perfis cultivados.

Os atributos morfológicos dos solos LVdf e LVd indicaram que já há um processo de degradação estrutural dos solos devido a compactação. Quanto a estrutura em campo, os LVdf se destacaram por terem apresentado fortes evidências do fenômeno nos horizontes superficiais A, AB e BA, sobretudo no perfil 2B (soja/cana não fertirrigado), onde o grau é alto, marcado pela presença de estrutura laminar nos horizontes A e AB, embora friável quando úmida, o que reduziu o grau de compactação avaliado. Mesmo assim, a consistência seca nesses solos variando entre ligeiramente dura, dura a muito dura em todos os horizontes superficiais dos perfis, tanto dos LVdf como dos LVd, permite destacar os perfis 1B (soja/cana não fertirrigado), 2B (pasto/cana não fertirrigado) e 4B (pasto/cana não fertirrigado) com dois horizontes (A e AB) apresentando consistência muito dura, relativa a compactação dos solos.

O manejo agrícola da cana-de-açúcar, após a primeira colheita, adota o plantio em resíduos da palhada, prática considerada conservacionista de manejo do solo, além da

fertirrigação com uso de vinhaça, subproduto considerado como importante fertilizante para as terras e promotor da agregação da estrutura do solo, o qual, no entanto, tem sua disponibilidade limitada às áreas próximas das usinas. A fertirrigação, além de visar o controle da fertilidade, também tende a mitigar impactos nos solos, dentre estes a compactação que se apresenta como comum em áreas de cana-de-açúcar devido ao manejo altamente tecnificado com maquinaria pesada, em associação às características de solo e da declividade do terreno.

Comparando-se os atributos físicos dos LVdf e LVd relativos a PT e DS, os mesmos também indicam decréscimo da qualidade física dos LVdf relacionada ao manejo não fertirrigado com vinhaça, como nos perfis 2B (pasto/cana não fertirrigada), 1B (soja/cana não fertirrigada) e 6B (sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada) que registraram os maiores aumentos proporcionais nos valores de DS e menores de PT, em relação ao perfil referência 7C (vegetação). Adicionalmente, os LVd apresentaram aumento da dispersão de argila (ADA), associada a maiores valores de DS e redução da PT, claramente nos perfis 5B (sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada) e em menor intensidade no 4B (pasto/cana não fertirrigada).

Os valores de RP encontrados para os LVdf também foram superiores aos encontrados para os LVd, ainda que os primeiros tenha sido obtidos na estação seca, sendo corrigidos são maiores para os LVd do que para os LVdf, o que pode ser explicado pela maior resiliência destes solos fortemente microagregados devido teores altos de Fe_2O_3 , como é o caso (CASTRO *et al.*, 2003). Constatou-se ainda, que as maiores RP se encontram entre 0 e 25 cm, sendo mais representativas entre e 15 e 25 cm nos LVdf, já nos LVd são maiores entre 0 e 10 cm. Para os LVdf as maiores RP se registraram nos perfis 1B (soja/cana não fertirrigado) e 2B (pasto/cana não fertirrigada) e nos LVd nos perfis 4B (pasto/cana não fertirrigada) e 5B (pasto/soja/cana não fertirrigada), o que permite supor que se trata de compactação na parte superior dos perfis e que não há diferença substancial em relação ao uso anterior, mas o fator comum a todos é que não são fertirrigados e que foram submetidos à tráfego de máquinas pesadas em todas as fases do manejo agrícola.

Comparando-se os mesmos indicadores acima entre solos cultivados com cana-de-açúcar e os perfis de referência com vegetação natural, pode-se perceber graus de compactação diferentes nos solos cultivados, como era esperado, indicados pela presença de blocos subangulares e laminares, com consistência seca variando de dura a muito dura, sobretudo nos horizontes A e AB dos perfis 2B, 1B, 1A, 2A, 6B, 5B, 4B e 3B e firme no

estado úmido, corroborando o exposto na literatura. Os maiores valores de DS, os menores de PT e MO e maiores RP encontram-se nos perfis 2B (pasto/cana não fertirrigado) e 1B (soja/cana não fertirrigado) nos LVdf e 5B (pasto/soja/cana não fertirrigado) e 4B (pasto/cana não fertirrigado) nos LVd, logo, os que apresentaram os piores índices de qualidade física dos solos, o quais têm em comum o fato de que nenhum deles é fertirrigado.

Em relação a esse tipo de manejo, fertirrigado com vinhaça, a expectativa é de melhoria na qualidade física dos solos, pelo aumento da agregação e da estabilidade dos agregados, a redução da dispersão de argila e o aumento no grau de flocculação do solo, além de aumento da PT e redução da DS, conforme observado por vários autores. No caso dos LVdf, os únicos atualmente fertirrigados na MRQ, de fato constatou-se uma maior qualidade física. Mesmo assim, estes solos apresentaram alterações na estrutura, na consistência, na dispersão de argila, no grau de flocculação e na RP, indicativas de compactação, mas em menor grau, em relação ao observado em áreas com manejo não fertirrigado. Contudo, há que se levar em consideração os próprios atributos dessa classe de solo, como grau forte da estrutura microagregada (granular pequena a muito pequena) associada aos elevados teores de Fe_2O_3 , que em geral lhe conferem não só maior resistência, mas também maior resiliência (CARVALHO *et al.*, 1982), isto é, são descompactáveis mais facilmente, o que pode ser corroborado ainda pela elevada friabilidade no estado úmido, quando duros a muito duros no estado seco.

Em relação à micromorfologia dos solos foram observados nos horizontes do LVdf distribuições enáulicas sendo convertidas em porfíricas, em virtude do aumento na cimentação do material grosseiro pelo material fino, ocupando inclusive os espaços porosos maiores e indicando rearranjo de partículas, acompanhadas de redução da porosidade total. A distribuição porfírica refere-se a zonas adensadas indicativas de instalação de processo de compactação. Nos perfis 1A (soja/cana fertirrigada), 2A (pasto/cana fertirrigada) e 6B (sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada) a presença de zonas adensadas, principalmente nos horizontes superficiais, é compatível com processo de compactação. Porém, esta foi interpretada como moderada a fraca devido à descontinuidade dessas zonas compactadas porfíricas. Já nos perfis 1B (soja/cana não fertirrigada) e 2B (pasto/cana não fertirrigada) foi considerada como indicativa de forte compactação dos horizontes superficiais dos solos.

Morfologicamente o Latossolo Vermelho apresenta grande homogeneidade vertical, onde o horizonte B latossólico (Bw) se destaca por apresentar estrutura maciça porosa, relativa a uma estrutura granular forte, conhecida como microagregada (KERTZMAN, 1996).

Nesses solos se observam estrutura em blocos pequenos, indicadores micromorfológicos de degradação, relativos à presença de numerosas zonas de distribuição porfírica nos horizontes superficiais, características de compactação, com alterações na forma e no arranjo do espaço poroso, devido redução do tamanho e mudanças na forma dos poros, passando de intergranulares a fissurais finos, associadas aos blocos.

Nos LVd predominam as distribuições enáulicas e gefúricas, que se relacionam à microestrutura em blocos subarredondados pequenos e grumos pequenos de pedalidade forte a moderada, as quais estão associadas à pequenas zonas porfíricas adensadas que se encontram predominantemente nos horizontes A, AB, BA e Bw1 do perfil 5B (sucessão pasto/soja/cana não fertirrigada) e A e AB do perfil 4B (pasto/cana não fertirrigado), considerados de compactação moderada a fraca respectivamente.

Por fim, a compactação observada também foi associada ao manejo fortemente tecnificado da cana-de-açúcar, devido o fato de afetar os primeiros 15 cm. Os indicadores permitiram constatar degradação da estrutura compatível com compactação forte, moderada e fraca nos LVdf e LVd, e até o momento reversível desde que adotado manejo adequado no preparo para o próximo ciclo, pois que se tratar do 1º ciclo e 4º corte da planta cana-de-açúcar nesta microrregião.

Importante lembrar que os perfis de solo avaliados, independentemente do manejo com ou sem fertirrigação com vinhaça, foram preparados para o primeiro plantio de cana-de-açúcar de forma descompactante, logo, os dados reforçam a interpretação de que a compactação observada, a qual reduziu a qualidade física dos solos MRQ, resultam do uso atual com cana-de-açúcar, estando associados ao manejo com tráfego intenso de máquinas no preparo, cultivo e colheita, fatos corroborados por interpretações similares de vários autores.

CONCLUSÕES

1. A expansão recente da cana-de-açúcar na MRQ, posterior a 2004, alterou de forma bastante intensa a configuração da paisagem microrregional, devido às mudanças na forma de uso da terra, caracterizada pela substituição de áreas antes destinadas a culturas anuais (principalmente soja em rotação com milho), e secundariamente para as pastagens; contudo, promoveu também o deslocamento da soja para áreas tradicionais de pastagem extensiva como forma de recuperação do solo degradado;
2. Os Latossolos, largamente dominantes na MRQ, foram os principais solos focados no processo de ocupação com cana-de-açúcar, devido à sua alta aptidão agrícola associada às baixas declividades e boas condições climáticas e de logísticas. Solos de textura argilosa (LVdf) foram escolhidos inicialmente, cultivados então com soja, embora apresentassem muito alto potencial de compactação. Em seguida foram incluídos os solos de textura média (LVd) com uso preponderante de pastagem e relativo a um alto potencial de compactação e degradação da estrutura. Portanto, não parece ter sido o potencial de compactação que definiu a seleção de áreas, mas sim o preparo anterior e a fertilidade dos solos;
3. A avaliação da qualidade física dos solos com uso de abordagem multiescalar no tempo e no espaço, bem como de métodos de análises (da paisagem ao microscópico), se mostrou bastante satisfatória para a compreensão da dinâmica do processo de expansão. A seleção de áreas e perfis amostrais de solo contribuiu para um melhor entendimento do comportamento dos solos, comparando estes no início do processo de degradação pela cana-de-açúcar (primeiro ciclo) com as áreas de vegetação natural;
4. Os indicadores macromorfológicos, micromorfológicos e físicos, dentre os parâmetros escolhidos, revelaram-se eficazes para a demonstração dos diferentes graus de compactação, suas características e causas, destacando-se a macro e microestrutura, a consistência seca e úmida, a densidade do solo, a porosidade total e a distribuição relativa. Nesse sentido, densidades maiores, porosidades totais menores e consistências duras e firmes, associadas a estruturas em blocos e laminares e microestruturas porfíricas acompanhadas de porosidade fissurada fina, foram indicadores essenciais para a identificação de zonas adensadas/compactadas;
5. A compactação foi identificada nos horizontes superficiais de ambos os solos, porém foi mais forte no LVdf do que no LVd. Os perfis com compactação forte foram 2B e 1B; com compactação moderada foram 6B, 5B e 4B; com compactação fraca foram 1A, 2A e 3B; e os

não compactados foram o 7C e o 8C; de um modo geral a compactação forte se associa ao manejo não fertirrigado com vinhaça e a compactação fraca ao manejo fertirrigado com preparo anterior do solo para cultivo de cultura de grãos, já os não compactados estão relacionados ao uso com cobertura vegetal natural preservada;

6. Os usos anteriores não se correlacionaram com o processos de compactação, devido preparo mecânico descompactante adotado, exceto para o perfil 2B do LVdf que o recebeu manejo durante estação úmida. Por outro lado, o manejo fertirrigado observado em perfis de LVdf, associa-se uma melhor qualidade estrutural dos solos (sobretudo da microestrutura), induzindo também menores valores de DS e RP, dando-se o oposto nos perfis não fertirrigados, independentemente do uso anterior, porém esse comportamento pode ser derivado também dos atributos dessa classe de solo, mais resistente e resiliente;

7. Os diferentes graus de compactação constatados nos solos cultivados com cana-de-açúcar na MRQ já são evidentes, embora na maioria moderados, provavelmente devido o fato da cana-de-açúcar se encontrar ainda no 4º corte do primeiro ciclo de cultivo e do LVdf ter recebido apenas uma fertirrigação com vinhaça. Nestas áreas a compactação esta associada ao cultivo altamente tecnificado da cana-de-açúcar, com uso de maquinaria pesada nas várias fases agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALA, K.; CASTRO, S. S. de. Dinâmica do uso do solo da expansão sucroalcooleira na Microrregião Meia Ponte, Estado de Goiás, Brasil. In: Seminário Latino-Americano de Geografia Física, 6. 2010. Anais. Disponível em: [HTTP://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/klaus](http://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/klaus). Acesso em 02 jul. 2010.

AGRITEMPO – Sistema de Monitoramento Agroecológico. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br>> Acesso em 13 mai. 2011.

ANDRADE, J. M. F. de; DINIZ, K. M. **Impactos ambientais da agroindústria da cana-de-açúcar: subsídios para a gestão**. Monografia de Especialização em Gerenciamento ambiental. Escola Superior de Agricultura. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2007.

AZEVEDO, A. C. de; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 609-617, 2004.

BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 2005.

BORGES, V. M. S. **Formação de uma nova centralidade do setor sucroenergético no Cerrado: o caso de Quirinópolis, Estado de Goiás**. 2011. 333 f. Tese (Doutorado) Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

BORGES, V. M. S.; SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. de. Caracterização edafoclimática da microrregião de Quirinópolis/GO para o cultivo da cana-de-açúcar. **Anais... VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia**. Recife, 2010.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011. Brasília: MAPA, 2006

BRAY, S. C.; FERREIRA, E. R.; RUAS, D. G. G. As políticas da agroindústria canavieira e o PROÁLCOOL no Brasil. Marília: Unesp-Marília-Publicações, 2000.

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. New York, USA: Krieger R.E, 1976.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil the section description**. Waine research publications: 1985.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R .F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: 1997.

CANASAT – Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. INPE – Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/canasat/>> Acesso em 17 jan. 2012.

CARDOSO, M.G. (org.). **Produção de aguardente de cana**. Lavras: Editora UFLA, 2006.
CARVALHO, J. M. de; CREMON, C.; MAPELI, N. C.; NUNES, M. C. M.; SILVA, W. N. D.; MAGALHÃES, W. De A.; SANTOS, A. S. Análises micromorfométrica de agregados de

um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Agrarian**. Dourados, v. 3, n. 10, p. 275-285, 2010.

CARVALHO, A.; CHAUVEL, A.; GUIMARÃES, J.E.P.; MELFI, A.J.; NÓBREGA, M.T. Caracterização mineralógica, morfológica e geotécnica de alguns solos lateríticos desenvolvidos sobre basalto na Bacia do Paraná. Partes 1 e 2. In: **Simpósio Brasileiro de solos tropicais em engenharia**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1982. Anais. Rio de Janeiro, CNPq-ABMS, 1982. p.356-380.

CASAGRANDE, A. A. Compactação e manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar. In: MORAES, M. H.; MULLER, M; M. L.; FOLONI, J. S. S. (Coord.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistema de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: Funep, 2002. p. 150 – 197.

CASTILLO, R. Agronegócio e logística em áreas de Cerrado: expressão da agricultura científica globalizada. **Revista da ANPEGE**, v.3, p.33 – 43, 2007.

CASTRO, C. M. de; PEIXOTO, M. N. de O.; RIOS, G. A. P. do. Riscos Ambientais e Geografia: Conceituações, Abordagens e Escalas. **Anuário do Instituto de Geociências**. Rio de Janeiro, v. 28 n.2, p.11-30, 2005.

CASTRO, S. S. **Micromorfologia de solos**. Apostila do curso e material complementar. Campinas/Goiânia: UFG-IESA, UNICAMP-IGDGEO, 2008.

CASTRO, S. S. de; ADBALA, K.; SILVA, A. A.; BORGES, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v.30, nº 1. p. 171 – 191, 2010.

CASTRO, S. S. de, BORGES, R. de O., SILVA, R. A. A. da, BARBALHO, M. G. da S. Estudo da expansão da cana-de-açúcar no Estado de Goiás: subsídios para uma avaliação do potencial de impactos ambientais. In: SBPC, II Fórum de C&T no Cerrado. Goiânia: SBPC, 2007.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C. P. VIDAL TORRADO. **Micromorfologia do solo: Bases e Aplicações**. Tópicos de Ciências do Solo, c. 3. p.107-164. 2003.

CEDDIA, M. B.; ANJOS, L. H. C. DOS; LIMA, E; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. da. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.8, p.1467-1473, ago. 1999.

CENTURION, J. F.; CARDOSO, J. P.; NATALE, W. Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.254-258, 2001.

CHAUVEL, A. **Iniciação à análise microscópica dos solos**. São Paulo: ESALQ-USP, 1979.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento**, abril. Brasília: Conab, 2012. Disponível em: <www.conab.gov.br> Acesso em 24 abr. 2012.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e b textural sobre diabásio**. 1999. 130 f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; CHAPLOT, V. Origin of microaggregates in soils with ferrallic horizons. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v.62, n.3, p.256-263, 2005.

CURI, N. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1993.

DIAS JUNIOR, M. de S. **Compactação do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Tópicos em Ciência do Solo, v.1, p.55-94. 2000.

DONZELLI, J. L. Preservação dos solos agrícolas. In: MACEDO, I. C. **A Energia da Cana-de-Açúcar** – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis & Vertecchia, 2005.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B., Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. SSSAJ, Madison, (Publication Number 35), 1994. p.3-22.

EMBRAPA - Embrapa Agroenergia (2011) Disponível em <<http://www.cnpaembrapa.br/>> Acesso 25 mar. 2011.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. 2ª edição. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006.

EMBRAPA. Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar. Documento 56. Rio de Janeiro, 2003.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia: um repasse bibliográfico**. Campinas (SP): Editora da UNICAMP, 2008.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A.A A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32. p. 463-476, 2008

FERRAZ, R. P. D. **Sistema de indicadores para a avaliação do potencial de sustentabilidade hídrica e monitoramento da cultura da cana-de-açúcar** – contribuição metodológica para o planejamento da expansão da atividade canvieira. 2012. 313 f.

(Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2012.

FONSECA, L. F. L. da; KRUGLIANSKAS, I. (coord.) **Análise da expansão do complexo agroindustrial canavieiro no Brasil**. Brasília: WWF Brasil, 2008.

FORTES, P. de . T. F. de; JOFFILY, C. M. L. de; OLIVEIRA, M. L. de; BAXE, O. S. S.; ALMEIDA, W. M. de. Geoprocessamento aplicado ao planejamento e gestão da região do núcleo rural lago oeste, Sobradinho, DF: resultados preliminares. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XI, 2003. **Anais**. Belo Horizonte: INPE, 2003.p. 1795 - 1802.

FREIRE, O. **Solos das regiões tropicais**. Botucatu: FEPAF, 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Bases cartográficas 1:100.000 com base nos dados do CENSO 2007. SIG-Goiás - Superintendência de Geologia e Mineração – SIC. Disponível em <http://www.sieg.go.gov.br/> Acesso em 17 de jun. 2012.

KERTZMAN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um latossolo roxo provocadas pela compactação**. 1996 f. 216. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, 1996. p.152.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo planta**. São Paulo: Editora Ave Maria, 1979.

KOHLHEPP, G. **Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil**. Estudos avançados v.24 n.68, 2010.

KÖPPEN, W. Klassifikationen des klimates nach temperatur, niederschlag und jahrelauf. **Petermans Geographische Mitteilungen**, Goth, v. 64, p. 193-203, 1918.

LATRUBESSE, M. E.; CARVALHO, M. T. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Secretaria da Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração Goiânia, 2006.

LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI R.; BERTOLINI D. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação das terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991.

MACEDO, I. C. **A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. São Paulo: Berlendis & Vertecchia, 2005.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de alternativas de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 727-733, 2003.

MAMEDE, L.; ROSS, J. L. S.; SANTOS, L. M. dos; NASCIMENTO, M. A. L. S. Projeto RADAMBRASIL. Folha SE (Goiânia) **Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1983.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. (organizadores). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia. **Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia**. Posição 22/07/2009. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>> Acesso em 14 de nov. 2010.

MIRANDA, T. L. **Relações entre atributos físicos e biológicos do solo após operações de colheita e aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2009.

NASSAR, A. M.; RUDORFF, L.B.A.; AGUIAR, D.A.; BACCHI, M.R.P.; ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: ZUURBIER, P.; VOOREN, J.V. (Edit). 2008. **Sugarcane Ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen Publs. Wageningen: 63-94.

NOVAES, A. S. S. AMARAL FILHO, Z. P.; VIEIRA, P. C.; FRAGA, A. G. C. Levantamento Exploratório dos Solos. In: **Projeto RADAMBRASIL**, Folha SE.22, Goiânia. Rio de Janeiro: 1983.

OLIVEIRA, A. L. R. de. **Riscos climático e fator de resposta das culturas da cana-de-açúcar e do trigo para o Estado de Goiás e o Distrito Federal**. 2006. 168 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2006.

OLIVEIRA, J. C. M. de; VAZ, C. M. P.; REICHERDT, K. Efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Escuro. **Sci. Agric**. Piracicaba, v. 52 n. 1. p.50 a 55, 1995.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil & Tillage Research**, n. 117, p. 201–210, 2011.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 403-415, 2011.

PASQUALETTO, A.; ZITO, R. **Impactos ambientais da monocultura da cana-de-açúcar**. Goiânia: Ed. UFG, 2000.

PEDROTTI, A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. **Avanços em ciência do solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental**. São Cristovão, 2009. 212 p.

PRADO, H. **Pedologia Fácil: aplicações**. 3º edição. Piracicaba: H. do Prado, 2011.

PRADO, R. de M.; CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Brasília, v. 36, n. 1, p. 197-203, 2001.

QUEIROZ NETO, J. P. de Geomorfologia e pedologia, **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 01, nº 1, p. 59-67, 2000.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F. O perfil cultural na avaliação do manejo do solo e da compactação. In: MORAES, M. H.; MULLER, M; M. L.; FOLONI, J. S. S. (Coord). **Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistema de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p.74 – 85.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: bases para distinção de ambientes. Lavras: Editora da UFLA, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, J. D.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: LIER, Q. J. V. (ed) **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 29 – 102.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, 2003. p. 29-48

RIBEIRO, A. C.; NOVAIS, R. F. de. BAHIA FILHO, A. F. de C. Efeitos da vinhaça sobre a dispersão de argila de amostras de Latossolos. **Revista Ceres**. Ceres, v.30, n.167, p.12-18, 1983.

RIBEIRO, N. V.; **Expansão Sucroalcooleira no Bioma Cerrado**: Tendências, cenários e impactos. 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

RIZZO, L. T. de B.. **Indicadores de resiliência do Latossolo Vermelho Escuro cultivado com citros e eucalipto em Itapetininga-SP**. Recuperação de um solo degradado pela compactação. Tese de Doutorado em Geografia. Universidade de São Paulo, 2000.

ROQUE, A. A. de; SOUZA, Z. M. DE; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v.45, n.7, jul. 2010. p.744-750

RUELLAN, A.; DOSSO, M.. Soldidac 2003. RUELLAN, A.; CASTRO, S. S. de. (tradução). Paris: Educagri éditions e AUF, 2005.

RUELLAN, A.; DOSSO, M.; FRITSCH, E. L`analyse structurale de la couverture pédologique. **Science du sol**, v. 27, n.4 p. 319 a 334, 1993.

SACHS, I. **Integração dos agricultores familiares e dos empreendedores de pequeno porte na produção dos biocombustíveis**. A Expansão da Agro-Energia e seus Impactos sobre os Ecossistemas Brasileiros. Rio de Janeiro, 26-27 de março de 2007.

SANO, E. E.; DAMBRÓS, L. A.; OLIVEIRA, G. C.; BRITES, R. S.. Padrões de cobertura de solos do Estado de Goiás. In: **A encruzilhada socioambiental: biodiversidade, economia e sustentabilidade no Cerrado**. FERREIRA JÚNIOR, L. (Org.). Goiânia: Editora da UFG, 2008.

SANTOS, F. C. V. DOS; FIGUEIREDO, R. S.; CORRECHEL, V. Qualidade física do solo em ambiente de sistemas dinâmicos. Inédito. 2012.

SANTOS, A. P.; FORESTE C.; NOVO, E. M. L.; NIERO, M.; LOMBARDO, M. A. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento no uso da terra**. São José dos Campos: INPE, 1981.

SANTOS, M. H. M. e C. **A expansão canavieira em Goiás e seus reflexos: exemplo de Santa Helena de Goiás**. 1987. 160 f. (Dissertação) Mestrado em Geografia humana. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.

SANTOS, R. D. do; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos. Manual de descrição e coleta de solo no campo. EMBRAPA. 5ª Ed. Viçosa, 2005.

SCHNEIDER, P.; KLAMT, E. GIASSON, E. **Morfologia do solo: subsídio para caracterização e interpretação de solos a campo**. Guaíba: Agrolivros, 2007.

SEAGRO – Secretaria da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Portal do Agronegócio. Disponível em <<http://www.agronegocio.goias.go.gov.br>>. Acesso em 20 out. 2010.

SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G. C. de; DIAS JÚNIOR, M. de S.; CASTRO, M. B. de; OLIVEIRA, L. F. V. de. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**. v.30, n.3, p.404-413, 2010.

SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G. C. de; CURI, N.; DIAS JÚNIOR, M. de S. Solos cultivados com a cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciências do solo**. v.33, p.159-168, 2009.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Dinâmica de uso da terra e expansão da cana-de-açúcar entre os anos de 2004 a 2010, na microrregião de Quirinópolis, Goiás. In: PIETRAFESA, J. P.; SILVA, S. D. de (org.). **Transformações no Cerrado: progresso, consumo e natureza**. Goiânia: Ed. Da PUC Goiás, 2011. p. 155-170.

SILVA, A. A.; MIZIARA, F. A expansão da fronteira agrícola em Goiás e a localização das usinas de cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, jul./set., v. 41, n. 3. p. 399-407, 2011

SILVA, A. A.; SANT'ANA, G. R. S. De; BORGES, V. M. dos S. CASTRO, S. S de. Alterações físicas, químicas e morfológicas em um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar na microrregião de Quirinópolis, Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33. **Anais...** Uberlândia: SBCS, 1587–1592, 2011.

SILVA, A. J. N. DA; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. n. 30 p. 921-930, 2006.

SILVA, A. J. N. da; RIBEIRO, M. R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa, volume 21, 2007. p. 677 a 684.

SILVA, A. J.N. RIBEIRO, M. R. MERMUT, A. R. BENKE, M. B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em latossolos amarelos coesas do Estado de Alagoas: propriedades micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:515-525, 1998.

SILVA, M. A. S. da. **Impactos da aplicação de vinhaça sobre as propriedade químicas do solo e seu efluente**. 2007. 92f. Tese (Doutorado). Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, F. A. M.; BAIIO, F. H. R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of São Paulo state, Brasil. **Soil & Tillage Reserch**. V. 103 p. 265-270, 2009.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; FOLONI, L. L. Physical proprieties of soils under intensive agricultura management. **Sci. Agric**. v. 62, n.2, p. 165-172, 2005 (a).

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; FOLONI, L. L. Alteração física e morfológica em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar, sob sistema tradicional de manejo. **Ciência Rural**. v. 35, n.2, p. 353-359, 2005 (b).

SOARES, J. L. N.; ESPÍNDOLA, C. R.O; CASTRO, S. S. de. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 29. p. 1005-1014, 2005 (c).

SOUZA JUNIOR, J. J. Mapa de Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais, 31. Folha SE.22. Rio de Janeiro: 1983.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 41, n. 3, p. 487-492, 2006.

SOUZA, Z. M. de; PRADO, R. de M.; PAIXÃO, A. C. S.; CASARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p. 271-278, mar 2005.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.15, n.2, p.229-35, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J. & FURLANI NETO, V. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar. **R. STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**. v.1, p.18-23, 1983.

STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin section. **Soil Science Society of America**. Madison, Wisconsin, 2003.

STOOPS, G.; JONGERIUS, A. Proposal for a micromorphological classification of soil materials. I. A Classification of related distribution of coarse and fine particles. **Geoderma**. V.3, p.189-200, 1975.

TRINDADE, T. P. da; CARVALHO, C. A. B. de; LIMA, D. C. de; BARBOSA, P. S. de A.; SILVA, C. H. de C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos**: fundamentos teóricos e práticos. Viçosa: Ed. UFV, 2008.

UNICAMP/UNICA. Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético. Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo. **Relatório final**. Campinas, 2005.

USDA. Soil Survey Staff. **Soil Survey Manual**. Washington, 1993.

VASCONCELOS, R. F. B. de; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S. de; COSTA, Y. D. J. da; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um latossolo amarelo distrófico de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 309-316, 2010.

VAZ, C. M. P.; PRIMAVESI, O.; PATRIZZI, V. C.; IOSSI, M. de F. Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto. **Comunicado técnico 51**. MAPA. São Paulo, 2002.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S.S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. **Tópicos em Ciências dos Solos**. v.4, p. 145 – 192, 2005.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M. de; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. da. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 38, n. 1, p. 133-141, jan. 2003.

WHITE, R. E. **Princípios e práticas da ciência do solo**: o solo como um recurso natural. 4ª edição. São Paulo: Andrei editora, 2009.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). **Análise da expansão do complexo agroindustrial canavieiro no Brasil**: Documento aberto para consulta pública. Coordenação Técnica: Luiz Fernando Laranja da Fonseca; Ilan Kruglianskas. Brasília: WWF Brasil, 2008.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). **Expansão agrícola e perda da biodiversidade no Cerrado**: origens históricas e o papel do comércio internacional. Brasília, DF: WWF. Brasil, 2000.

ZACHARIAS, A. A. **A representação gráfica das unidades da paisagem no zoneamento ambiental**. São Paulo: Editora da UNESP, 2010.