

SIC
Secretaria de
Estado de
Indústria,
Comércio e
Serviços



CADERNO 3
DESAFIOS PARA A GEOLOGIA, MINERAÇÃO E
TRANSFORMAÇÃO MINERAL

Coordenador

Prof. Dr. André Carlos Silva
Universidade Federal de Goiás (UFCAT)



GOVERNO DO ESTADO DE GOIÁS - GO

SECRETARIA DE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS - SIC

CADERNO 3

DESAFIOS PARA A GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

RELATÓRIO 6 (Versão 1)

Minerais Estratégicos

Catalão, março de 2024.

CONTRATO Nº 08/2022
SECRETARIA DE INDÚSTRIA,
COMÉRCIO E SERVIÇOS – SIC

PLANO ESTADUAL DE RECURSOS MINERAIS
DE GOIÁS - PERM 2022-2042

CADERNO 3
DESAFIOS PARA A GEOLOGIA, MINERAÇÃO E
TRANSFORMAÇÃO MINERAL

RELATÓRIO 6 (Versão 1)
Minerais Estratégicos

Coordenador
Prof. Dr. André Carlos Silva
Universidade Federal de Catalão (UFCAT)

Catalão, março de 2024.

EQUIPE

Prof. Dr. André Carlos Silva

Graduação em Engenharia de Minas; Mestrado em Engenharia Mineral; Doutorado em Engenharia de Materiais.

<http://lattes.cnpq.br/2682532729839545>

Profa. Dra. Elenice Maria Schons Silva

Graduação em Química Industrial; Mestrado em Engenharia Mineral; Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

<http://lattes.cnpq.br/3583927607917106>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. MINERAIS ESTRATÉGICOS	9
3. MINERAIS INDISPENSÁVEIS PARA O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO	17
4. CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS	23

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, muitos países têm concentrado seu desenvolvimento econômico em indústrias tecnológicas o que leva ao problema da disponibilidade de recursos naturais para tal. Visando sanar tal problema, vários institutos e organizações têm realizado estudos acerca do que são os minerais estratégicos, estabelecendo listas daqueles considerados críticos e de que forma os mesmos serão providos.

O desenvolvimento econômico sustentável de cada país depende, em grande parte, da disponibilidade de matérias-primas, dentre elas os minerais. Dessa forma, é fundamental que estejam disponíveis para garantir o funcionamento de diferentes indústrias, essenciais para o desenvolvimento dos setores energético, notadamente energias limpas, de telecomunicações, eletrônica, agricultura, construção, transportes e defesa nacional. Devido à grande diversidade dos minerais utilizados atualmente, nenhum país é totalmente autossuficiente e necessita importar de outros países.

O Brasil é um grande *player* no setor mineral mundial, uma vez que provê diferentes bens minerais, figurando no cenário internacional juntamente com Estados Unidos, China, Canadá, África do Sul e Austrália. Contudo, apesar da vasta dimensão territorial e da diversidade geológica, há a demanda de outros bens minerais que o Brasil não produz ou produz pouco em relação à demanda. Um exemplo são os fertilizantes, particularmente os de fósforo e potássio, essenciais para o setor agrícola, tendo importado 22,9% e 12,9% de cada, respectivamente, em 2023.

Dentre os bens minerais que o País exporta tem-se: nióbio, minério de ferro, bauxita, vermiculita, caulim e simples exportador de manganês, estanho, níquel, magnesita, cromo, ouro e rochas ornamentais. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2024), a nova política industrial brasileira, anunciada em janeiro/2024, situa a mineração como setor estratégico para que o País possa cumprir seus objetivos, com destaque para a transição energética, a descarbonização e o desenvolvimento tecnológico da indústria nacional.

2. MINERAIS ESTRATÉGICOS

Segundo Silva & Azevedo (2021), dificilmente alguém conseguirá identificar objetos de uso no dia a dia que não contenham produtos oriundos da mineração. Assim, é fundamental entender quais são os minerais essenciais à sobrevivência, uma vez que se trata de recursos finitos e, muitas vezes, escassos. De acordo com a *European Commission* (2019), os bens minerais não energéticos fazem parte de todas as indústrias em algum estágio de suas cadeias produtivas, tornando-se cada vez mais essenciais para alavancar mudanças, como as tecnologias digitais, as tecnologias de baixo carbono e a mobilidade sustentável.

As indústrias extrativas fornecem matérias-primas minerais, incluindo matérias-primas críticas, que são essenciais para as demais indústrias. Durante a prospecção, extração, processamento e armazenamento de recursos minerais, incluindo a exploração em pedreiras, são gerados diferentes resíduos. Alguns podem representar riscos para o meio ambiente, enquanto outros podem ser recuperados, reduzindo os impactos ocasionados e gerando receita às empresas. No Brasil poucas empresas trabalham com os resíduos de outras, conferindo nova aplicação após o seu re-processamento. A reciclagem pode ser uma alternativa interessante para o caso dos minerais críticos.

Como a extração mineral é um estágio inicial para muitas das cadeias produtivas, a dimensão dos minerais críticos amplia então o debate sobre os minerais estratégicos, estendendo o conceito oriundo do período posterior à Segunda Guerra Mundial, quando as superpotências, na Guerra Fria, buscavam os meios para garantir seu domínio geopolítico e interesses militares. Portanto, os minerais estratégicos englobam também os minerais críticos. Contudo o que é estratégico para determinados países pode ser considerado crítico para outros países e vice-versa. Assim, a definição, para cada país, de quais são suas matérias-primas críticas necessita de estudos nacionais para cada bem mineral e suas respectivas cadeias industriais relacionadas, de modo a formular uma estratégia de suprimento para atender as demandas (Castro *et al.*, 2022).

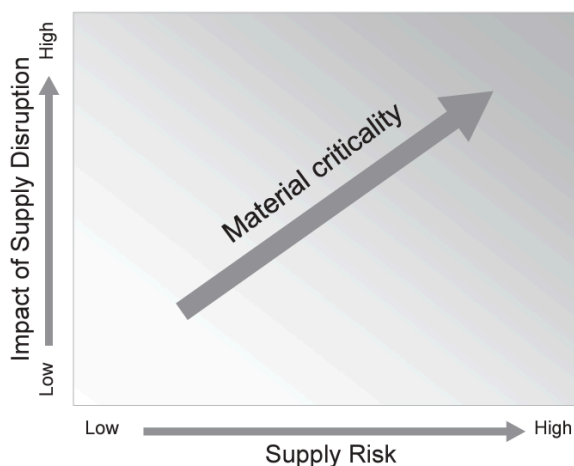
Os países utilizam diferentes termos para definir quais são os minerais de importância econômica, normalmente chamados de críticos ou estratégicos. Para minerais críticos, a

metodologia mais utilizada baseia-se em dois indicadores (Frenzel *et al.*, 2017; Blengini *et al.*, 2017; European Commission, 2017; Galos *et al.*, 2021):

1. Relaciona-se com a avaliação da importância econômica do bem mineral;
2. Relaciona-se com a avaliação do risco de abastecimento e problemas na cadeia de abastecimento.

A escolha de fatores específicos resulta, entre outros, de diferentes definições da “criticalidade dos minerais” e de diferentes políticas minerais em cada país. Além disso, em muitos casos, os minerais críticos podem estar geologicamente dispersos ou concentrados em algumas localizações geográficas pouco favoráveis à extração, com conflitos sociais e políticos, ou até mesmo ser recuperado como subproduto de outra *commodity*. Assim, definir quais são os minerais críticos pode favorecer a procura por novos jazimentos e melhorias de rotas de exploração e beneficiamento. De acordo com Babbitt *et al.* (2021), em 2008, um comitê das Academias Nacionais dos EUA publicou uma análise que buscava determinar quais minerais não combustíveis poderiam ser “críticos” para a economia nacional. A figura 1 apresenta a abordagem que foi elaborada, a qual avalia o risco de ocorrência de uma restrição ou interrupção do fornecimento de um bem mineral considerado crítico (eixo horizontal) e o impacto potencial dessa interrupção do fornecimento nos setores econômicos em que o material é utilizado (eixo vertical). Observa-se que o risco de criticidade aumenta à medida que se move do quadrante inferior esquerdo para o quadrante superior direito da matriz.

Figura 1 – Determinação da criticidade do material com base na matriz de criticidade.



Fonte: Babbitt *et al.* (2021).

Ainda segundo Babbitt *et al.* (2021), o primeiro eixo analisa perturbações no fornecimento do recurso mineral, que tanto podem ser causadas pela escassez física real quanto pela relacionada ao rápido crescimento da procura, desastres naturais, políticas comerciais ou geopolíticas. O segundo eixo avalia até que ponto o desequilíbrio entre a oferta e a procura poderia causar perturbações nas infraestruturas essenciais e atividades industriais, particularmente nos setores da defesa e energia limpa.

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia – MME (2023), a relação dos minerais considerados estratégicos para o Brasil foi definida pelo Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME) na Resolução nº 02/2021. Os minerais estratégicos estão divididos em três blocos: 1º) aqueles que o Brasil depende de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia; 2º) minerais que têm importância pela aplicação em produtos e processos de alta tecnologia; e, 3º) aqueles que detêm vantagens comparativas e que são essenciais para a economia pela geração de *superávit* na balança comercial brasileira. Dessa forma, ficaram assim divididos (DOU, 2021):

1. Enxofre, minério de fosfato, minério de potássio e o minério de molibdênio;
2. Minério de cobalto, minério de cobre, minério de estanho, minério de grafita, minerais do grupo da platina (platina, paládio e ródio), minério de lítio, minério de nióbio, minério de níquel, minério de silício, minério de tálio, minério de tântalo, minério de terras raras, minério de titânio, minério de tungstênio, minério de urânio e minério de vanádio;
3. Minério de alumínio, minério de cobre, minério de ferro, minério de grafita, minério de ouro, minério de manganês, minério de nióbio e minério de urânio.

A União Europeia (EU) definiu uma primeira lista dos minerais estratégicos e/ou críticos em 2011. Essa lista continha 14 substâncias, onde se levou em conta a garantia de acesso aos recursos advindos de outros países, sustentabilidade da produção das matérias-primas europeias e o fomento à eficiência do uso dos recursos estimulando a economia circular. Desde então a UE vem atualizando essa lista, sendo que em 2017 continha 27 substâncias (Goés, 2021).

Atualmente, a metodologia de criticalidade da UE envolve tanto matérias-primas críticas bióticas, como abióticas, sendo o inventário composto por 78 matérias-primas, sem considerar as energéticas ou agrícolas, mas envolvendo os elementos de terras-raras leves (*light rare earth elements* – LREE) e pesadas (*heavy rare earth elements* – HREE) e elementos do grupo platina (Castro *et al.*, 2020). As principais matérias-primas críticas da União Europeia estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Matérias-primas críticas para a Comunidade Europeia conforme lista de 2017.

Matérias-primas		
Antimônio	Háfnio	Minerais do grupo da platina
Barita	Hélio	Rocha fosfática
Berílio	Terras-raras pesadas	Fósforo
Bismuto	Terras-raras leves	Escândio
Boro	Índio	Silício
Cobalto	Magnésio	Tântalo
Fluorita	Grafita natural	Tungstênio
Gálio	Borracha natural	Vanádio
Germânio	Nióbio	

Destaca-se que, entre alguns minerais que compõem a lista da União Europeia de matérias-primas críticas que são considerados com alto risco de suprimento, está o nióbio, cujas principais fontes se encontram no Brasil; os elementos de terras raras pesados e leves, antimônio, bismuto, tungstênio, magnésio, entre outros, provenientes principalmente da China; os metais do grupo da platina, predominantes na África do Sul; e o paládio, cujas maiores reservas em produção estão na Rússia (Castro *et al.*, 2020).

A política da Comissão Europeia para a implementação da economia circular tem grande ligação com o risco de suprimento e a demanda por materiais considerados críticos, como é o caso do nióbio brasileiro. O Plano de Ação para Economia Circular da Comissão Europeia estabelece as vinculações entre as matérias-primas críticas e as ações previstas não só para uma abordagem eficiente e coerente da política, a partir de bancos de dados atualizados, mas também para a promoção de boas práticas e a identificação de possíveis ações futuras (Bobba *et al.*, 2018).

Os Estados Unidos têm uma longa lista de minerais considerados estratégicos e estão fortemente relacionados com seus interesses militares e de segurança nacional. De acordo com dados do órgão de geologia dos EUA, *U.S. Geological Survey – USGS* (2023), em 2022, as importações do país representavam mais de metade do consumo aparente para 51 produtos minerais não combustíveis, sendo que dependiam 100% das importações líquidas para 15 deles. Das 50 commodities minerais identificadas na “Lista Final de Minerais Críticos de 2022”, os Estados Unidos eram 100% dependentes de importações líquidas para 12 commodities minerais e 50% dependente para 31 dos minerais considerados críticos (incluindo 14 lantanídeos, que estão listados como minerais de terras-raras). Os países que foram as principais fontes de importação, com mais de 50% de dependência líquida, foram: China, 26 produtos minerais; Canadá, 20 commodities minerais; Alemanha, 14 commodities minerais; Brasil, 11 commodities minerais; África do Sul, 10 commodities minerais; e México, 9 commodities minerais.

Dentre as substâncias minerais ou derivadas que o Brasil exporta para os EUA destaca-se: asbesto, mica natural, nióbio, pigmentos de óxido de ferro, rochas ornamentais, carbetos de silício (produzido a partir de silício e carbono), óxido de alumínio fundido (como material abrasivo), bauxita, alumina, vanádio, compostos de magnésio, silício metálico ou ferrosilício e vermiculita (USGS, 2023). A figura 1 apresenta as principais fontes de importação de commodities minerais não combustíveis, das quais os Estados Unidos dependiam mais de 50% das importações líquidas em 2022

A China tem promovido uma estratégia historicamente protecionista em favor de seus recursos minerais, favorecendo a sua indústria doméstica. Este processo, iniciado em 1950, buscou inicialmente a ampliação da mineração chinesa no interior da Mongólia, em depósitos de ferro, por meio da Companhia de Ferro e Aço de Baotou. O exemplo mais notável do domínio chinês no mercado mundial se dá no segmento dos elementos de terras raras. Na década de 1990, a partir do empreendimento de novos métodos extrativos e investimentos em pesquisa e inovação tecnológica, o governo chinês previu sua alavancada econômica com base na utilização dos seus recursos minerais, por meio do plano nacional de desenvolvimento de alta tecnologia (Castro *et al.*, 2022). O país é o principal produtor e consumidor mundial de muitos minerais e metais. Embora tenha muitos minerais em seu vasto território, o país é o principal importador mundial de

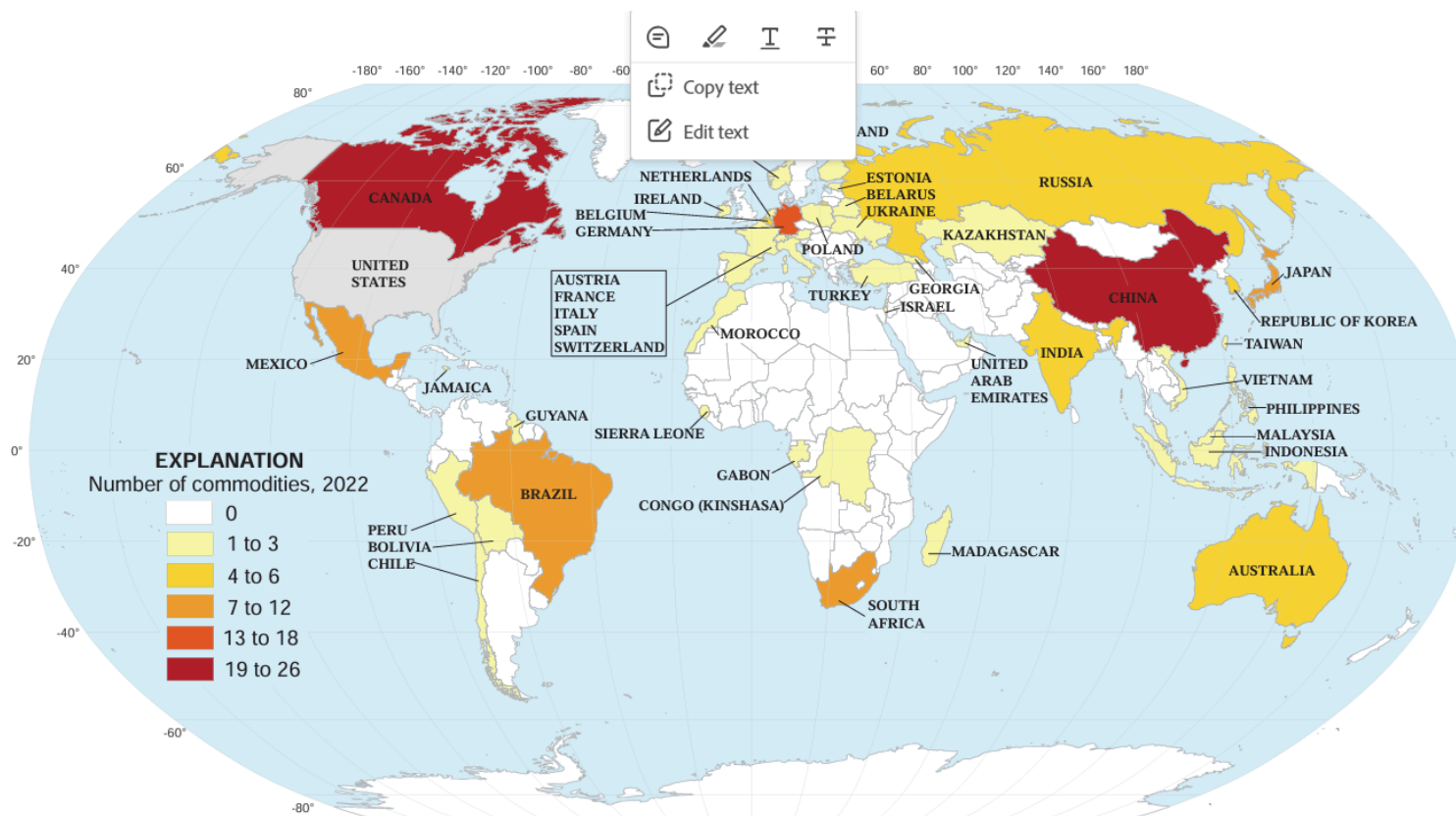
cobre, minério de ferro, cromo, manganês, cobalto, tântalo, nióbio, minerais do grupo da platina (PGMs) e lítio.

Uma vez que a China é uma das maiores importadoras de bens minerais primários e busca estreitar laços comerciais com a indústria extrativa mineral de países detentores desses recursos estratégicos, como é o caso do nióbio no Brasil, tendo adquirido a empresa Niobras, mineradora e produtora de ligas ferro-nióbio instalada no município de Ouvidor/GO, por meio da empresa *China Molybdenum Corporation* (CMOC) (Castro *et al.*, 2022).

Segundo Motoori *et al.* (2018), o Japão é um país que tem sido particularmente considerado vulnerável à restrição de recursos, devido à sua forte dependência de matérias-primas importadas para o fabrico de metais para apoiar as suas indústrias transformadoras de exportação, tendo a maioria das suas minas históricas sido encerradas. Os concentrados de minério de ferro, cobre, chumbo e zinco demandados no país são 100% importados. Esses materiais são processados em metais e empregados em diversos produtos, tais como: automóveis, equipamentos elétricos e eletrônicos. O Japão tem desenvolvido uma série de estratégias para melhorar a segurança dos recursos, incluindo o desenvolvimento a montante em países produtores de recursos, reciclagem, armazenamento e investigação e desenvolvimento de materiais alternativos (substitutos).

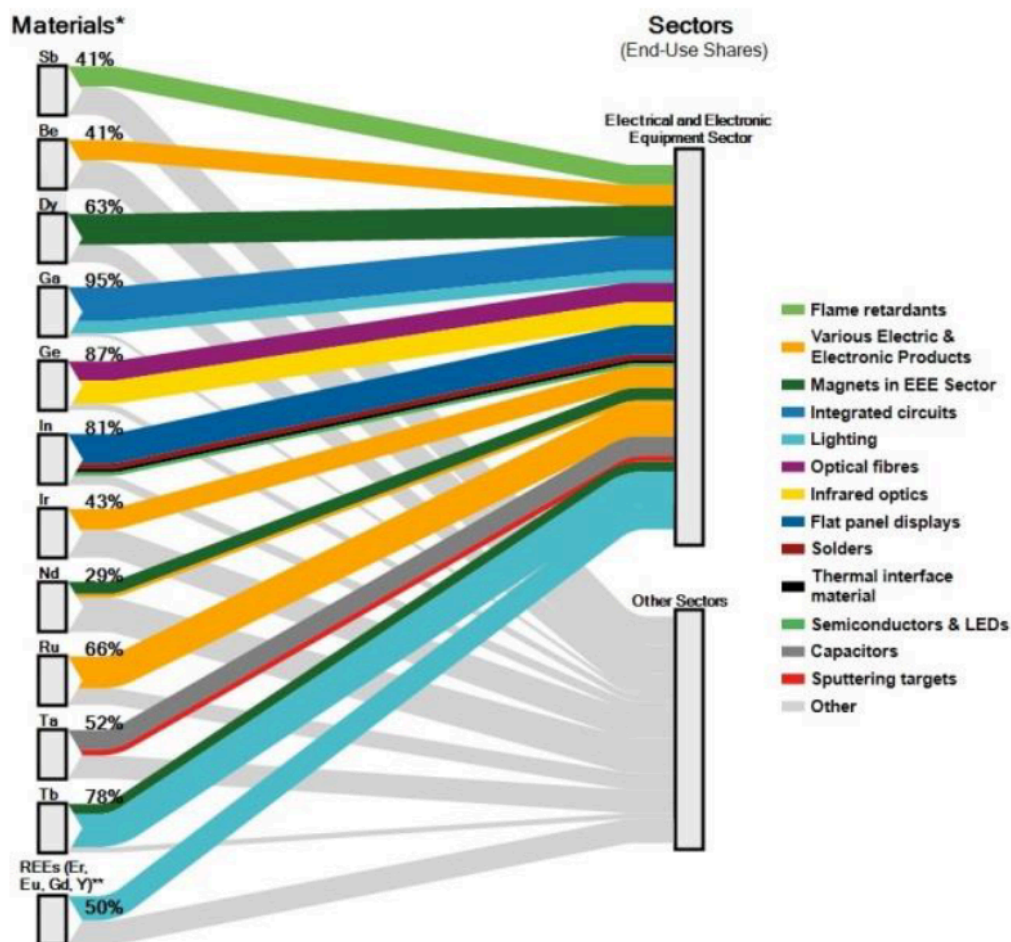
Para o caso da UE, o setor de equipamentos elétricos e eletrônicos depende de uma grande diversidade de matérias-primas críticas, incluindo antimônio, berílio, cobalto, germânio, índio, PGM, grafite natural, REE, silício metálico e tungstênio, conforme apresentado na figura 2. Dessa forma, os resíduos elétricos e eletrônicos dos países que fazem parte da EU são, em sua maior parte, reciclados, com políticas que tratam especificamente do assunto, tais como a Diretiva REEE 2002/96/CE e a Diretiva Concessão Ecológica 2009/125/CE.

Figura 2 – Principais fontes de importação de commodities minerais não combustíveis, das quais os Estados Unidos dependiam mais de 50% das importações líquidas em 2022.



Fonte: USGS (2023).

Figura 3 – Proporção de minerais críticos reciclados utilizados no setor elétrico e eletrônico na EU.



*Only a subset of CRMs used in the EEE sector are included. Additional CRMs linked to the EEE sectors include Ce, Co, Fluorspar, Hf, He, La, Mn, Natural rubber, Pd, Pt, Pr, Rh, Sm, Si, W, and V. **Average share for Er, Eu, Gd, and Y.

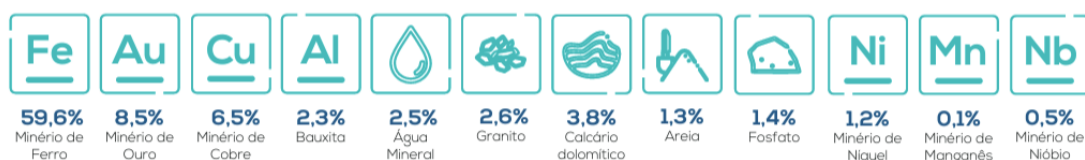
Fonte: Mathieux *et al.* (2017).

A participação de Goiás na rede global extrativa de minérios ocorre principalmente para os seguintes bens minerais: amianto extraído em Minaçu; nióbio em Catalão e Ouvidor; cobre em Alto Horizonte; níquel em Barro Alto e Niquelândia e ouro em Crixás, Faina, Guarinos e Pilar de Goiás. Esse bens totalizam 87% de todos os produtos minerais goianos.

3. MINERAIS INDISPENSÁVEIS PARA O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

Com um valor de US\$ 102,16 bilhões, o setor mineral colocou-se em segundo lugar no fluxo comercial do Brasil com o exterior em 2023, perdendo apenas para o agronegócio. Incluindo a indústria extrativa mineral e a indústria de transformação mineral, o setor exportou um total de US\$ 62,05 bilhões e importou US\$ 40,11 bilhões, com um saldo comercial de US\$ 21,93 bilhões. As substâncias minerais (*in natura* ou transformadas) que mais contribuíram para o valor das exportações do setor mineral foram o ferro – US\$ 38,8 bilhões, alumínio – US\$ 4,17 bilhões, cobre – US\$ 3,80 bilhões, ouro – US\$ 3,16 bilhões, nióbio – US\$ 2,02 bilhões, níquel – US\$ 1,1 bilhão e rochas ornamentais – 1,04 bilhão Já as que pesaram negativamente na balança comercial, com importações, foram: carvão mineral – US\$ 5,85 bilhões; fosfato – US\$ 5,24 bilhões; e potássio – US\$ 4,86 bilhões (Brasil Mineral, 2024). Em relação aos principais bens minerais produzidos com a participação do setor tem-se, em primeiro lugar, o minério de ferro, seguido do ouro e do cobre, conforme apresentado na figura 3.

Figura 4 – Principais bens minerais produzidos no Brasil com a participação do setor para o ano de 2023.



Fonte: IBRAM (2024).

As tecnologias de energia eólica e fotovoltaica dependem de uma variedade de materiais, sendo que seis deles estão identificados na lista dos minerais críticos da EU: neodímio, praseodímio, disprósio, índio, gálio e silício metálico. Acredita-se que a demanda por tais materiais aumentará muito no futuro, dependendo das tecnologias a serem implementadas em tais setores de energia, como por exemplo o uso de ímãs permanentes de terras-raras nos geradores das turbinas eólicas, tecnologia não utilizada ainda, mas com potencial de ser implementada em breve.

O estado de Goiás possui importantes depósitos de quartzo de alta pureza, especialmente os situados em Cristalina. Estudos estão sendo realizados visando purificar os teores de SiO₂ a fim de propiciar aplicações tecnológicas que tragam empresas do setor para o estado.

Segundo Hayes & McCullough (2018), que analisaram quais seriam os minerais considerados críticos através da análise de inúmeros trabalhos acerca do tema, os seguintes elementos são frequentemente considerados críticos: cobalto, elementos de terras-raras (REE), minerais do grupo da platina (PGM), índio, tungstênio, germânio, nióbio, tântalo, gálio, antimônio, bismuto, tálio e magnésio.

No Brasil, o cobalto geralmente encontra-se associado a minérios de níquel, e estes, por sua vez, podem estar vinculados a minérios lateríticos, sulfetados e leito marinho. Os minerais de cobalto são: ahlfeldita, cobaltita, glaucodoto, linneíta e saflorita. Em Goiás, a produção do cobalto era realizada a partir do subproduto do níquel nas minas de Niquelândia e Barro Alto, estado de Goiás, e processado na unidade industrial de São Miguel Paulista/SP. Contudo, dados da ANM apontam que desde o ano de 2017 não há produção deste material no Brasil. Em termos de reservas minerais aprovadas pela ANM, o Brasil possui 70 mil toneladas de metal contido, não figurando entre as maiores do mundo (Fonseca, 2016; U.S. Geological Survey, 2023; Nascimento & Soares, 2019; Fonte-Boa, 2018; Heider, 2018; ANM, 2022; Santos, 2023).

Embora todos os elementos de terras-raras (REE) sejam considerados críticos para a maioria dos países, os que possuem maior demanda são: neodímio, disprósio, európio, térbio e ítrio. Em Goiás tem-se a empresa Mineração Serra Verde, localizada em Minaçu, com reservas estimadas de 350 Mt de minério com 0,15% de OTR (neodímio, praseodímio e térbio). Esse depósito é considerado pela empresa o maior em argilas iônicas do Hemisfério Ocidental.

Costa (2019) estudou a presença de elementos terras-raras em importantes concentrações no maciço granítico Pedra Branca, situado na parte leste na Província Estanífera de Goiás, na Subprovíncia Estanífera Paranã. O maciço possui importantes depósitos de estanho e é constituído por granitos do Tipo A, metaluminosos a peraluminosos, com idade entre 1740 e 1769 Ma. A Faixa Placha é o depósito de

estanho mais importante do Maciço Pedra Branca e apresenta concentrações elevadas de ETRY, tanto no minério de Sn quanto no granito parental e nos granitos greisenizados com potencial para serem explotados economicamente como subproduto do estanho.

Os resultados obtidos por Costa (2019) sugerem que o Maciço da Pedra Branca possui um granito dominante rico em REE+Y devido à presença de alanita, monazita, xenótima, torita, zircão e apatita. Nos granitos parentais, granitos greisenizados e greisens, zircões metamictizados e alterados favorecem a concentração de HREE+Y, que atinge valores acima de 500 ppm em algumas amostras. As concentrações de REE+Y e as composições minerais sugerem um potencial econômico no depósito Faixa Placha, principal depósito de estanho do Brasil central, para recuperação de REE como subprodutos. Além disso, a área também é favorável para depósitos de ETR do tipo adsorção iônica tanto nos depósitos de estanho quanto nas superfícies intemperizadas do maciço granítico.

No município de Catalão e Ouidor se localiza um dos maiores recursos de REE nacional, localizado no Complexo Alcalino Carbonatítico de Catalão I. Esse depósito é conhecido pela exploração comercial de nióbio e fosfato. Estudos realizados por pesquisadores da Universidade Federal de Catalão em parceria com a USP, CMOC e instituições da Alemanha caracterizou a presença dos REE nos rejeitos do processamento do nióbio. Os resultados

A região de Catalão e Ouidor se destaca pela produção nióbio. Esse elemento é empregado na fabricação do aço, melhorando suas características de resistência mecânica e maleabilidade. Além disso, é empregado na fabricação de vidros especiais (lentes, películas de revestimento e capacitores cerâmicos), entre outros.

Segundo Bruziquesia *et al.* (2019), o pirocloro $(\text{Na}_3, \text{Ca})_2(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{O}, \text{F})_7$ é um mineral de origem carbonatítica com teor máximo de 71% de óxido de nióbio (Nb_2O_5) e suas maiores reservas existentes estão localizadas no Brasil, nos estados de Minas Gerais (Araxá) e Goiás (Catalão e Ouidor). No estado de Goiás as principais jazidas estão nos municípios de Catalão e Ouidor, com 82,3 Mt de minérios que são explorados pela Niobras, pertencente à empresa CMOC.

Os complexos máficos-ultramáficos (CMU) acamadados no Brasil e no mundo são de grande interesse científico e econômico, principalmente pela ocasional presença de depósitos sulfetados ou lateríticos de Ni (Co)-(Cu) e/ou elementos do grupo da platina (EGP)+Au. Dentre estes CMU, os presentes no Maciço Mediano de Goiás, Brasil, merecem destaque especial, os de Niquelândia (com mina paralizada de Ni laterítico), Barro Alto (com mina ativa de Ni laterítico) e Cana Brava (com mina desativada de amianto/asbesto) devido a atividade econômica existente nestes CMU (Correia et al., 2007). Estes complexos acamadados ocorrem entre os crátons Amazônico e São Francisco, na Província Tocantins, na parte central do arco magmático de Goiás (Cordani *et al.*, 2000).

Os veículos elétricos são considerados a tecnologia capaz de levar à descarbonização do transporte rodoviário, o qual é responsável por mais de 15% das emissões globais relacionadas com a energia. Contudo, estima-se que um carro elétrico necessite em torno de seis vezes mais insumos minerais do que um carro convencional. Segundo estimativas da *International Energy Agency* (IEA), a demanda por lítio deve crescer 40 vezes até 2040 e a demanda por cobalto, grafite e níquel entre 20 e 25 vezes até 2040.

Caso semelhante é observado para o índio, um metal geologicamente escasso que é uma matéria-prima essencial em monitores de tela plana e energia solar fotovoltaica. A procura global anual de índio aumentou para mais de 750 t métricas nos últimos anos, um aumento de 125% desde 2000 (Babbitt *et al.*, 2021).

Em termos de demanda mundial, um outro exemplo de *comodity* que será altamente demandada será o cobre, com estimativa de aumento entre 200% e 350% em 2050, comparando-se com a demanda de 2010, ou seja, um crescimento para 31.200 a 54.600 kt por ano. A Associação Internacional de Cobre estima que, em 10 anos, a procura de cobre para veículos elétricos aumentará em nove vezes em comparação com a procura de 2017, o que provavelmente agravará a procura de cobre para além das tendências históricas (Motoori *et al.*, 2018).

Tal qual o cobre, estimativas apontam que a demanda pelo níquel irá dobrar até o ano de 2050 em face da necessidade do metal no setor de veículos elétricos, principalmente, vinculados às baterias, sistema elétricos e eletrônicos e a parte estrutural destes

equipamentos. Estima-se que, para soluções que envolvam energias geotérmicas, o níquel seja o metal mais utilizado e em sistemas de armazenamento de energia o segundo em volume, sendo ainda muito utilizado nas tecnologias vinculadas ao hidrogênio verde (Hund *et al.*, 2020; Calvo e Valero, 2021; *International Energy Agency*, 2022; Santos, 2023).

4. CONCLUSÃO

Embora todas as matérias-primas sejam importantes, algumas delas são mais preocupantes do que outras em termos de abastecimento seguro e sustentável. A oferta futura de minerais críticos está sujeita a diversas incertezas, tais como: aumento da demanda em países em desenvolvimento, regulamentações ambientais, surgimento de novas tecnologias, descoberta de novos depósitos minerais e desenvolvimento de novas rotas para processamento de minérios de baixo teor, entre outros.

A reciclagem é uma importante fonte de matérias-primas secundárias, podendo contribuir para a segurança do abastecimento de matérias-primas e avanço rumo à economia circular. Contudo, para que isso se torne de fato realidade é fundamental que os países invistam em projetos para a reciclagem dos resíduos, tanto gerados na mineração quanto nos processos produtivos e nos produtos descartados.

É imprescindível que um país conheça quais são as oportunidades e o que possui para oferecer, direcionando recursos humanos e financeiros adequadamente conforme as demandas mundiais. Além disso, pode propiciar o desenvolvimento de rotas de exploração e processamento através de projetos específicos para tal, priorizando aqueles minérios de difícil beneficiamento ou que sejam considerados rejeito de outro bem mineral. Assim, considerando que o conceito de criticidade é variável conforme as tecnologias vão surgindo, pode-se propiciar diferentes oportunidades de negócios.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro Interativo**, 2022.

BABBITT, C.W.; ALTHAF, S.; RIOS, F.C.; BILEC, M.M.; GRAEDEL, T.E. **The role of design in circular economy solutions for critical materials**. *One Earth* 4, pp.353-362, 2021.

BLENGINI, G.A.; NUSS, P.; DEWULF, J.; NITA, V.; PEIRO, L.T.; VIDAL-LEGAZ, B.; LATUNUSSA, C.; MANCINI, L.; BLAGOEVA, D.; PENNINGTON, D.; PELLEGRINI, M.; VAN MAERCKE, A.; SOLAR, S.; GROHOL, M.; CIUPAGEA, C. **EU methodology for critical raw materials assessment: policy needs and proposed solutions for incremental improvements**. *Resour. Pol.* 53, pp.12-19, 2017.

BOBBA, S. *et al.* **Report on critical raw materials and the circular economy**. Luxembourg: EU. 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/3pYvYj4>>. Acesso em: 01 abr. 2024.

BRASIL MINERAL. **Saldo comercial do setor mineral em 2023 é de US\$ 21,93 bilhões**. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/saldo-comercial-do-setor-mineral-em-2023-e-de-us-2193-bilhoes>. Acesso em: 01 abr. 2024.

_____. **Policy and strategy for raw materials**. EC, 2017.

BRUZIQUESIA, C.G.O.; BALENAA, J.G.; PEREIRA, M.C.; SILVA, A.C.; OLIVEIRA, L.C.A. **Nióbio: um elemento químico estratégico para o Brasil**. *Quim. Nova*, Vol. 42, Nº 10, pp.1184-1188, 2019.

CALVO, G.; VALERO, A. **‘Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector’**. *Environmental Development*, v. 41, p. 100640, 2022.

CASTRO, F.F.D.; PEITER, C.C.; GÓES, G.S. **Minerais estratégicos e críticos: uma visão internacional e da política mineral brasileira**. Texto para Discussão, Nº 2768, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, 2022.

CORDANI, U.G.; SATO, K.; TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C.C.G.; BASEI, M.A.S. **Crustal evolution of the South American platform**. In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A. & Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*, pp.19-40, 2000.

COSTA, N.O.D. **Caracterização mineralógica, geoquímica e potencial econômico de ocorrências de terras-raras do maciço granítico Pedra Branca, Goiás**. Tese, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de Brasília (UNB), 125p., 2019.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO (DOU). **Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-2-de-18-de-junho-de-2021-327352416>. Acesso em: 01 abr. 2024.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials**. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, 2017.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **The raw materials initiative—meeting our critical needs for growth and jobs in Europe**. EU, 2008.

FONSECA, D.S. **Cobalto**. Sumário Mineral, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/cobalto>. Acesso em: 02 abr. 2024.

FONTE-BOA, T.M.R. **Níquel e Cobalto**. Recursos minerais de minas gerais – níquel e cobalto, 2018.

FRENZEL, M.; KUKLIK, J.; REUTER, M.A.; GUTZMER, J. **Raw material „criticality” – sense or nonsense?** J. Phys. D Appl. Phys. 50 (12), 123002, 2017.

GALOS, K.; LEWICKA, E.; BURKOWICZ, A.; GUZIK, K.; KOT-NIEWIADOMSKA, A.; KAMYK, J.; SZLUGAJ, J. **Approach to identification and classification of the key, strategic and critical minerals important for the mineral security of Poland.** Resources Policy, Volume 70, 101900, 2021.

GOÉS, G.S. **A geopolítica da energia do século XXI.** 1ª ed., Rio de Janeiro, Ed. Synergia, 2021.

HAYES, S.M.; MCCULLOUGH, E.A. **Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies.** Resources Policy, Volume 59, pp.192-199, 2018.

HEIDER, M. **‘Perspectivas do Cobalto’**, Revista In the Mine, 75: 10-12, 2018.

HUND, K. *et al.* **Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition.** World Bank: Washington, DC, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Em 2023, mineração repete faturamento do ano anterior e pretende ampliar investimentos até 2028.** Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/em-2023-mineracao-repete-faturamento-do-ano-anterior-e-pretende-ampliar-investimentos-ate-2028/>. Acesso em: 01 abr. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Mineração em números.** Relatório 2023, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The role of critical minerals in clean energy transitions.** Paris: IEA, 2022.

MATHIEUX, F.; ARDENTE, F.; BOBBA, S.; NUSS, P.; BLENGINI, G.; ALVES DIAS, P.; BLAGOEVA, D.; TORRES DE MATOS, C.; WITTMER, D.; PAVEL, C.; HAMOR, T.; SAVEYN, H.; GAWLIK, B.; ORVEILLON, G.; HUYGENS, D.; GARBARINO, E.; TZIMAS, E.; BOURAOU, F.; SOLAR, S., **Critical Raw Materials and the Circular Economy – Background report.** JRC Science-for-policy report, EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Conheça os minerais estratégicos e como eles fazem parte do seu dia a dia.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/conheca-os-minerais-estrategicos-e-como-eles-fazem-parte-do-seu-dia-a-dia>. Acesso em: 01 abr. 2024.

MOTOORI, R.; MCLELLAN, B.C.; TEZUKA, T. **Environmental implications of resource security strategies for critical minerals: a case study of copper in Japan.** Minerals, 8, 558, 2018.

NASCIMENTO, M.; SOARES, P.S.M. **Cobalto no Brasil: metalurgia extrativa, ocorrências e projetos.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2019. Série Estudos e Documentos, 100, 2019.

SANTOS, Y.C.D.S. **Panorama da mineração brasileira em relação a alguns dos principais minerais críticos necessários à transição energética.** Latin American Journal of Energy Research – Lajer, v. 10, n. 1, pp.77-86, 2023.

SILVA, C.R.D.; AZEVEDO, R.L.G.D. **Recursos minerais do Brasil: diretrizes para o setor mineral.** Terrae Didat., Campinas/SP, v.171, 2021.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey.** 210p., 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2023>. Acesso em: 01 abr. 2024.

U.S. Geological Survey (USGS). **Mineral commodity summaries.** 2023. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023>. Acesso em: 02 abr. 2024.