

ESTRATÉGIAS PARA A ESTRUTURAÇÃO DAS **CADEIAS DE VALOR** **DOS MINERAIS CRÍTICOS** **E ESTRATÉGICOS** **NO BRASIL**





ESTRATÉGIAS PARA A ESTRUTURAÇÃO DAS **CADEIAS DE VALOR DOS MINERAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS NO BRASIL**

Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM

Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

AGOSTO | 2026

© 2026 Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM)

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Endereço eletrônico: <http://www.ibram.org.br>

Projeto gráfico e diagramação:
Pablo Frioli

Produção:
Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM
Profissionais do Texto (www.profissionaisdotexto.com.br)

COORDENAÇÃO TÉCNICA E EXECUTIVA - IBRAM

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

- Cinthia de Paiva Rodrigues
- Julio Cesar Nery Ferreira

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI

Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

Silvia Cristina Alves França – Diretora do CETEM
Marisa Nascimento – Coordenadora COPMA/CETEM

Equipe técnica

Lúcia Helena Xavier – Pesquisadora do CETEM e Coordenadora do estudo
Alan Pereira da Costa - SGB
Amaro Pereira - PPE/COPPE/UFRJ
Daniel Viana Ferreira - PPE/COPPE/UFRJ
Fabrício Missio - UFMG
Giorgio de Tomi - USP
Roberto Perez Xavier - ADIMB

Colaboradores:

Aline Carolina da Silva - Consultora e Pesquisadora colaboradora CETEM
Carlos Francisco Morais Teixeira Simões Gomes - Pesquisador colaborador CETEM
Jorge Luís Ferreira Boeira - Pesquisador colaborador CETEM
Lilian de Carvalho Lima - Mestranda Centro Paula Souza e Pesquisadora colaboradora CETEM
Maurício Pavan Silva - SGB

IMAGENS

- AdobeStock

PREFÁCIO E RESPONSABILIDADE

Este relatório é resultado de estudo contratado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) e coordenado pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). O conteúdo não reflete o posicionamento institucional ou opiniões particulares, mas busca apresentar argumentos técnicos relativos ao tema abordado.



AGRADECIMENTOS

O estudo foi desenvolvido sob a coordenação do CETEM e contou com a participação de pesquisadores especialistas e colaboradores. Desta forma, a equipe de pesquisadores e a coordenação agradecem aos colaboradores Aline Silva, Carlos Gomes, Jorge Boeira, Lilian Lima e Maurício Pavan pelas valiosas discussões e contribuições que somaram para a melhoria da qualidade técnica do estudo apresentado.

DIRETORIA EXECUTIVA

Pablo Cesário

Diretor-Presidente do IBRAM (interino)
Diretor de Relações Institucionais e
Assuntos Associativos

Julio Cesar Nery Ferreira

Diretor de Assuntos Minerários e
Sustentabilidade

Paulo Henrique Leal Soares

Diretor de Comunicação, Projetos e Serviços

Luciano Antonio de Oliveira Santos

Diretor Jurídico e de Compliance

CONSELHO DIRETOR

PRESIDENTE DO CONSELHO:

- **Anglo American Brasil**
Ana Sanches
Titular

VICE-PRESIDENTE DO CONSELHO:

- **Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)**
Eduardo Augusto Ayroza Galvão Ribeiro

CONSELHEIROS:

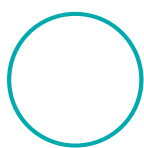
- **ALCOA WORLD ALUMINA BRASIL LTDA.**
Daniel Santos – Titular
Pâmella De-Cnop – Suplente
- **ANGLO AMERICAN MINÉRIO DE FERRO BRASIL LTDA.**
Ana Cunha – Suplente
- **ANGLOGOLD ASHANTI Córrego do Sítio Mineração LTDA.**
Luis Otávio Konflanz de Lima – Titular
Othon de Villefort Maia – Suplente
- **ARCELORMITTAL BRASIL S/A**
Sergio Botelho – Titular
- **BAHIA MINERAÇÃO S/A – BAMIN**
Eduardo Jorge Ledsham – Titular
- **COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO – CBA**
Luciano Francisco Alves – Titular
Renato Maia Lopes – Suplente

GOVERNANÇA

- **COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO - CBMM**
Ricardo Fonseca de Mendonça Lima - Suplente
- **COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL - CSN MINERAÇÃO**
Carlos Rodrigues de Campos Mello Júnior - Titular
Bernardo Garcia Sampaio - Suplente
- **COPELMI MINERAÇÃO LTDA.**
Cesar Weinschenck de Faria - Titular
Roberto da Rocha Miranda de Faria - Suplente
- **EMBÚ S.A ENGENHARIA E COMÉRCIO**
Moacir Borges de Sousa - Titular
Marco Antonio de Souza Martins - Suplente
- **KINROSS BRASIL MINERAÇÃO S/A**
Rodrigo Barsante Gomides - Titular
Fadwa Andrade Mohamadieh - Suplente
- **MINERAÇÃO CARAÍBA S/A**
Eduardo de Come - Titular
Antonio Batista de Carvalho Neto - Suplente
- **MINERAÇÃO PARAGOMINAS S/A (NORSK HYDRO BRASIL)**
Fernanda Corrêa - Titular
Caroline Fátima Lopes Teixeira - Suplente
- **MINERAÇÃO RIO DO NORTE S/A - MRN**
Guido Roberto Campos Germani - Titular
Vladimir Senra Moreira - Suplente
- **MINERAÇÃO TABOCA S/A**
José Flávio Alves - Titular
Juliana Gomes Veiga Mattar - Suplente
- **MINERAÇÃO USIMINAS S/A**
Carlos Hector Rezzonico - Titular
Marina Pereira Costa Magalhães - Suplente
- **MINERAÇÕES BRASILEIRAS REUNIDAS S/A - MBR**
Kennedy Alencar Duarte Braga - Titular
Helga Paula Patrício Franco - Suplente
- **MOSAIC FERTILIZANTES P&K LTDA.**
Rodrigo Silva Magalhães - Titular
Paulo Eduardo Batista - Suplente
- **NEXA RECURSOS MINERAIS S/A**
Jones Belther - Titular
Guilherme Simões Ferreira - Suplente
- **SAMARCO MINERAÇÃO S/A**
Najla Ribeiro Nazar Lamounier - Titular
Rodrigo Alvarenga Vilela - Suplente
- **SIGMA LITHIUM RESOURCES INC.**
Ana Cabral - Titular
Bruno Tamassia - Suplente
- **VALE S/A**
Grazielle Tallia Parenti - Titular
Lauro Angelo Dias de Amorim - Titular
Sami Arap Sobrinho - Titular
Camila Lott - Suplente
Octavio Bulcão - Suplente
Vinícius Resende Domingues - Suplente



APRESENTAÇÃO - CETEM



O aumento da demanda por minerais críticos e estratégicos tem forte relação com os processos de descarbonização inerentes à transição energética. Entender a definição de criticidade e potencial estratégico possibilita a definição de mecanismos para a promoção de cadeias de valor seguras e sustentáveis para no setor mineral. Enquanto o conceito de criticidade se baseia no risco de suprimento e impacto econômico em escala global, o potencial estratégico diz respeito à dotação e ao potencial industrial para a transformação mineral.

Enquanto a dotação mineral representa o potencial geológico por meio do estoque de recursos e reservas de um determinado território, a vocação mineral reflete o potencial produtivo por meio do conjunto: dotação, infraestrutura, capacidade produtiva instalada, mão de obra especializada e investimentos. Desta forma, apesar do protagonismo do Brasil em relação ao potencial geológico, a maturidade das cadeias de valor pode ser impactada pela ausência de elementos do conjunto, bem como pela falta de harmonização ou pela carência de políticas públicas integradas para o setor mineral e industrial.

A transição energética global exige que o Brasil converta seu estoque geológico em uma vocação produtiva consolidada e sustentável. Desta forma, a metodologia proposta mostra-se essencial para identificar gargalos e garantir que o país evolua de exportador de commodities para um protagonista tecnológico na cadeia de valor de baixo carbono.

O presente estudo propõe contribuir com a identificação e avaliação de cadeias industriais prioritárias para o setor mineral brasileiro por meio de proposta metodológica inovadora, como subsídio ao processo decisório por parte das organizações que compõem a cadeia de valor, como também para subsidiar a estruturação de políticas públicas setoriais alinhadas aos programas governamentais brasileiros. Desta forma, a partir da priorização de cadeias produtivas, o direcionamento de esforços torna-se mais eficiente e alinhado à estratégia de desenvolvimento e industrialização nacional.

SILVIA CRISTINA ALVES FRANÇA

Diretora do CETEM



APRESENTAÇÃO - IBRAM

com grande satisfação que o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em parceria com o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI), apresenta o estudo **“Cadeias Industriais Prioritárias para a Produção de Minerais Críticos e Estratégicos no Brasil”**. Este documento representa um marco fundamental para o planejamento do setor mineral brasileiro, oferecendo uma visão técnica e estratégica sobre como o país pode converter seu imenso potencial geológico em uma vocação industrial consolidada e sustentável.

Vivemos um momento de profunda transformação global. A necessidade urgente de descarbonização da economia e a aceleração da digitalização elevaram os minerais críticos e estratégicos (MCE) ao centro da geopolítica mundial. O Brasil, detentor de algumas das maiores reservas minerais do planeta, encontra-se diante de uma janela de oportunidade sem precedentes para aumentar a agregação de valor e adensar as cadeias minerais e tornar um protagonista tecnológico.

A evolução para uma potência industrial tecnológica exige o desenvolvimento de novas empresas e conhecimento. Para viabilizar essa transição, a publicação identifica oito cadeias minerais prioritárias que devem concentrar os esforços de investimento e políticas públicas: Alumínio (Bauxita), Cobre, Elementos de Terras Raras, Fosfato, Grafita, Lítio, Nióbio e Potássio.

Uma das grandes contribuições deste trabalho é a introdução do Índice para Estratégia e Densidade Mineral (IEDM). Diferente de modelos internacionais, o IEDM foi customizado para a realidade brasileira, cruzando a Densidade Produtiva, que é o quanto já somos capazes de produzir, com a Relevância Estratégica, ou seja, o quanto o mineral é vital para a nossa soberania e segurança alimentar. Esse índice funciona como uma bússola para gestores públicos e privados, permitindo diferenciar minerais que precisam de fomento inicial daqueles que já possuem dotação consolidada e exigem estratégias de expansão e internacionalização.

Além disso, o relatório explora conceitos como o *powershoring* - nossa capacidade de atrair indústrias globais devido à matriz elétrica ser mais de 85% renovável - e o Certificado Mineral de Baixo Carbono (CMBC), um mecanismo essencial para garantir que os minerais brasileiros acessem mercados premium e financiamentos sustentáveis no cenário internacional.

Este estudo se traduz em um diagnóstico e um subsídio para a estruturação de políticas públicas integradas, como o Plano Nova Indústria Brasil (NIB), e para a tomada de decisão estratégica de empresas que buscam investir na reindustrialização verde do país.

Convidamos a todos os interessados no futuro da indústria mineral brasileira a mergulharem nestas páginas, certos de que os dados aqui contidos serão instrumentos valiosos para o fortalecimento da nossa soberania nacional e para a construção de uma economia de alto valor agregado.

PABLO CESÁRIO

Diretor-Presidente interino do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM)

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO - CETEM	9
APRESENTAÇÃO - IBRAM	11
SUMÁRIO EXECUTIVO	17
1. INTRODUÇÃO	21
1.1 Breve análise da geoeconomia e da geopolítica	22
1.2 A experiência chinesa	27
1.3 Contextualização dos minerais críticos e estratégicos no Brasil	28
1.4 Conceitos e definições	31
1.4.1 Certificado Mineral de Baixo Carbono (CMBC)	32
1.4.2 Estratégias de comércio internacional	32
1.4.3 Instrumentos econômicos	33
2. MINERAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS (MCE)	37
2.1 Perspectivas nacionais e o cenário global	38
2.2 Benchmarks na cadeia de valor mineral	40
2.2.1 Alumínio (Bauxita)	40
2.2.2 Cobre	51
2.2.3 Elementos Terras Raras	64
2.2.4 Fósforo (Fosfato)	79
2.2.5 Grafita	100
2.2.6 Lítio	113
2.2.7 Nióbio	128
2.2.8 Potássio	143
3. CADEIA DE VALOR DOS MCE	159
3.1 Cadeias prioritárias para a gestão dos MCE	161

4.	METODOLOGIA	167
4.1	Perfil das empresas brasileiras na produção mineral	167
4.2	Mapeamento da cadeia de valor	169
4.2.1	Classificação dos MCE	170
4.2.2	4.2.2. Índice para Estratégia e Densidade Mineral (IEDM)	172
4.3	Análise dos MCE prioritários	186
4.3.1	Alumínio	186
4.3.2	Cobre	187
4.3.3	Elementos Terras Raras	189
4.3.4	Fosfato	190
4.3.5	Potássio	192
4.3.6	Grafita	193
4.3.7	Lítio	195
4.3.8	Nióbio	197
4.4	Aspectos da produção mineral nacional	199



5.	POLÍTICAS PÚBLICAS E A GESTÃO DOS MCE NO BRASIL	203
5.1	Eixos estratégicos	203
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	207
7.	REFERÊNCIAS	209





SUMÁRIO EXECUTIVO

Momento estratégico para traduzir a dotação geológica em vocação industrial sustentável. O relatório enfatiza que o aumento da demanda global por minerais para a descarbonização da economia e a digitalização exige que o país avance do status de tradicional exportador de concentrados minerais para referência em produção de bens de maior valor agregado. Com uma matriz elétrica composta por mais de 85% de fontes renováveis, o Brasil possui a vantagem competitiva do *powershoring*, permitindo a instalação de unidades produtivas de baixo carbono que atendam aos requisitos ambientais internacionais e aos planos nacionais de desenvolvimento tecnológico sustentável.

A adoção do Índice para Estratégia e Densidade Mineral (IEDM) oferece uma vantagem metodológica ao priorizar políticas industriais calibradas à realidade brasileira e regional. Diferente de modelos internacionais que focam prioritariamente no risco de suprimento e dependência de importação dos bens minerais, o IEDM incorpora a Densidade Produtiva (vocação e base real instalada) com a Relevância Estratégica (vulnerabilidades e potencialidades nacionais). Essa abordagem permite distinguir minerais com dotação consolidada daqueles que exigem políticas de fomento para a criação de novas capacidades, alinhando a gestão mineral à soberania nacional e às metas do plano Nova Indústria Brasil (NIB).

A integração completa da cadeia de valor, do *upstream* ao *recovery*, é identificada como o caminho necessário para superar a “armadilha das commodities”. O estudo mapeia quatro elos essenciais: a lavra (*upstream*), a transformação mineral (*midstream*), a manufatura avançada (*downstream*) e a economia circular (*recovery*). O principal gargalo nacional reside no *midstream*, onde a falta de capacidade de refino químico e de separação obriga o país a exportar minério, perdendo a oportunidade de gerar empregos qualificados que podem ser dez a vinte vezes superiores aos da extração, e obter produtos de maior valor agregado.

O direcionamento estratégico de investimentos deve priorizar as cadeias minerais com maior potencial de crescimento de demanda, assegurando que o capital e as políticas públicas foquem em setores de alta tração tecnológica. Estudos indicam que a transição energética exercerá pressões desiguais sobre o mercado, com o lítio podendo experimentar um aumento de demanda de até cinco vezes até 2040, enquanto grafita e níquel devem dobrar seu volume de mercado no mesmo período. Compreender essa dinâmica e as especificidades de cada cadeia é fundamental para que o Brasil não adote respostas de oferta homogêneas, mas sim desenhos de incentivo específicos que considerem a vulnerabilidade e a vocação

industrial de cada mineral. Ao concentrar esforços e recursos onde há maior potencial de formação de demanda e agregação de valor, o país aumenta a eficiência de sua estratégia industrial, fortalecendo a soberania e o protagonismo nacional nas próximas décadas

Oito cadeias minerais foram classificadas como prioritárias para garantir o suprimento de setores vitais como mobilidade, segurança alimentar e defesa. Com base na metodologia proposta, destacam-se o lítio, terras raras e grafita para a cadeia de baterias e ímãs, além de fosfato e potássio, essenciais para reduzir a dependência externa de fertilizantes do agronegócio brasileiro. Minerais como nióbio e alumínio, onde o país já possui liderança e verticalização, são pilares para a balança comercial e para a inserção em mercados de alta tecnologia. Assim, reconhecendo os eixos prioritários, ações adequadas podem ser empreendidas de modo mais eficiente.

A consolidação da Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE) requer uma governança estável e a aplicação de instrumentos econômicos voltados à inovação. É fundamental harmonizar regulamentações e utilizar mecanismos de incentivo, como o Certificado Mineral de Baixo Carbono (CMBC) e editais de financiamento de longo prazo, para atrair investimentos. A estratégia deve focar no adensamento tecnológico e na sustentabilidade, garantindo que o setor mineral atue como indutor da reindustrialização verde e da transformação digital do país.

A diplomacia mineral deve ser consolidada como o instrumento central para inserir o Brasil nas estratégias globais de *nearshoring* e *friendshoring*. Em um cenário de instabilidade geoeconômica, a diplomacia mineral brasileira atua para reduzir incertezas e garantir o suprimento seguro de insumos para nações parceiras que buscam diversificar seus fornecedores. Ao promover parcerias estratégicas baseadas em relações políticas e econômicas estáveis, o país atrai investimentos que visam a realocação de cadeias produtivas para territórios confiáveis, alinhando a exportação mineral às metas da Nova Indústria Brasil (NIB) e do Plano Clima. Essa estratégia fortalece a soberania nacional e permite que o Brasil atue como um elo resiliente e estratégico nas cadeias de suprimento das potências ocidentais.

Precificação dos minerais verdes e diferenciação de mercado. O Brasil possui uma vantagem competitiva singular através do *powershoring*, utilizando sua matriz elétrica altamente de fontes renováveis para produzir minerais com baixa pegada de carbono. A implementação do Certificado Mineral de Baixo Carbono (CMBC) permitirá que os produtos brasileiros acessem mercados premium e financiamentos sustentáveis, alavancando a competitividade frente a produtores com matrizes energo-intensivas poluentes. Essa valorização monetária do atributo ambiental por meio da precificação dos minerais verdes é um eixo estratégico para que o setor mineral lidere a reindustrialização sustentável do país e estabeleça novos padrões de sustentabilidade no comércio global.

Estratégia Brasileira de Minerais Críticos e Estratégicos:

Rumo ao Protagonismo Tecnológico

Ranking global e destaque estratégico



Liderança Mundial em Nióbio (Reservas Globais)

1º no ranking de produção, essencial para ligas e aeroespacial



2ª POSIÇÃO MUNDIAL

em reservas de **Grafita e Elementos de Terras Raras**, fornecedor chave para baterias e ímãs



Integração da Cadeia de Valor

Upstream

Foco na **lavra e beneficiamento** para entrega de concentrados minerais com alta eficiência e sustentabilidade.



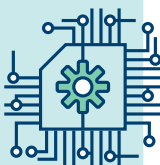
Midstream

Foco estratégico no **Midstream** para eliminar o gargalo de refino, metalurgia e produção de compostos intermediários, evitando a exportação de valor agregado.



Downstream

Manufatura avançada de componentes funcionais, como células de bateria, ímãs e materiais de alto desempenho para a indústria.



Recovery

Mineração urbana e economia circular: recuperação de metais como alumínio, cobre e ferro com abatimento de carbono. Este elo fecha o ciclo de materiais e gera mais empregos qualificados.



Foco Estratégico por Setor

Energia e Mobilidade Verde

Prioridade para **Lítio, Terras Raras, Grafita, Cobre e Níquel**, fundamentais para a eletrificação dos transportes e armazenamento de energia.

Segurança Alimentar

Foco em **Fosfato e Potássio**, classificados explicitamente como **minerais críticos** devido à alta dependência de importação para a produtividade agrícola nacional.

Tecnologia e Indústria de Base

Destaque para **Nióbio e Alumínio**, essenciais para semicondutores, defesa, construção civil e embalagens de baixo impacto.

Índice para Estratégia e Densidade Mineral (IEDM)

Relaciona a **Densidade Produtiva (DP)** — o nível da base produtiva instalada — com a **Relevância Estratégica (RE)** — o quanto o mineral reduz vulnerabilidades nacionais.

Alta DP, Alta RE
(Críticos Prioritários)
Grafita, Níquel



Alta RE, Baixa DP
(Estratégicos Emergentes)
Lítio, Terras Raras, Cobalto

Diplomacia e Cooperação



Alianças Estratégicas: Fortalecimento de relações por meio de friendshoring e cooperação internacional, visando parcerias de transformação tecnológica com a União Europeia, EUA e Ásia.



Governança e Sustentabilidade: Implementação **Certificado Mineral de Baixo Carbono (CMBC)** do para atrair financiamentos e garantir conformidade com metas globais de descarbonização (Net Zero 2050).



1. INTRODUÇÃO

A crescente importância dos minerais críticos e estratégicos para a transição energética, a digitalização da economia e a segurança das cadeias globais de suprimento levaram diversos países a reformular suas políticas industriais e seus instrumentos de financiamento ao setor mineral. Nesse contexto, o Brasil também vem estruturando um novo arcabouço institucional voltado especificamente ao fortalecimento da cadeia nacional de minerais críticos e estratégicos.

As lições aprendidas com o processo de desindustrialização nacional e crises políticas enfrentadas ao longo das últimas quatro décadas servem como ferramentas para o delineamento de novos caminhos a serem percorridos em trilhos sólidos das bases regulatórias, estabilidade econômica e potencial produtivo que o *momentum* global apresenta.

O Brasil é detentor de importantes recursos, reservas e diversidade mineral, bem como caracterizado por estágio *upstream* (extração e concentração) avançado para maior parte dos minerais produzidos. A matriz elétrica, com mais de 85% de sua origem baseada em fontes renováveis (hídrica, solar, eólica e biocombustíveis), coloca o país em posição privilegiada quanto à instalação de unidades produtivas de baixo carbono em comparação às demais nações. Este conjunto de características amplia a competitividade nacional no setor mineral, mas não garante o protagonismo brasileiro em comparação aos demais países mineradores como a China, o Canadá e a Austrália.

Com políticas de investimentos em infraestrutura, educação, tecnologia e logística que remontam ao estabelecimento do primeiro plano quinquenal (1953), a China domina o setor e se encontra confortavelmente posicionada como líder absoluta. Uma característica, no entanto, que não se apresenta com o viés de competição, mas como produto do atendimento de demandas internas que resultaram no alinhamento estratégico de competência e governança.

O Brasil encontra-se em fase de definição da Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE) para a gestão eficiente desses recursos minerais. O Projeto de

Lei nº2.780 de 2024¹ e o Projeto de Lei nº4.443 de 2025², juntamente com estudos independentes realizados ao longo dos últimos anos, são os principais documentos que norteiam a estruturação da PNMCE. As discussões buscam garantir a soberania nacional e estabelecer mecanismos de governança eficientes. A partir da prática do *friendshoring* e *powershoring*, o Brasil busca o estabelecimento de parcerias que reforcem as metas políticas, econômicas e ambientais definidas em planos governamentais como, por exemplo, o Plano Nova Indústria Brasil (NIB), Plano Clima, Plano de Transição Energética (Plante) e o Plano de Transformação Ecológica (PTE). Diante desse cenário, apresenta-se uma breve análise da geopolítica global e o posicionamento do Brasil em promover a industrialização do setor, especialmente nos elos *midstream* e *downstream*.

1.1 Breve análise da geoeconomia e da geopolítica

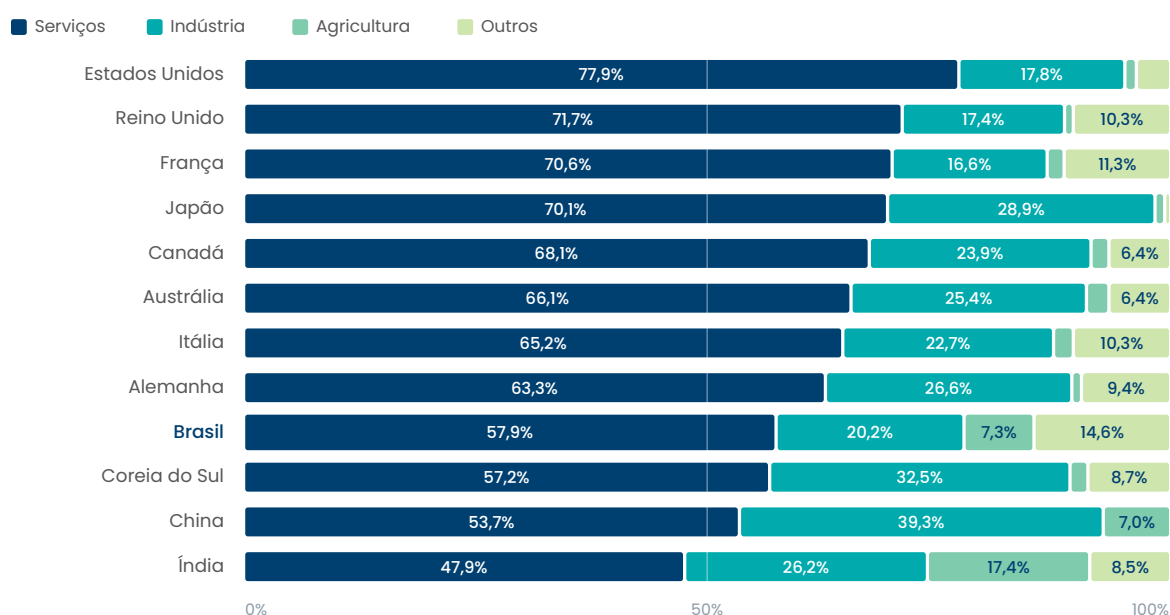
Importantes marcos da transformação estrutural da economia brasileira foram a substituição das importações e o fortalecimento da indústria nacional a partir do Plano de Integração Nacional (1956-1961) e o Milagre Econômico (1969-1973). O país passou de prioritariamente agrícola para o crescimento industrial e rápida urbanização. A década de 1980 foi caracterizada pela redemocratização, forte crise econômica e promulgação da Constituição Federal, enquanto na década de 1990 teve início a abertura econômica com estímulo aos investimentos estrangeiros, a redução de tarifas de importação e o fim das restrições para produtos estrangeiros. Os blocos econômicos como NAFTA, a União Europeia e MERCOSUL foram estabelecidos nesse período, enquanto o bloco asiático (ASEAN), com um número restrito de países, já havia sido estabelecido em 1967.

Seguiu-se o processo de desindustrialização nacional e baixa internacionalização. A partir da década de 2000 o país assegurou o setor de serviços como responsável por 70% do PIB nacional e dos empregos formais. As multinacionais brasileiras ganharam espaço com a expansão nos mercados internacionais. Ao longo das últimas duas décadas, o Brasil aumentou a participação do PIB com a indústria (20,2%) e consolidou a retomada a agricultura (7,5%) (Figura 1).

1 <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=10217621&ts=1783367311632&disposition=inline>

2 <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/170309>

3 Hay, D., 1998. Industrial Policy in Brazil: a framework. Texto para discussão nº551. IPEA.
<https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/6719873a-655d-4efc-8fa9-20afd4b57746/content>

Figura 1. Distribuição do PIB a partir dos principais setores da economia.

Fonte: Banco Mundial (2021).

Historicamente, os países latino-americanos têm aprendido mais a partir de experiências internacionais, como o estabelecimento de empresas estrangeiras no país, do que por experiências próprias (Peres e Primi, 2019⁴), como o desenvolvimento tecnológico ou estruturação de estratégias compatíveis com demandas internas. O status econômico, portanto, é produto das políticas econômicas internacionais ao longo das últimas três décadas. O Consenso de Washington⁵ pautou as bases para a política econômica na América Latina, influenciando o pensamento neoliberal.

Os minerais críticos e estratégicos (MCE) são definidos mundialmente a partir de listas governamentais publicadas e atualizadas regularmente. Apesar do entendimento quanto aos requisitos que classificam os minerais como críticos e estratégicos, poucas informações são apresentadas sobre os critérios e métodos estabelecidos para a determinação da criticidade ou potencial estratégico.

Estratégias globais de cooperação, concretizadas por meio de acordos firmados entre a China e as principais nações detentoras de recursos e reservas minerais, revelam que, em vez de considerar o país como risco, algumas nações optaram por estabelecer parcerias como resultado da Iniciativa de Cooperação Econômica e Comercial Internacional em

⁴ Peres, W. e Primi, A. 2019. "Industrial Policy and Learning: Lessons from Latin America." In *How Nations Learn: Technological Learning, Industrial Policy, and Catch-up*, edited by Arkebe Oqubay and Kenichi Ohno, 207-34. Oxford: Oxford Scholarship Online

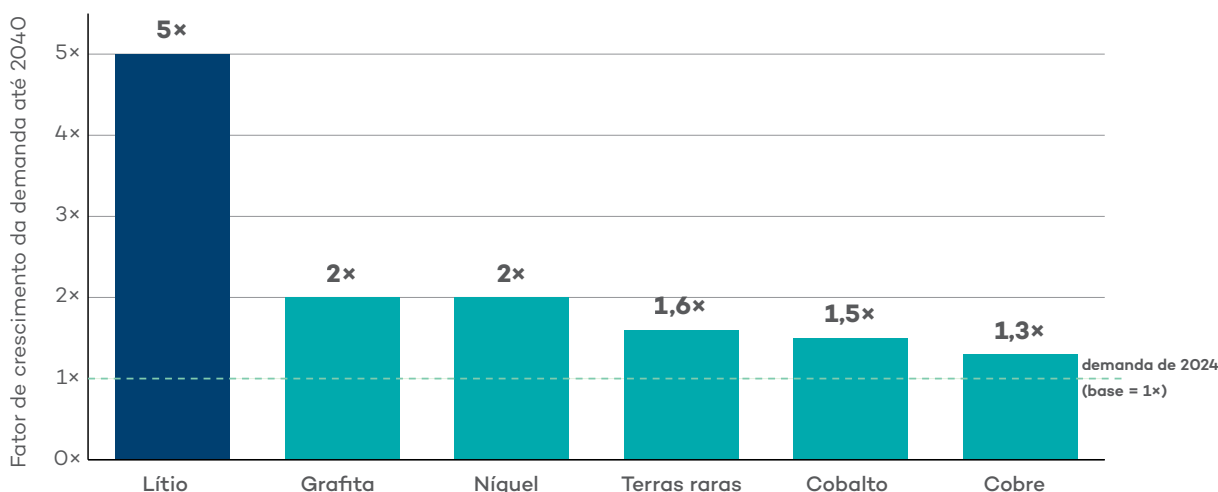
⁵ Consenso de Washington: conjunto de dez diretrizes estabelecidas por instituições como FMI e Banco mundial, no final de 1989 para incentivar a abertura comercial, privatizações e disciplina fiscal para países em desenvolvimento.

Mineração e Minerais Verdes, lançada em novembro de 2025, tendo como foco os países do G20 (Zhou, 2026). Por outro lado, no âmbito do G7 são discutidos os mecanismos de controle das exportações impostos por nações produtoras de produtos com alta tecnologia ou detentoras de recursos minerais críticos.

A região da América Latina e Caribe concentra 30% das reservas globais de minerais críticos, o equivalente a US\$ 180 bilhões em exportações anuais de metais e um valor de mercado potencial de até US\$ 770 bilhões até 2040 (BID, 2026). De acordo com recente estudo do Serviço Geológico Brasileiro (Cabral Neto, 2026), o Brasil ocupa espaço de liderança para a dotação de recursos minerais como nióbio (1º), grafita (2º), elementos de terras raras (2º), ferro (3º), níquel (3º), alumínio (5º) e vanádio (5º). O ranking global para a produção mineral nacional, apresenta como destaque o nióbio ocupando a primeira posição com 91% de todo nióbio produzido mundialmente, seguido pelo ferro (2º) com 17,5% da produção global e vanádio (4º), grafita (4º), alumínio (5º) e lítio (6º), com percentuais da produção mundial variando entre 4% para o lítio e 7% para o alumínio.

A Figura 2 revela, mais do que crescimento da demanda global, assimetria entre as cadeias – e essa assimetria é o que orienta a priorização de política. O lítio se destaca com um fator de cerca de cinco vezes até 2040, expansão puxada quase integralmente por um único uso final, a bateria, o que concentra o risco: variações na tecnologia de armazenamento (por exemplo, a difusão de baterias de sódio ou LFP) deslocam diretamente a demanda do insumo (IEA, 2025; WATARI; NANSAL; NAKAJIMA, 2020).

Figura 2. Crescimento projetado da demanda por minerais da transição energética



Cenário de Políticas Anunciadas (STEPS) — IEA (2025). Para o conjunto de tecnologias limpas, o Banco Mundial (Hund et al., 2020) projeta alta de até 500% e mais de 3 bilhões de toneladas até 2050. · Elaboração: IBRAM
Fonte: Elaborado a partir da IEA, 2025 e Hund et al., 2020.]

6 Zhou, W., 2026. East Asia Forum Quarterly, 'Resource geopolitics', Vol 18, No 1. <https://doi.org/10.59425/eabc.1772532000>

7 Panorama do potencial de minerais críticos e estratégicos do Brasil: edição 2026 <https://rigeo.sgb.gov.br/items/3e73d5fb-3cf-7-4d62-885c-cf0d303a4bec>

Grafita e níquel, com fator próximo de dois, combinam o vetor das baterias com usos consolidados – siderurgia e ligas –, o que confere maior resiliência à demanda. Terras raras e cobalto, com crescimento de 50% a 60%, distribuem-se por aplicações mais difusas, sobretudo ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro para motores elétricos e aerogeradores, segmento de elevada concentração geográfica a jusante (GOODENOUGH; WALL; MERRIMAN, 2018).

O cobre cresce 30%, o menor fator relativo, mas parte do maior mercado absoluto e responde pela eletrificação de redes e equipamentos, o que o torna estruturalmente crítico apesar do multiplicador modesto. A implicação estratégica é direta: a resposta de oferta não pode ser homogênea – cada cadeia exige um desenho próprio de incentivo, e a dependência de uma única tecnologia (caso do lítio) é fonte de vulnerabilidade que justifica diversificação de rotas e investimento em reciclagem.

A literatura recente converge em três ordens de lacunas. A primeira é de concentração e gargalo a jusante: em 2024, a participação média dos três maiores produtores dos principais minerais energéticos alcançou 77%, e a dos três maiores refinadores chegou a 86%, com a China liderando a transformação na maioria das cadeias (IEA, 2025); a criticidade, portanto, manifesta-se menos na mina e mais nas etapas de refino, separação e manufatura avançada (GRAEDEL *et al.*, 2015).

A segunda é socioambiental. Lèbre *et al.* (2020) mostraram que 84% dos recursos de platina e 70% dos de cobalto situam-se em contextos de alto risco social, ambiental e de governança, e Owen *et al.* (2023) evidenciaram a sobreposição entre projetos de minerais da transição e territórios de povos com vínculo à terra, o que condiciona a licença social para operar.

A terceira é de captura de valor, particularmente aguda no Brasil: Mindreau (2025), ao analisar a trajetória de 2010 a 2025, atribui a recorrente “armadilha das commodities” à descontinuidade de política industrial e à fragilidade de governança, que reconduziram o país à exportação de concentrados sem agregação de valor – padrão confirmado pelos dados do CTAPME, em que a maioria dos projetos aprovados se associa a concentrados minerais exportados. Soma-se a essa lacuna o subaproveitamento geológico: menos de um terço do território nacional dispõe de levantamento em escala adequada (IBRAM, 2025).

As mesmas forças que expõem as lacunas abrem janela de oportunidade. A busca de diversificação por Estados Unidos e União Europeia, diante da concentração chinesa, gera demanda por fornecedores confiáveis e por parcerias de transformação (IEA, 2025; EUROPEAN UNION, 2024). O Brasil reúne dotação singular – a maior reserva mundial de nióbio e posição de destaque em terras raras, grafita, níquel e lítio – e um mercado interno capaz de absorver produtos de maior valor agregado (IBRAM, 2024a; IBRAM, 2025).

De modo geral, os países podem ser classificados em países detentores ou não de dotação mineral e países detentores ou não de processos produtivos. A combinação da dotação mineral e da maturidade produtiva posiciona os países em excelente posição em relação à redução de incertezas ao longo da cadeia de valor mineral por garantia de suprimento e viabilidade econômica. A China, em sua diversidade e volume de reservas minerais, bem como capacidade produtiva superior, possui a dominância no setor, enquanto países como Austrália, Canadá, Rússia e Estados Unidos combinam capacidade produtiva e diversidade

mineral em escala intermediária. Países africanos como Gabão (manganês, ouro), Zimbábue (platina e lítio) e Congo (cobalto, cobre), países latino-americanos como Chile (cobre), Peru (cobre e estanho), Bolívia (lítio) e alguns países asiáticos, Filipinas (níquel e cobre), Malásia (estanho) e Indonésia (níquel e estanho) combinam reservas e produção de um conjunto restrito de minerais estratégicos.

Países com poucas ou nenhuma reserva mineral, mas com nível avançado de industrialização no setor, como alguns países europeus, Singapura, Coreia do Sul e Japão são importantes compradores de concentrados minerais e avançam nos estágios *midstream* e *downstream*. Países europeus⁸, estabeleceram mecanismos de garantia de suprimento mineral a partir da busca por fontes diversificadas e mecanismos de estocagem para reduzir a dependência da China. Esse movimento ainda inclui a obtenção de insumos a partir de fontes secundárias, como produtos e matérias pós-consumo, por meio da mineração urbana⁹.

Países como a Indonésia, que priorizou o processamento de níquel, Argentina, Chile, Zimbábue e a Namíbia, que priorizaram a produção de lítio, em razão das grandes reservas minerais que possuem, o Brasil possui uma significativa diversidade e volume mineral ainda pouco explorados nos estágios *midstream* e *downstream*, prevalecendo a exportação de concentrado mineral no estágio *upstream* para a maioria dos minerais. O estabelecimento de acordos para a produção de minerais críticos e estratégicos na América Latina têm se ampliado a partir de investimento chinês a partir de empresas como *Ganfeng Lithium*, *Zijin Mining Group* e *BYD*¹⁰ que ampliam a atuação chinesa no setor e contribuem para o adensamento da cadeia produtiva mineral na região.

O Banco Mundial estimou que a implantação de tecnologias para a geração de energia alternativa, como eólica, solar e geotérmica exigirá mais de três bilhões de toneladas de minerais e metais até 2050, com elevação de até 500% na produção de insumos como grafita, lítio e cobalto (HUND *et al.*, 2020). A Agência Internacional de Energia (IEA) informou que os minerais de importância para a transição energética como cobre, níquel, cobalto, grafita, terras raras e lítio apresentam um aumento na demanda anual em torno de 10%, enquanto minerais básicos como alumínio, chumbo e zinco apresentam um crescimento anual de 1%.

O lítio apresentou a maior curva de crescimento de demanda com um aumento anual de 25% na demanda nos anos de 2024 e 2025 e apenas em 2025 a demanda do lítio para a fabricação de baterias expandiu em 60%, impulsionando a produção na África em surpreendentes 44% (IEA, 2026¹¹), destacando países como Zimbábue, Namíbia e Congo que passaram a restringir a exportação do concentrado. Zimbábue se tornou em 2026 o primeiro país africano a exportar sulfato de lítio a partir de investimento e transferência de

8 https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en

9 Mineração urbana: processo sistemático de coleta, desmontagem, separação, beneficiamento e refino destinado a recuperar minerais críticos estratégicos e demais materiais de valor contidos nos estoques antropogênicos urbanos – resíduos eletroeletrônicos, baterias, veículos em fim de vida, entulho de construção e aterros. (PL nº2.780 de 2024).

10 <https://www.observachina.org/articles/o-investimento-chines-em-minerais-criticos-na-america-do-sul>

11 IEA, 2026. Global Critical Minerals Outlook 2026 – Analysis. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/2831e0dc-f030-4d14-985c-d26d1af4430f/GlobalCriticalMineralsOutlook2026.pdf>

tecnologia chinesa. A inovação no setor no Zimbábue tem sido acompanhada de reforço na infraestrutura com investimentos na operação de malha ferroviária a partir de iniciativas integradas entre o poder público e iniciativa privada nacional e internacional¹².

Esse reposicionamento converte o subsolo em ativo geopolítico. A concentração da oferta e produção amplifica o risco de suprimento, enquanto a cooperação pode ampliar as possibilidades de crescimento do setor. Em 2024, a participação média dos três maiores países produtores dos principais minerais energéticos alcançou 77%, e a dos três maiores refinadores chegou a 86%, com a China liderando a etapa de transformação na maioria das cadeias produtivas para o setor (IEA, 2025).

A demanda por lítio se concentra prioritariamente na produção de baterias, onde a China é responsável por 90% da demanda global de lítio, seguida pela Coreia (4,2 kt) e Europa Central (1,4 kt) (IEA, 2026). Apesar da queda de preço do lítio experimentada nos últimos dois anos, a recuperação ocorreu de forma acentuada no início de 2026, com o carbonato de lítio atingindo cerca de US\$ 20 mil por tonelada, impulsionada pelas restrições impostas pelo Zimbábue à exportação de concentrado, bem como o estabelecimento de restrições ambientais à concessão e renovação de licenças na região de Jiangxi (China)¹³ (IEA, 2026).

1.2 A experiência chinesa

As principais cadeias globais de suprimento mineral são dominadas pela China que investiu desde a década de 1980, quando passou a investir em reservas minerais no continente africano e países com importantes reservas minerais em outros continentes, como Peru e Indonésia, com o objetivo de suprir a demanda interna e como estratégia geopolítica (Carballo *et al.*, 2024¹⁴; Kalisky, 2025¹⁵).

A partir da evolução dos planos quinquenais chineses, que possibilitam previsibilidade e continuidade dos programas de Estado, verifica-se um foco prioritário da criação de uma indústria de base pesada a partir da década de 1950 (1953-1957¹⁶), quando foram

¹² Mining Indaba. <https://miningindaba.com/pt/articles/zimbabwe-opens-new-rail-route-for-lithium-exp>

¹³ <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/lithium-surges-china-after-local-authorities-announce-plan-revoke-mining-2025-12-17/>

¹⁴ Carballo, A.E., Davas-Fahey, R., Hill, C., 2024. Digging Deeper: Understanding the global Chinese mining sector. Transparency International. https://transparency.org.au/wp-content/uploads/2024/11/Digging-Deeper_Global-Chinese-Mining-Sector_2024.pdf

¹⁵ Kalisky, Y., 2025. China's takeover of global minerals market. The Institute for National Security Studies. https://www.inss.org.il/social_media/chinas-takeover-of-the-global-minerals-market/

¹⁶ <https://www.ebsco.com/research-starters/history/china-begins-its-first-five-year-plan>

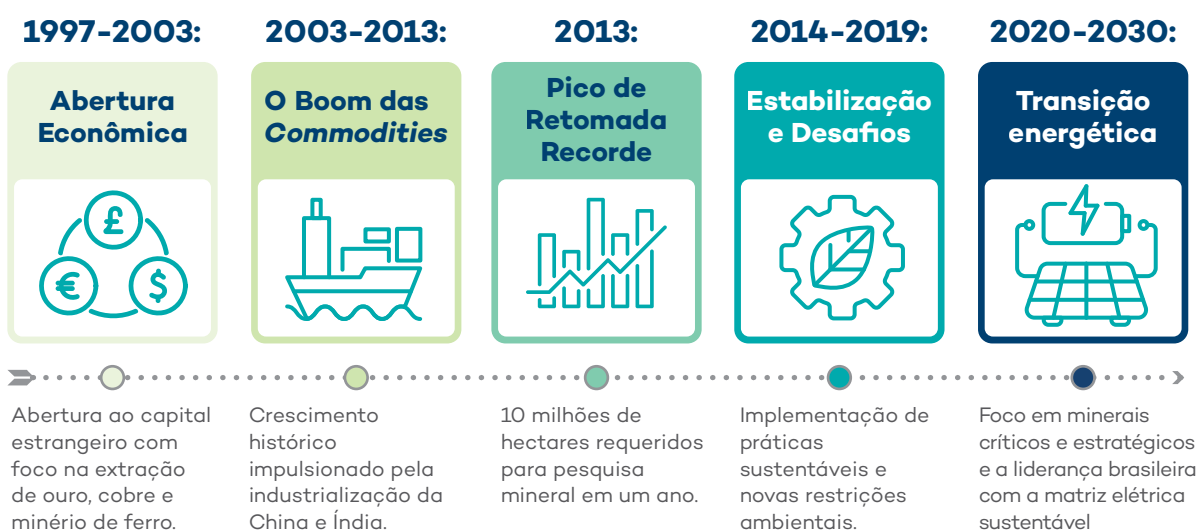
implementados centenas de projetos industriais, 4 mil km de linhas férreas e 10 mil km de rodovias¹⁷ e deu início a fase de recuperação e consolidação econômica.

Os planos seguintes marcaram a expansão da indústria, crescimento econômico, desenvolvimento social, desenvolvimento da agricultura, atendimento à demanda populacional por alimentação e vestuário, avanço da ciência e tecnologia, melhoria da infraestrutura, qualidade da produção, desenvolvimento do transporte, energia, comércio, comunicação, cultura e educação. A reforma e abertura da China a partir da década de 1980 marcaram o rápido crescimento econômico. O problema de alimentação e vestuário para a população foi solucionado na década de 1990, e o governo seguiu investindo no suprimento das demandas internas. O excedente produtivo passou a ser direcionado a outros países a partir de acordos e de um forte planejamento e centralização das decisões.

1.3 Contextualização dos minerais críticos e estratégicos no Brasil

O Brasil reúne dotação geológica relevante em vários desses minerais e um mercado interno capaz de absorver produtos de significativo valor agregado, condição que o habilita a deixar a posição de exportador de concentrados minerais e a disputar segmentos intermediários e avançados das cadeias globais (IBRAM, 2024a; IBRAM, 2025). A partir das políticas públicas implementadas para a industrialização nacional e das demandas estabelecidas internacionalmente, o setor mineral brasileiro apresentou a alternância de períodos de produção com maior ou menor grau de especialização (Figura 3).

Figura 3. Evolução histórica do setor mineral brasileiro.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

¹⁷ <https://www.ourchinastory.com/en/11867/What-is-a->

O superciclo mundial das commodities (2003–2013) favoreceu o crescimento da mineração no Brasil, com taxas recordes, impulsionado pela demanda por metais como suporte ao processo de industrialização em países emergentes, como China e Índia¹⁸.

Conforme estudo desenvolvido pelo CETEM (Rosental, 2008¹⁹), o Brasil foi importante produtor mundial de óxidos de terras raras. A produção a partir da monazita na década de 1940 era realizada em São Paulo pela Usina Santo Amaro (USAM), pertencente às Indústrias Químicas Reunidas S/A (ORQUIMA) e no Rio de Janeiro pela Usina de Praia (UPRA), pertencente à Sociedade Comercial de Minérios Ltda (SULBA). As empresas ORQUIMA, NUCLEMON (criada pela NUCLEBRAS), INB (sucede a NUCLEBRAS) e o IEN foram responsáveis, por décadas, pela exploração mineral no norte do estado do Rio de Janeiro, sul do Espírito Santo e sul da Bahia. As atividades foram encerradas a partir da década de 1990.

O atual processo de reindustrialização nacional, impulsionado pelo Plano Nova Indústria Brasil (NIB), apresenta diferenças fundamentais em relação à primeira onda de industrialização brasileira ocorrida na década de 1950. Enquanto o modelo de meados do século XX era centrado primordialmente nas indústrias de base e na estratégia de substituição de importações, o NIB direciona seu foco para a digitalização, a automação e a transição ecológica. Essa mudança de paradigma também se reflete no contexto da sustentabilidade, visto que o modelo antigo frequentemente ignorava os impactos ambientais, ao passo que o plano atual exige metas severas de descarbonização e conformidade com padrões de sustentabilidade.

No que diz respeito à inserção global, o objetivo anterior de isolamento do mercado interno deu lugar à busca pela integração em cadeias globais de valor tecnológico. Além disso, o papel do Estado foi redefinido: de proprietário e executor direto de indústrias, como exemplificado historicamente pela Vale e Petrobras, o Estado passou a atuar como financiador e indutor do desenvolvimento por meio de parcerias público-privadas.

Essas transformações geram efeitos diretos e significativos na cadeia de produção mineral, começando pelo estímulo ao adensamento tecnológico para a transformação local de minérios em produtos de alto valor agregado, como ligas metálicas avançadas. O cenário atual também prioriza os minerais estratégicos, voltando esforços para a extração e o refino de lítio, cobre, níquel e terras raras, fundamentais para atender à crescente demanda por baterias. Paralelamente, há uma pressão crescente pela descarbonização da própria extração mineral, incentivando a adoção de hidrogênio verde e de frotas elétricas em operações de grande porte. Por fim, o setor é impulsionado em direção à economia circular, com incentivos voltados à reciclagem de rejeitos minerais e ao reaproveitamento de metais, visando reduzir o impacto da extração primária.

O Plano Nacional de Mineração 2030 apresentou de forma pioneira o conceito de minerais estratégicos. Os minerais foram reunidos inicialmente em três grupos: (i) minerais abundantes e relevantes para a balança comercial, como ferro e nióbio; (ii) minerais com elevada

18 <https://blog.jazida.com/exploracao-mineral-no-brasil-desafios-e-oportunidades-na-era-da-transicao-energetica/>

19 <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1140/1/36%20TERRAS%20RARAS%20ok.pdf>

dependência de importação e vitais para a economia, como os destinados a fertilizantes, e; (iii) minerais carreadores de metais para tecnologias avançadas, como terras raras, lítio, tântalo e vanádio (BRASIL, 2011).

O Decreto nº10.657 de 2021 apresenta a Política Pró-Minerais, abordando aspectos do licenciamento, mas também estabelecendo os critérios para a definição dos minerais estratégicos. A Resolução CTAPME nº2 de 2021²⁰, do MME, apresentou a lista brasileira de minerais estratégicos, organizada nos três grupos:

- Bens dos quais o país depende para setores vitais (enxofre, fosfato, potássio, molibdênio);
- Bens de aplicação em alta tecnologia (cobalto, cobre, estanho, grafita, metais do grupo da platina, lítio, nióbio, níquel, silício, tálio, tântalo, terras raras, titânio, tungstênio, urânio, vanádio); e
- Bens nos quais o país detém vantagens competitivas (alumínio, cobre, ferro, grafita, ouro, manganês, nióbio, urânio) (BRASIL, 2021b).

O PNM 2050, coordenado pela Secretaria Nacional de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SNGM) do Ministério de Minas e Energia (MME), posiciona o Brasil como protagonista na nova geoeconomia global com potencial contribuição para a transição energética, segurança alimentar e segurança mineral. O PNM 2050 tem como foco o conhecimento geológico, ambiente regulatório estável, capacidade de investimento, inovação tecnológica, responsabilidade socioambiental e coordenação entre políticas públicas, bem como apresenta três níveis de implementação, conforme detalhado a seguir.

- **Visão de longo prazo:** estabelecimento dos objetivos estratégicos e diretrizes da política mineral brasileira, conforme apresentado no próprio PNM 2050, estabelecendo os eixos prioritários e as responsabilidades ao longo da cadeia de valor mineral.
- **Plano de metas e ações:** instrumento tático-operacional a partir do qual se estabelece detalhes dos mecanismos operacionais para a implementação da política, ou seja, traduz as diretrizes em iniciativas concretas, exigindo o fortalecimento da governança com a estruturação de instituições robustas, com funções bem definidas e atuação sinérgica em alinhamento com a política nacional.
- **Sistema de Monitoramento, Avaliação e Revisão:** acompanhamento e avaliação do estágio operacional com o objetivo de identificar gargalos e permitir alinhamento estratégico e correções necessárias para a efetiva implementação das diretrizes.

A partir do PNM 2050 são definidos indicadores relevantes para o monitoramento do PNM 2050, conforme apresentado na Tabela 1.

²⁰ <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-avanca-na-implementacao-da-politica-pro-minerais-estrategicos/Resoluon02SGM.pdf>

Tabela 1. Alguns indicadores para o monitoramento do PNM 2050.

Indicadores	Metas			
	Atual	2030	2040	2050
Participação da mineração no PIB (base 2021)	3,3 %	3,6 %	4 %	4,5 %
Empregos diretos (base 2024)	1.022.055	1.115.000	1.240.000	1.395.000
IDHM para municípios com atividade minerária (base 2024)	(consolidando)	+4,4%	+7,5%	+5%
Intensidade tecnológica do setor mineral brasileiro (base 2022/2023)				
Extrativa	0,30%	0,50%	1,00%	1,25%
Metalurgia	0,24%	0,35%	0,50%	0,70%
Transformação de não-metálicos	0,50%	0,55%	0,60%	0,65%
Tempo médio de análise de processos minerários (dias)	1.563	1.300	980	780
Participação brasileira na produção mundial de minerais críticos e estratégicos	8,3%	9%	10,5%	12,2%
Dependência externa de P e K	87,3%	53,8%	37,3%	34,9%

Fonte: Elaborada pelos autores a partir da PNM 2050.

O crescimento da participação brasileira na produção mundial de MCE, como resultado da competitividade industrial, pode ser impulsionado por um ambiente produtivo favorável. Desta forma, deve-se priorizar estratégias e políticas públicas que possibilitem, por exemplo, o direcionamento de investimentos para inovação tecnológica, infraestrutura (transporte, água, energia) e formação e capacitação de mão de obra qualificada, bem como o estabelecimento de segurança jurídica, segurança socioambiental e carga tributária compatível.

1.4 Conceitos e definições

O gerenciamento eficiente de recursos minerais requer uma estratégia consistente com as metas governamentais, resguardando os direitos sociais, a saúde ambiental e a soberania nacional. Uma equação bastante complexa que exige a articulação de diferentes áreas de conhecimento, instâncias decisórias e de governança, bem como a definição de prioridades em conformidade com os planos nacionais de governo. O argumento amplamente debatido

sobre a redução da dependência da dominação da China em maior parte das cadeias de valor dos minerais críticos e estratégicos parece não se aplicar ao modus operandi brasileiro, mas sim alinhado com as perspectivas europeias explicitadas nos pilares do *European Critical Raw Material Act*²¹ e a dependência da China pelos Estados Unidos²² de mais de 50% dos minerais demandados para sua indústria.

Na definição dos critérios da governança é importante considerar o conteúdo e alinhamento de conceitos e princípios para o melhor estabelecimento de limites e convergência em relação às estratégias nacionais e não simplesmente a adoção de conceitos e metas internacionalmente definidos. Desta forma, alguns dos principais conceitos relacionados ao gerenciamento dos minerais críticos e estratégicos são detalhados a seguir.

1.4.1 Certificado Mineral de Baixo Carbono (CMBC)

Mecanismos de descarbonização têm sido priorizados para diferentes setores produtivos e a transição energética, com a redução do uso de combustíveis fósseis, representa uma das principais iniciativas. A proposta do CMBC, a partir do Projeto de Lei nº2.780 de 2024, busca viabilizar acesso à financiamentos para empreendimentos sustentáveis a partir da certificação de processos de produção mineral de baixo carbono. A matéria é instituída de modo amplo pela Lei nº15.042 de 2024²³, que instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases do Efeito Estufa (SBOE) e possibilita a negociação de Cotas Brasileiras de Emissão (CBEs) e créditos de carbono. O setor mineral tem previsão de regulamentação até 2029²⁴.

1.4.2 Estratégias de comércio internacional

Como resultado dos impactos da Covid-19, que resultou na instabilidade geopolítica global, e na contramão da globalização que promovia o movimento *offshoring* por meio da ampliação do alcance das relações comerciais na busca de menores custos, iniciou-se um debate sobre a ideia de retomar a produção em economias avançadas (Capello *et al.*, 2026²⁵). Assim, a busca por reduzir incertezas nas relações comerciais e garantia de suprimento resultou no fenômeno de *reshoring* que propõe correções do *offshoring*. Desta forma, *reshoring* compreende realocação de atividades e estratégias de negócio para

21 https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en

22 <https://www.cfr.org/articles/us-critical-minerals-dilemma-what-know>

23 https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm

24 <https://b4.capital/pt/sbce-publica-cronograma-monitoramento-de-7-setores-da-industria-para-inicio-2027/>

25 Capello *et al.*, 2026. Shifting production, shifting returns: *Nearshoring* and functional income redistribution. International Economics. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2026.100703>

um país próximo (*Nearshoring*) ou nações com boas relações econômicas e geopolíticas (*Friendshoring*) (Rocha et al., 2025²⁶).

*Powershoring*²⁷, por sua vez, compreende a realocação de setores industriais energo-intensivos para regiões com oferta abundante e competitiva de energia alternativa com o propósito de descarbonização. Nesse ponto, o Brasil se destaca em razão de possuir a matriz elétrica mais sustentável do mundo a um custo acessível.

1.4.3 Instrumentos econômicos

Os instrumentos econômicos encontram-se parcialmente regulamentados para o setor mineral. Não existem ainda processos normativos que especifiquem a implementação de instrumentos econômicos especificamente para os minerais críticos e estratégicos. Os instrumentos econômicos podem ser compreendidos como mecanismos de incentivos ou desincentivos econômicos, conforme detalhado a seguir.

Tabela 2. Exemplo de instrumentos econômicos para o setor mineral de extração e transformação.

INSTRUMENTO	REFERÊNCIA	TIPO
Incentivo econômico - bônus		
Lei Kandir - Isenção do ICMS sobre produtos e serviços voltados para a exportação	Lei Complementar nº87 de 1996	Isenção fiscal
A Lei do Bem - redução do IRPJ e da CSLL, para empresas que investem em pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica	Lei nº11.196/2005	Isenção fiscal
Financiamento BNDES e Finep Ex. Contrato Novo Fundo Clima (BNDES e União) (2024), FIP Minerais estratégicos – lançado em parceria entre o BNDES e a Vale promove o financiamento de empresas juniores de pesquisa (2024) e exploração mineral e Chamada pública para transformação de minerais estratégicos (2025).	Editais	Crédito
Fundo Garantidor da Atividade Mineral (FGAM)	Projeto de Lei nº2.780 de 2025	Incentivo

26 Rocha, A., da Fonseca, L.N.M., Kogut, C.S., 2025. Deciphering relocation paths: a systematic literature review of near-shoring and friend-shoring. J. Int. Manag. 31 (5), 101282. <https://doi.org/10.1016/j.intman.2025.101282>

27 Arbache, J. (2022). Powershoring. Development Bank of Latin America and the Caribbean (CAF). <https://www.caf.com/en/blog/powershoring/>

INSTRUMENTO	REFERÊNCIA	TIPO
Mining Hub, InvestMining, Invest Minas – ecossistemas de inovação para mineração	Rodadas de negócio	Hub de investimentos
Desincentivo econômico - ônus		
Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) – paga por empresas ao governo brasileiro pela extração mineral, com distribuição entre municípios, estados e órgãos federais.	Lei nº13.540 de 2017	Compensação
Imposto seletivo (IS)	Lei Complementar nº214 de 2025	Tributação
Apuração e fiscalização de infrações	Decreto nº6.514 de 2008	Multas e sanções
	Decreto nº11.197 de 2022	
	Resolução ANM nº122 de 2022	
	Resolução ANM nº223 de 2025	

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

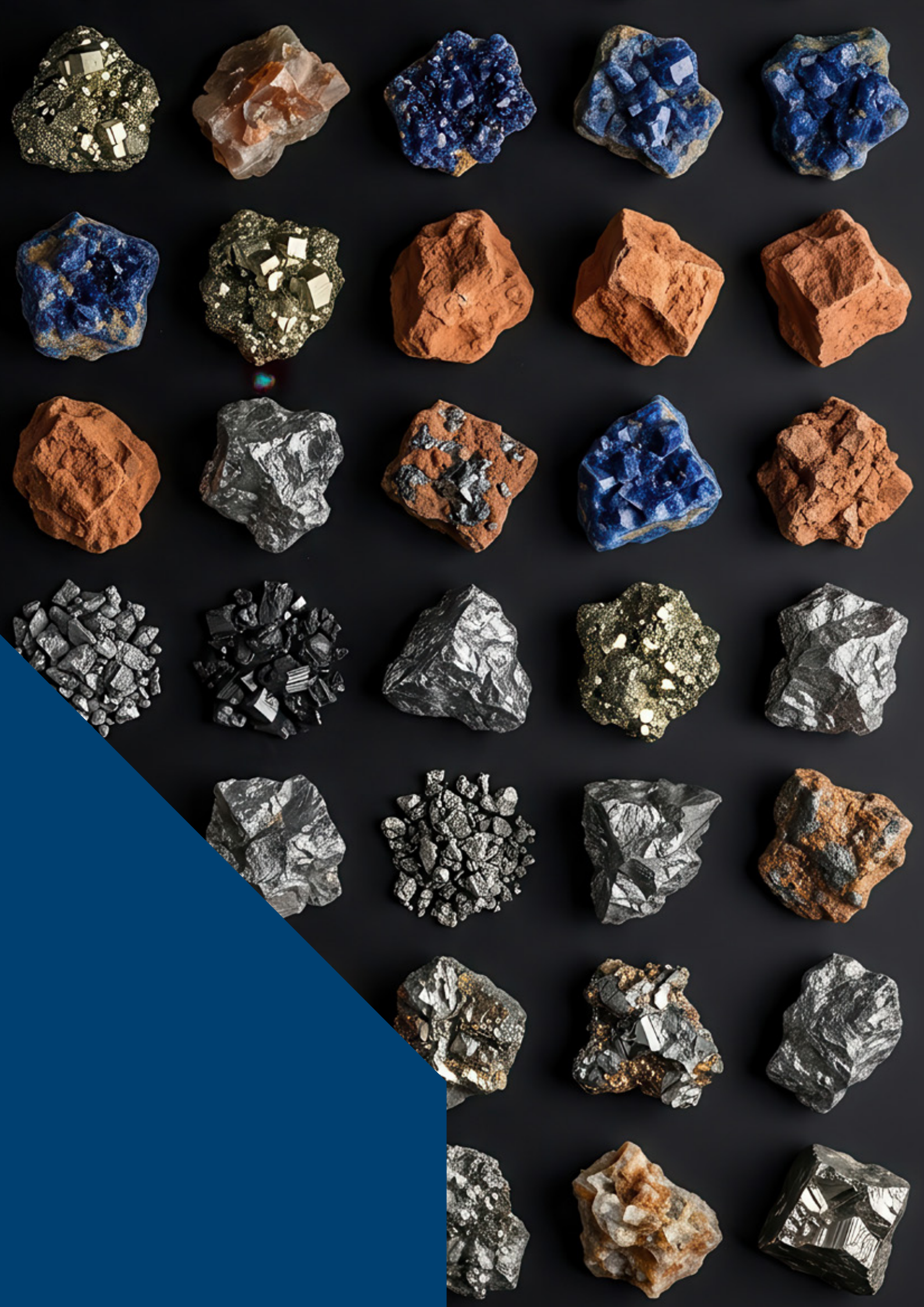


Conforme detalhado na Tabela 2, a diversidade de regulamentações e editais estipula critérios para a implementação de instrumentos econômicos de bonificação ou de ônus. No entanto, ainda se verifica uma significativa fragilidade quanto ao estabelecimento de incentivos que considerem especificidades dos diferentes elos da cadeia de valor, a transparência das aplicações dos valores arrecadados e ao controle da política tributária. Recente auditoria do Tribunal de Contas da União (TCU) apontou uma dívida acumulada de mais de R\$ 70 bilhões em dívidas do setor mineral com o governo federal²⁸, uma condição inconsistente com a concessão de benefícios fiscais pelo próprio governo.

Nesse sentido, outro mecanismo contraditório é o estabelecimento da Taxa de Controle, Monitoramento e Fiscalização das Atividades de Pesquisa, Lavra, Exploração e Aproveitamento de Recursos Minerários (TFRM), uma taxa estadual cujo processo de aplicação não tem encontrado segurança jurídica ou transparência nos repasses aos municípios produtores. Além disso, o efeito cascata e guerra fiscal se instalaram quando municípios começaram a instituir taxas próprias de fiscalização minerária, como Parauapebas (PA), Canaã dos Carajás (PA), Itabira (MG) e Mariana (MG). Desta forma, a gestão dos impactos socioambientais não tem recebido amparo pelo efetivo repasse dos recursos. O cenário resulta em importantes debates objetivando a disciplina regulatória, tributária e, especialmente, a fiscalização.

A ausência de instrumentos econômicos específicos para os MCE limita a capacidade do Estado de direcionar investimentos e incentivar o adensamento tecnológico das cadeias de valor mineral. A experiência internacional indica que países com políticas tributárias diferenciadas para minerais de importância estratégica obtiveram avanços na atração de capital para projetos de beneficiamento e refino (SCHRIJVERS *et al.*, 2020). A estruturação de mecanismos de incentivo que contemplem as especificidades de cada elo da cadeia, do *upstream* ao *recovery*, constitui requisito para a efetividade da PNMCE.

28 <https://observatoriodaminerao.com.br/setor-mineral-acumula-r-73-bilhoes-de-dividas-enquanto-congresso-prepara-novo-pacote-de-incentivos-com-o-pl-dos-minerais-criticos/>



2. MINERAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS (MCE)



A definição de um mineral como crítico é realizada a partir da análise de duas dimensões combinadas: o risco de suprimento e a importância econômica. Graedel *et al.* (2015) consolidaram a avaliação multidimensional que orienta as principais metodologias atuais, incorporando concentração geográfica da produção, governança dos países fornecedores, substitutibilidade e potencial de reciclagem.

A União Europeia operacionaliza esse referencial ao classificar como críticas as matérias-primas que superam simultaneamente limiares de risco de suprimento e de importância econômica, revisando a lista a cada três anos – em 2023 foram avaliados 87 materiais (EUROPEAN COMMISSION, 2023). O *Critical Raw Materials Act*²⁹ distingue, ainda, matérias-primas estratégicas – vinculadas a tecnologias de descarbonização, digitalização, defesa e aeroespacial – e fixa metas de capacidade doméstica de extração, processamento e reciclagem (EUROPEAN UNION, 2024).

A distinção entre criticidade e estratégia é central para o desenho de política para minerais críticos e estratégicos. Um mineral é crítico quando combina alto risco de suprimento, alta importância econômica e tecnológica no âmbito global; é estratégico o mineral que confere vantagem competitiva ao país que possui significativa dotação, potencial produtivo e demanda. A título de exemplo, minerais nos quais o Brasil dispõe de dotação abundante e apresentam baixo risco de suprimento interno, como nióbio, permanecem estratégicos pela inserção em cadeias de alto valor. Por outro lado, o alto grau de dependência da importação e baixa produção de fosfato e potássio caracterizam esses minerais como altamente críticos para o país.

O Brasil possui papel estratégico no setor mineral global, impulsionado por sua extensão territorial e diversidade geológica. Para gerir esse potencial, o Projeto de Lei nº2780/2024 propõe a criação da Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE), estabelecendo distinções fundamentais entre as duas categorias de minerais.

²⁹ https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en

Os minerais críticos são definidos como aqueles cuja disponibilidade enfrenta riscos reais ou potenciais de interrupção devido às limitações na produção ou na cadeia de suprimentos. Sua essencialidade reside no fato de serem indispensáveis para setores vitais da economia, e sua escassez pode comprometer objetivos nacionais estratégicos, como assegurar a transição energética, garantir a segurança alimentar (por meio de insumos para fertilizantes) ou resguardar a segurança nacional.

Já os minerais estratégicos são caracterizados pela importância econômica que derivam das vantagens comparativas do Brasil. Eles são considerados essenciais para a economia nacional por sua capacidade de gerar superávit na balança comercial. O Brasil detém reservas expressivas de diversas dessas substâncias, sendo o maior produtor mundial de nióbio (com 94,1% das reservas mundiais) e possuindo reservas significativas de grafita, minério de ferro, manganês e elementos terras raras (Cabral Neto *et al.*, 2026).

A proposta da PNMCE visa não apenas fomentar a pesquisa e a lavra, mas também incentivar a transformação mineral, que consiste no processamento destinado a obter novos produtos a partir da alteração química dos minerais. O objetivo final é internalizar valor, fortalecer a indústria nacional e ampliar a competitividade do País no mercado global, garantindo que a exploração desses recursos ocorra de maneira sustentável e com responsabilidade socioambiental.

2.1 Perspectivas nacionais e o cenário global

Segundo Cabral Neto *et al.* (2026), o Brasil destaca-se no cenário mineral global por sua ampla e diversificada dotação mineral, fundamental às cadeias produtivas de alta tecnologia, segurança alimentar e transição energética. A ampla diversidade de ambientes geológicos do território nacional abriga depósitos minerais de elevada importância econômica, incluindo jazidas de classe mundial, o que permite ao país figurar entre os principais detentores de reservas e produtores de diversas commodities minerais, classificadas como estratégicas pela Política Pró-Minerais Estratégicos - Decreto nº10.657 de 2021, voltada ao desenvolvimento de infraestrutura, transição energética, alta tecnologia, segurança alimentar e defesa.

As perspectivas nacionais para esses bens minerais podem ser analisadas a partir de quatro critérios principais: dotação mineral e posição no ranking mundial; mercado potencial e vocação brasileira; aplicação tecnológica; e demanda global associada à segurança estratégica.

No que se refere à dotação mineral e à posição relativa no cenário internacional, o Brasil apresenta vantagens comparativas significativas. O minério de ferro permanece como uma das principais commodities da pauta mineral brasileira, com expressiva participação nas exportações nacionais, assegurando a segunda posição na produção global e a quinta maior reserva mundial.

O país é líder mundial em reservas e produção de nióbio, respondendo por parcela majoritária da oferta global, com destaque para os distritos minerais de Araxá, em Minas Gerais, e Catalão, em Goiás. Também se destaca na grafita, por possuir a segunda maior reserva mundial e ser o

quarto maior produtor, bem como nos elementos terras raras, cujos recursos posicionam o Brasil como o segundo maior detentor global, embora a produção seja incipiente. Nesse segmento, merece destaque o avanço recente de projetos nos estados de Goiás e Minas Gerais voltados à extração de terras raras a partir de depósitos em regolitos, onde estas se ligam de forma iônica (adsorção) a argilo-minerais (MINERAÇÃO SERRA VERDE, 2016; PINTO-WARD, 2017; 2025; VIRIDIS MINING & MINERALS LIMITED, 2025; MINERAÇÃO TERRAS RARAS S.A., 2024).

O Brasil ainda está na lista das 5 maiores reservas de terras raras (2º), bauxita (5º), estanho (5º), tântalo (3º), manganês (4º), níquel (3º); e entre os 5 maiores produtores de Bauxita (4º), estanho (5º), tântalo (4º) e silício (3º), todos bens minerais com elevada aderência às demandas associadas à transição energética e tecnologias de baixo carbono, economia digital para indústrias de base, eletrônica, e metalurgia avançada.

Lítio, níquel, grafita, elementos terras raras e cobre são insumos essenciais para baterias, veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia, turbinas eólicas, motores elétricos e ímãs permanentes. O nióbio e o tungstênio, por sua vez, são empregados em ligas especiais e materiais de alto desempenho, com aplicações nos setores aeroespacial, automotivo, energético e de defesa. O silício, obtido a partir de quartzo de alta pureza, constitui matéria-prima estratégica para semicondutores e painéis fotovoltaicos, enquanto o tântalo e o estanho são amplamente utilizados em capacitores, soldas eletrônicas e componentes da indústria eletroeletrônica.

A demanda global por esses minerais é impulsionada por processos estruturais, como a descarbonização da economia, a eletrificação dos transportes, a expansão das energias renováveis, a digitalização industrial e a busca por segurança de suprimento. No âmbito nacional, a disponibilidade de potássio e fósforo assume dimensão estratégica adicional, diretamente relacionada à segurança alimentar. A elevada dependência externa de fertilizantes, especialmente fosfatados e potássicos, evidencia a necessidade de ampliar o conhecimento geológico, estimular a pesquisa mineral e desenvolver cadeias produtivas capazes de reduzir as vulnerabilidades do agronegócio brasileiro.

Dessa forma, a combinação entre abundância de recursos naturais, diversidade geológica, matriz energética de baixo carbono, estabilidade institucional e políticas públicas voltadas à ampliação do conhecimento geológico, como o PlanGeo 2026–2035, consolida o Brasil como um território altamente competitivo para investimentos minerais (SGB 2026).

A vocação mineral brasileira, entretanto, não se restringe à extração e exportação de bens primários. O cenário atual aponta para a necessidade de internalização de valor, agregação tecnológica e fortalecimento das cadeias produtivas nacionais. Soma-se a isso a matriz energética brasileira, predominantemente renovável, que constitui vantagem competitiva relevante para a produção de bens minerais e industriais com menor pegada de carbono. Esse cenário reforça a importância de estratégias integradas que conciliem pesquisa geológica, inovação tecnológica, agregação de valor, responsabilidade socioambiental e desenvolvimento econômico sustentável.

Na sequência, apresenta-se, de forma individualizada um panorama da situação nacional e da inserção do Brasil no contexto mineral global para os seguintes bens minerais: bauxita, cobre, elementos terras raras, fósforo, grafita, lítio, nióbio e potássio.

2.2 Benchmarks na cadeia de valor mineral

2.2.1 Alumínio (Bauxita)

O Brasil ocupa posição relevante no mercado global de alumínio, sustentado por depósitos de classe mundial de bauxita, o principal minério de alumínio, assim como por uma cadeia industrial relativamente consolidada.

Os depósitos de bauxita no país resultam de múltiplos estágios de alteração intempérica, tanto física quanto química, sobre diversos tipos de rochas, desenvolvidos sob o clima equatorial úmido. Esse ambiente propiciou a formação de espessos horizontes lateríticos com alta concentração de alumínio (> 40%) (LORETI JÚNIOR, 2026).

No cenário internacional, o Brasil contribui com 9,3% das reservas globais (5ª posição mundial) e 7,3% da produção mundial (4º. maior produtor) de bauxita (USGS 2026; Tabela 1). As reservas nacionais de bauxita estão na ordem de 1,62 bilhão de toneladas, valor próximo à estimativa do USGS (2026) de 1,7 bilhão de toneladas. A produção brasileira deste minério em 2025 foi de 48 milhões de toneladas, enquanto a beneficiada (alumina calcinada e alumínio não ligado), encontra-se em 33,4 milhões de toneladas (Tabela 2).

Os principais centros produtores de bauxita encontram-se na bacia Amazônica, em domínios do estado do Pará, região historicamente responsável por mais de 90% da extração nacional. Em escala de participação menor, Minas Gerais aparece como o segundo estado produtor, com aproximadamente 7% da produção, seguido por contribuições discretas de Goiás, São Paulo e Santa Catarina (Figura 4). No Pará, o parque produtivo é sustentado por empreendimentos de grande porte, como as unidades de Porto Trombetas, operada pela Mineração Rio do Norte (MRN); Paragominas, associada à Norsk Hydro; e Juruti, operada pela Alcoa. A hegemonia regional tende a ser mantida nos próximos anos com a implementação do projeto “Novas Minas”, da MRN, que prevê a exploração de novos platôs nos municípios de Oriximiná, Faro e Terra Santa (LORETI JÚNIOR, 2026), (Tabela 3).

Tabela 3. Produção de bauxita, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia do alumínio.

Reservas*	Minas em operação*	Produção (ROM; Mt)**	Produção beneficiada (Mt)**	Ranking mundial***
1.62 Gt	13 (céu aberto)	48	33,4	Reservas: 5º (9.3%)
				Produção: 4º (7.3%)

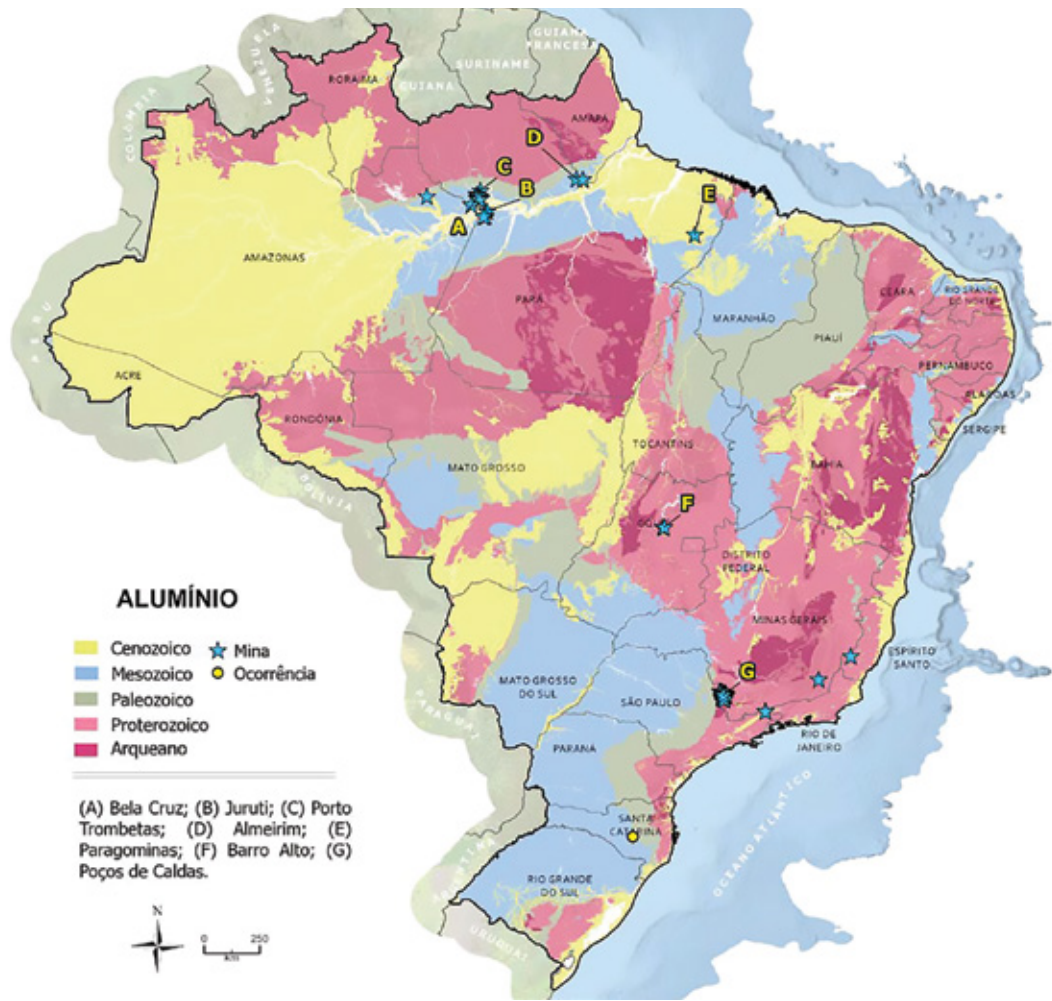
Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2026 – Anuário Mineral Brasileiro Interativo; USGS (2026)

Tabela 4. Depósitos selecionados de bauxita no Brasil e seus respectivos recursos estimados

Depósito	Empresas operadoras	Recursos estimados (Mt)	Teor (% Al)	Status
Porto Trombetas	Mineração Rio do Norte	600	49.5	Em operação
Paragominas	Norsk Hydro do Brasil	249.7	82.4	Em operação
Juruti	Alcoa Alumínio	558.1	34.2	Em operação
Barro Alto	Terra Goyana	180	56	Em operação
Bela Cruz	Mineração Rio do Norte	55.9	50.2	Em operação
Poços de Caldas	Alcoa Alumínio	50	46	Em operação

Fonte: Loreti Júnior, 2026.

Figura 4. localização dos principais depósitos e ocorrências de Bauxita do Brasil



Fonte: Compilada de Loreti Júnior, 2026.

Figura 5. Panorama da atuação das empresas ao longo da cadeia de valor do alumínio

Empresa / instituição	P&D Pesquisa e desen- volvimento	Upstream Lavra, britagem e beneficiamento	Midstream Alumina, alumínio primário, ligas	Downstream Transformação e produtos	Recuperação Sucata e reciclagem de cobre
CBA					
Alcoa					
Hydro					
AC Actech					
Novelis					
Prolind					
ReciclaBR					
ALUX do Brasil					
Metalex					
Alumar					
AMG Brasil					
Termomecânica (TM)					
Térmica					
Alubar					
Maxion Wheels					
Ibrame					
Fundalumínia					
Mahle					
Heidorn					
Mangels					
Alcast					
Elfer					
Umicore Brasil					
Tupy					
Stellantis					

 Presença forte  Presença relevante  Ausência de atuação

Cobertura por etapa: P&D: **8** UPSTREAM: **9** MIDSTREAM: **11** DOWNSTREAM: **1** RECUPERAÇÃO: **0**

Fonte: Elaborado a partir dos dados de mercado e relatórios corporativos.

A produção beneficiada em usinas de tratamento encontra-se em 33,4 milhões de toneladas, enquanto alumina e alumínio primário estiveram em 10,4 Mt e 1,02 Mt, respectivamente (Tabela 1). Em 2023, o consumo doméstico de produtos de alumínio foi da ordem de 1,9 Mt em setores estratégicos como embalagens (32,5%), construção civil (17,7%), transportes (16,3%), eletricidade (12,2%) e bens de consumo (10,3%) (ABAL 2025).

A reciclagem de sucata de alumínio no Brasil totalizou aproximadamente 850 mil toneladas, correspondendo a cerca de 57% do consumo nacional do metal no período. Esse desempenho supera significativamente a média global, estimada em torno de 30% (IBRAM 2025).

A cadeia produtiva do alumínio no Brasil é verticalizada, integrando todas as etapas do processo, desde a extração da bauxita até as fases de refino, redução eletrolítica e transformação final (alumina, alumínio primário e ligas), fabricação de produtos acabados e reciclagem (IBRAM 2025). Esta integração da cadeia produtiva do alumínio está ilustrada na Figura 5 que mostra o posicionamento de um conjunto expressivo de empresas que atuam nas diversas etapas de transformação mineral (*midstream*), utilização em produtos finais para consumo, produção ou bens de capital (*downstream*) e recuperação. Neste cenário, a CBA é a empresa mais verticalizada, atuando em toda a cadeia, e a predominância de empresas atuando em etapas de *downstream* reflete a forte presença da indústria de transformação de alumínio no Brasil.

A cadeia de valor do alumínio no Brasil pode ser estruturada em seis estágios interdependentes, que compreendem desde a extração da bauxita até a reincorporação de sucatas ao ciclo produtivo. Os quatro primeiros estágios, *upstream* (extração e beneficiamento), *midstream A* (refino da alumina), *midstream B* (redução eletrolítica) e *downstream* (transformação em produtos finais), descrevem o percurso linear da transformação mineral, enquanto os dois estágios subsequentes, referentes à economia circular (4a e 4b), representam a integração dos fluxos secundários provenientes da mineração urbana. A Figura 6 sintetiza essa articulação, e os detalhamentos técnicos de cada estágio, incluindo produtos de referência, indicadores de mercado e principais empresas atuantes, são apresentados sequencialmente nas Tabelas 5 a 10.



Figura 6. Etapas da cadeia primária e da economia circular do alumínio



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Todos os valores monetários deste relatório são apresentados em US\$ nominais da data da respectiva fonte. Quando a fonte original estiver expressa em outra moeda, a conversão para US\$ deverá informar a data-base ou a taxa utilizada na respectiva referência.

A intensidade de capital corresponde ao CAPEX dividido pela capacidade nominal anual. Para expansões brownfield, deverá ser utilizado o CAPEX incremental dividido pela capacidade incremental. Quando a fonte utilizar produção média ao longo da vida útil em vez de capacidade nominal, o denominador deverá ser explicitado.

Os indicadores de OPEX não são diretamente comparáveis quando possuem fronteiras distintas, como custo no site, C1, FOB ou CIF. Além disso, dmt representa tonelada métrica seca; wmt, tonelada métrica úmida; e tpa, toneladas de capacidade anual.

Tabela 5. Benchmarking para Upstream (Bauxita Comercializável)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Minim Martap, Camarões	Greenfield faseado	Média LOM: 7,2 Mtpa; Capacidade nominal 10 Mtpa	US\$ 38,56/dmt (C1) (inclui mina, rodovia, ferrovia e porto)	US\$ 446 M total; US\$ 96 M Fase 1	US\$ 44,6/tpa para 10 Mtpa; US\$ 61,9/tpa para 7,2 Mtpa
Bauxite Hills, Austrália	Expansão 4 para 7 Mtpa	Expansão: +3 Mtpa; Alvo de 6 Mtpa	US\$ 10,80/wmt no site	US\$ 21,1 M	Capacidade adicionada de 3 Mtpa; capacidade final de 7 Mtpa
Amargosa, Brasil	Greenfield de bauxita de embarque direto (sem lavagem ou beneficiamento complexo)	5,1 Mtpa média	US\$ 4,10/dmt no site; US\$ 24,02/t até o porto; US\$ 48,73/t CIF China	US\$ 119 M inicial + US\$ 63 M diferido	US\$ 23/tpa inicial; US\$ 36/tpa total

Fonte: Minim Martap: Canyon Resources: DFS / apresentação ASX, 2025; Bauxite Hills/Metro Mining: FID da expansão, 2023 (em A\$); e Amargosa/Brazilian Rare Earths: Scoping Study, 2025³⁰.

30 Disponíveis em: <https://api.investi.com.au/api/announcements/cay/76c1485b0cf.pdf>
<https://www.listcorp.com/asx/mmi/metro-mining-limited/news/mmi-final-investment-decision-on-expansion-project-2875321.html>
<https://macausiness.com/brazilian-rare-earths-amargosa-bauxite-gallium-scoping-study/>

Tabela 6. Benchmarking para *Midstream A* (Refino de Alumina SGA)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Lanjigarh, Vedanta	Expansão de 2 a 5 Mtpa	+3 Mtpa sobre 2 Mtpa atual	US\$ 372/t em FY26	US\$ 702 M	US\$ 234/tpa capacidade adicional
NALCO Damanjodi, 5ª linha	Nova linha brownfield	+1 Mtpa sobre 2,1 Mtpa atual	US\$ 240 a 250/t atual; custo similar na nova linha	US\$ 653 M	US\$ 653/tpa adicionada
Utkal Hindalco	Debottleneck	+350 ktpa	Não divulgado isoladamente	US\$ 40 M	US\$ 114/tpa adicionada
Alunorte Hydro	Operação de referência	6,3 Mtpa nominal	N/A	N/A	N/A

Fonte: Lanjigarh, Vedanta: Apresentação de resultados FY26, páginas 30 e 33; Damanjodi NALCO: Transcrição da reunião com investidores, 2025, páginas 4, 6 e 14; Utkal Hindalco: Investor Day, 2023, página 36; e Alunorte, Hydro: “Alcoa Plans Restart of Aluminum Smelting Capacity at Alumar in Brazil”³¹

31 Disponíveis em:

https://www.vedantalimited.com/uploads/investor-overview/financial-results/Q4FY26_Earnings_Presentation_final.pdf
<https://nalcoindia.com/wp-content/uploads/2025/02/LetterInvestorMeetTranscript11022025.pdf>
<https://www.hindalco.com/upload/pdf/hindalco-investors-day-presentation-04-april-2023.pdf>
https://s29.q4cdn.com/844074237/files/doc_news/2021/09/20210920_AlumarSmelter-FINAL.pdf

Tabela 7. Benchmarking para *Midstream B* (Alumínio Primário)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
BALCO Vedanta	Expansão brownfield	+435 ktpa	US\$ 1824/t em FY26; (produção de 599 kt)	US\$ 1,20 B	US\$ 2750/tpa
NALCO Angul	Nova linha brownfield	+500 ktpa sobre 460 ktpa atual	US\$ 1840 a 1900/t atual; custo similar na nova linha	Smelter: US\$ 1,97 B; Geração: US\$ 1,49 B	US\$ 3945/tpa, ou US\$ 6935/tpa com energia
AP60 Quebec Rio Tinto	Modernização para expansão	+160 ktpa; cap. final 220 ktpa	Não divulgado; meta de primeiro quartil	US\$ 1,5 B	US\$ 9375/tpa de capacidade adicionada
Alumar Alcoa	Restart brownfield	447 ktpa reativadas	Não divulgado em base comparável	US\$ 145 M total; US\$ 20 M como CAPEX	US\$ 324/tpa total; US\$ 45/tpa CAPEX

Fonte: BALCO Vedanta: Apresentação de resultados FY26, páginas 17, 30 e 33; Angul NALCO: Transcrição da reunião com investidores, 2025, páginas 4, 6 e 14; AP60 Quebec - Rio Tinto: Anúncio oficial, 2026; e Alumar, South32: Anúncio oficial, 2022.³²

32 https://www.vedantalimited.com/uploads/investor-overview/financial-results/Q4FY26_Earnings_Presentation_final.pdf
<https://nalcoindia.com/wp-content/uploads/2025/02/LetterInvestorMeetTranscript11022025.pdf>
<https://www.riotinto.com/en/news/releases/2026/rio-tinto-commissions-1-5-billion-ap60-smelter-expansion-in-quebec>
<https://news.alcoa.com/press-releases/press-release-details/2021/Alcoa-Plans-Restart-of-Aluminum-Smelting-Capacity-at-Alumar-in-Brazil/default.aspx>
<https://www.south32.net/docs/default-source/exchange-releases/financial-results-and-outlook-half-year-ended-31-dec-2021.pdf>

Tabela 8. *Benchmarking para Downstream (Produtos Laminados)*

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Novelis Bay Minette, EUA	Greenfield integrado com reciclagem	600 ktpa	N/A	US\$ 5 B	US\$ 8333/tpa de produtos laminados
Aluminum Dynamics, EUA	Greenfield com dois centros de slabs	650 ktpa	N/A	US\$ 2,7 B	US\$ 4154/tpa
Aditya/Hirakud Hindalco	Casting e laminação a frio	170 ktpa	N/A	US\$ 450 M	US\$ 2647/tpa
Novelis Pindamonhangaba	Debottleneck brownfield	+70 ktpa	N/A	US\$ 50 M	US\$ 714/tpa adicionada

Fonte: Bay Minette Novelis: Filing F-1, 2024 (página 119); Aluminum Dynamics, Steel Dynamics: Formulário 10-K, 2024; Aditya/Hirakud — Hindalco: Investor Day, 2023 (página 36); e Novelis Pindamonhangaba Form 10-K FY2026 (página 37).33

A Economia Circular do alumínio deve ser dividida em duas fronteiras industriais. A primeira corresponde à mineração urbana e à preparação da sucata, abrangendo coleta, consolidação, desmontagem, prensagem, trituração, separação de materiais ferrosos e não metálicos e classificação por liga. A segunda corresponde à reciclagem metalúrgica, incluindo deslacagem ou desrevestimento, refusão, tratamento e correção química do banho, tratamento de escórias e lingotamento do alumínio secundário.

O fluxo industrial de referência é o seguinte: (a) sucata pré-consumo e pós-consumo; (b) coleta e consolidação; (c) desmontagem, prensagem ou trituração; (d) separação de materiais ferrosos e não metálicos; (e) classificação por liga; (f) deslacagem ou desrevestimento; (g) refusão; (h) tratamento e correção química do banho; (i) tratamento de escórias; (j) lingotamento como sheet ingot, extrusion ingot, slab, billet ou liga de fundição; (k) laminação, extrusão ou fundição.

Na mineração urbana, a intensidade de capital deverá ser calculada por tonelada anual de sucata alimentada ou classificada. Na reciclagem metalúrgica, deverá ser calculada por tonelada anual de alumínio secundário produzido. Esses dois denominadores não devem ser misturados em uma mesma curva de intensidade.

Não foram identificados OPEX públicos suficientemente segregados e comparáveis para os projetos selecionados. Portanto, não se deve estimar o OPEX a partir do preço da sucata, do custo corporativo de vendas ou da diferença entre o preço do metal primário e o secundário.

Para futuros projetos, recomenda-se apresentar separadamente:

- **Custo de conversão:** coleta interna, triagem, preparação, energia, combustível, mão de obra, manutenção, perdas metálicas e tratamento de resíduos, excluindo a aquisição da sucata.
- **Custo caixa total:** custo de conversão mais o custo da sucata entregue à planta, deduzidos créditos de coprodutos e receitas associadas aos resíduos recuperados.

Tabela 9. *Benchmarking para Economia Circular A: Mineração urbana e preparação de sucata*

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Alusort, EUA	Unidade automatizada de classificação de sucata de alumínio por liga	Até 20 ktpa de sucata classificada	Não divulgado isoladamente	US\$ 4 M segundo a Hydro; (não necessariamente o CAPEX integral)	US\$ 200/tpa de capacidade; (não representa a intensidade integral do projeto)

Tabela 10. *4b. Benchmarking para Economia Circular B: Reciclagem e produção de alumínio secundário*

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Cassopolis, Hydro, EUA	Greenfield de reciclagem e produção de <i>extrusion ingot</i>	120 ktpa de alumínio reciclado	Não divulgado isoladamente	US\$ 150 M	US\$ 1.250/tpa de produto
Guthrie, Novelis, EUA	Centro integrado de trituração, classificação, refusão e produção de <i>sheet ingot</i>	240 ktpa de <i>sheet ingot</i>	Não divulgado isoladamente	US\$ 365 M	US\$ 1.521/tpa de produto
Ulsan, Novelis, Coreia do Sul	Centro de reciclagem e produção de <i>sheet ingot</i>	100 ktpa de <i>sheet ingot</i>	Não divulgado isoladamente	US\$ 65 M	US\$ 650/tpa de produto
Laterrière, Rio Tinto, Canadá	Forno de refusão <i>brownfield</i> para aumento da utilização de sucata	+22 ktpa de capacidade de reciclagem	Não divulgado isoladamente	US\$ 8,4 M	US\$ 382/tpa de capacidade adicionada

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Pindamonhangaba, Novelis, Brasil	Expansão integrada de reciclagem e laminação	+100 ktpa de reciclagem e +100 ktpa de laminação	Não divulgado isoladamente	US\$ 150 M compartilhados entre reciclagem e laminação	CAPEX não segregado entre as duas etapas

Fonte: Hydro, 2023; Novelis, 2022; Novelis, 2025; Rio Tinto, 2026 e Novelis, 2021.³⁴

Os *benchmarks* apresentam fronteiras distintas. Cassopolis e Ulsan são referências de produção de lingotes reciclados; Guthrie integra preparação de sucata e produção de sheet ingot; Laterrière é uma expansão brownfield que utiliza infraestrutura existente; e Pindamonhangaba possui CAPEX compartilhado entre duas etapas consecutivas.

O investimento de US\$ 150 milhões em Pindamonhangaba, associado a +100 ktpa de reciclagem e +100 ktpa de laminação, é distinto do investimento posterior de US\$ 50 milhões para o debottleneck de +70 ktpa de laminação já apresentado no *downstream*. Os dois projetos não devem ser somados nem tratados como uma única expansão.

Bay Minette e Aluminum Dynamics devem permanecer exclusivamente no *downstream*. Embora incluam reciclagem, seus CAPEX foram divulgados para complexos integrados cuja capacidade de referência é a produção de laminados; portanto, seus investimentos não devem ser repetidos como CAPEX isolado de reciclagem.

Os projetos greenfield de reciclagem devem ser comparados separadamente das expansões brownfield. A intensidade relativamente baixa de um novo forno de refusão em uma instalação existente não representa o custo de implantação de uma cadeia completa de coleta, triagem, preparação, refusão e lingotamento. No Brasil, Pindamonhangaba é a principal referência divulgada de integração entre reciclagem e laminação. Entretanto, o CAPEX divulgado não está segregado entre essas etapas e, portanto, não deve ser utilizado como intensidade isolada de reciclagem.

Os valores de *benchmarking* de alumínio primário, produtos laminados, mineração urbana e alumínio secundário devem permanecer separadas. A rota circular evita as etapas de mineração de bauxita, refino de alumina e redução eletrolítica, mas sua competitividade depende do custo e da disponibilidade da sucata, da eficiência de classificação por liga, da contaminação metálica, das perdas de fusão, da geração de escórias e da especificação do produto secundário.

³⁴ Disponíveis em:

<https://www.hydro.com/en/global/media/news/2023/hydro-opens-new-aluminium-recycling-plant-in-cassopolis-michigan/>

<https://investors.novelis.com/news-events/press-releases/detail/58/novelis-breaks-ground-on-365-million-advanced-recycling-center>

<https://investors.novelis.com/news-events/press-releases/detail/1390/novelis-opens-ulsan-aluminum-recycling-center>

<https://www.riotinto.com/en/operations/canada/saguenay>

<https://investors.novelis.com/news-events/press-releases/detail/75/novelis-completes-150-million-aluminum-rolling-and-recycling-expansion-in-brazil>

Para futuros projetos brasileiros, os indicadores mínimos deverão incluir capacidade de recuperação de sucata, capacidade de produção a partir de material secundário, participação de sucata pré-consumo e pós-consumo, composição das ligas, rendimento metálico, perdas do processo de fusão, geração de dross (o borra ou escória metálica), custo da sucata entregue, custo de conversão, consumo de eletricidade e combustível, especificação do produto, utilização efetiva da capacidade, capital de giro e fronteira exata do CAPEX.

2.2.2 Cobre

O Brasil possui papel estratégico no mercado global de cobre, especialmente no contexto da transição energética, devido à importância desse metal para redes elétricas, veículos elétricos, energias renováveis e tecnologias de baixo carbono. O país detém cerca de 79 milhões de toneladas de cobre contido em reservas, equivalente a aproximadamente 7,7% do total mundial, ocupando a 6ª posição global (Tabela 3). Apesar disso, sua participação na produção ainda é modesta, com cerca de 1,7% da oferta mundial, correspondente à 18ª posição (ANN 2025; LIMA e RIOS, 2026; USGS 2025).

As reservas e recursos brasileiros concentram-se principalmente em terrenos pré-cambrianos, com destaque para a Província Mineral de Carajás, no Pará, que reúne o maior potencial cuprífero do país, estimado em 27,34 milhões de toneladas de cobre contido (Lima 2024). Diferentemente do padrão mundial, dominado por depósitos do tipo pórfiro, a produção brasileira está associada sobretudo a sistemas IOCG, além de depósitos VMS e, de forma mais restrita, pórfiros (LIMA; RIOS, 2026).

Em 2025, a produção nacional de minério bruto de cobre foi de aproximadamente 100 milhões de toneladas ROM, resultando em cerca de 384 mil toneladas de cobre contido após o beneficiamento (Tabela 3) (ANM 2025). A produção concentra-se nos estados do Pará, Goiás, Bahia Alagoas e Mato Grosso. Entre os principais depósitos destacam-se Salobo, Sossego e Cristalino, em Carajás; Chapada, em Goiás; Cabaçal, em Mato Grosso; Caraíba, na Bahia; Serrote da Laje, em Alagoas; e Boa Esperança, no Pará (Figura 7, Tabela 11 e 12).

Tabela 11. Produção de cobre, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia do cobre.

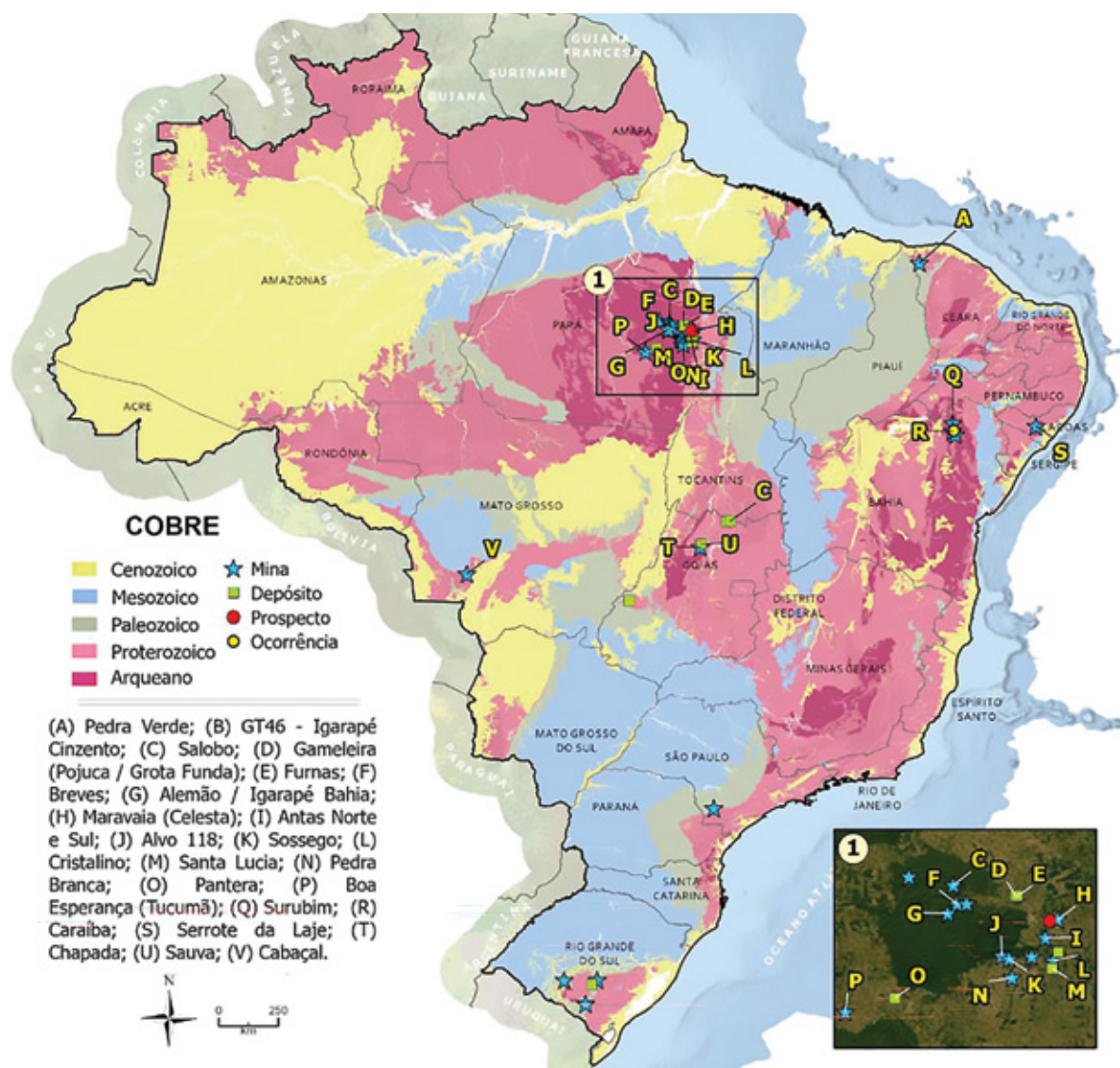
Reservas*	Minas em operação*	Produção (ROM; Mt)**	Produção ben-eficiada (Mt)**	Ranking mundial***	
79 Mt	8	100	1.65	Reservas:	6º (7.7%)
				Produção:	18º (1.7%)

Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2026 - Anuário Mineral Brasileiro Interativo; *** USGS (2026)

Tabela 12. Depósitos selecionados de cobre no Brasil e seus respectivos recursos estimados

Depósito	Empresas operadoras	Recursos estimados (Mt)	Teor (% Cu)	Status
Salobo	Vale	1148.4	0.61	Em operação
Furnas	Ero Copper	550	0.71	Viabilidade
Gameleira (Pojuca / Grota Funda)	Vale	535	0.57	Viabilidade
Cristalino	Vale	379	0.66	Viabilidade
Sossego	Vale	315	0.78	Em operação
Chapada	Lundin Mining	754.9	0.23	Em operação
Alvo 118	Vale	170	1	Viabilidade
Caraíba (Céu Aberto + Pilar UG)	Ero Copper	53.8	1.54	Em operação
Breves	Vale	50	1.22	Viabilidade
Serrote da Laje	Mineração Vale Verde	119.2	0.5	Em operação
Saúva	Lundin Mining Corp	179	0.32	Exploração
Boa Esperança (Tucumã)	Ero Copper	59.3	0.81	Em operação
Pantera	OZ Minerals	20.8	1.7	Exploração
Pedra Branca	OZ Minerals	18.1	1.6	Instalação
Cabaçal	Meridian Mining	52.9	0.32	Exploração
Maravaia (Celesta)	Lara Exploration, Tessarema and North	2.1	4.2	Em operação
Surubim	Ero Copper	8.7	0.88	Em operação

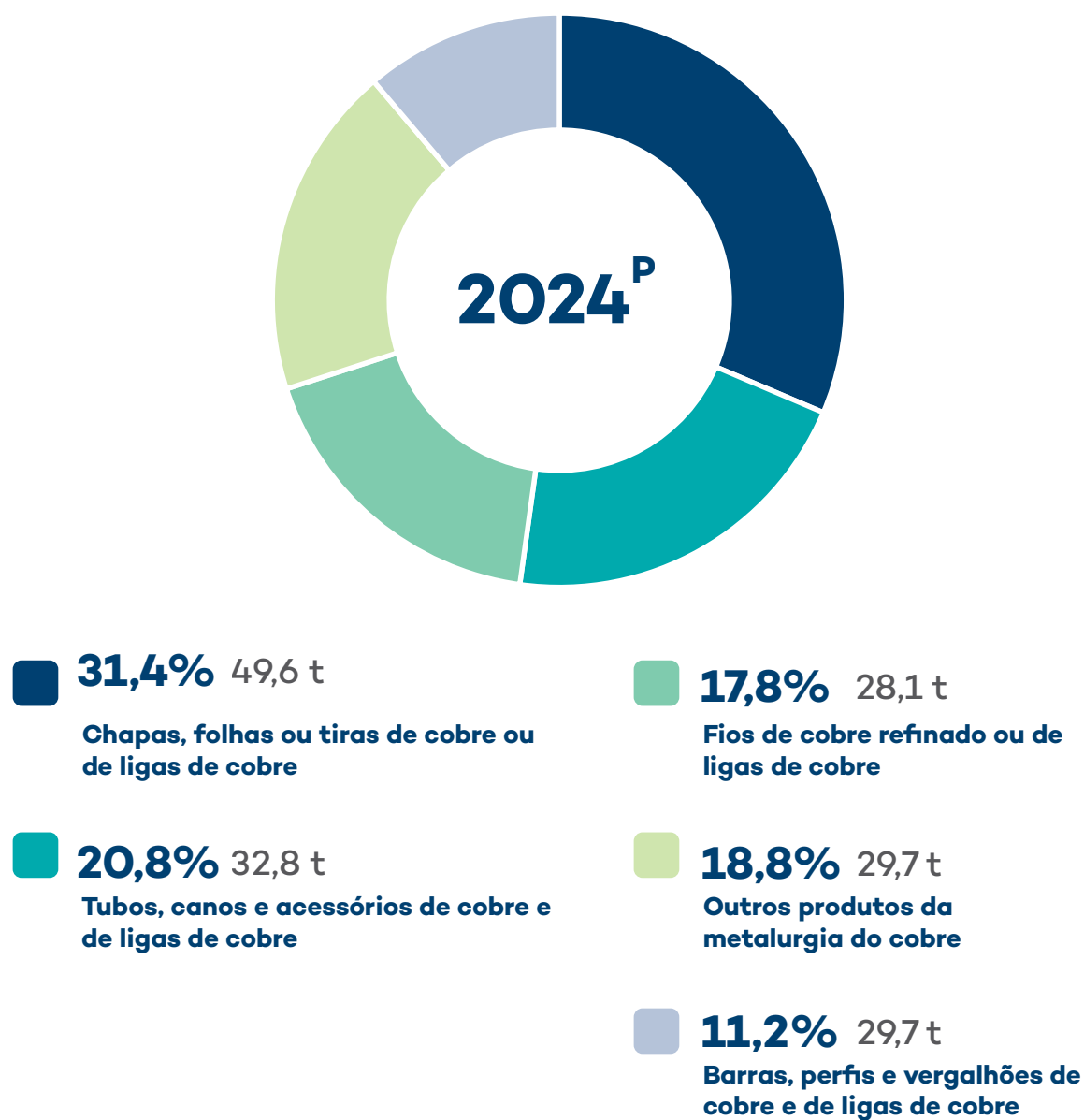
Fonte: Lima e Rios, 2026.

Figura 7. Localização dos principais depósitos e ocorrências de cobre do Brasil

Fonte: Lima e Rios, 2026.

Em 2024, a produção beneficiada de cobre no Brasil esteve em torno de 1.35 Mt, a um teor de 28%, e a de cobre contido em 380.000 toneladas (ANM 2025). A produção brasileira de semimanufaturados de cobre foi de 158 mil toneladas em 2024, distribuída em diversos produtos industriais conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Produção brasileira de semifaturados de cobre por produtos industriais



Fonte: Adaptado do Anuário Estatístico Sindicel 2025³⁵

A cadeia produtiva do cobre no Brasil é diversificada, abrangendo desde grandes mineradoras, com a extração do minério de cobre e produção de concentrado de cobre e cobre refinado, até indústrias de transformação, incluindo a fabricação de produtos semimanufaturados (e.g., condutores elétricos - fios de cobre, laminados, tubos, barras e perfis) e reciclagem (Figura 9). O mercado tem se beneficiado da expansão da infraestrutura elétrica e da reindustrialização verde, mas enfrenta desafios de custo e competitividade global.

³⁵ Disponível: <https://www.sindicel.org.br/anuario/>

Figura 9. Panorama da atuação das empresas ao longo da cadeia de valor do cobre.

Empresa / instituição	P&D Pesquisa e desenvolvimento	Upstream Mineração e concentrados	Midstream Concentrados e compostos químicos de cobre	Downstream Produtos semifaturados de cobre	Recuperação Sucata e reciclagem de cobre
Vale SA/Vale Base Metals					
Lundin Mining					
Ero Cooper Brasil					
Metal Group					
Termomecânica					
Coppermetal					
Cobremax Ind. & Com.					
Copper Barras Ind. & Com.					
Glencore					
Stellantis					
Ibrame					
Astra Ind. & Com. Ltda					
Alcob					
Cecil					

Presença forte
 Presença relevante
 Ausência de atuação

Cobertura por etapa: P&D: **8** UPSTREAM: **9** MIDSTREAM: **11** DOWNSTREAM: **1** RECUPERAÇÃO: **0**

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Nos estágios de extração de minério de cobre, as operações da Vale SA/VBM, Ero Copper e Lundin Mining são os principais centros de produção, e os novos projetos em desenvolvimento de cobre, além de quantidade expressiva de autorizações de pesquisa, devem sustentar o crescimento da produção desse minério e fortalecer ainda mais a presença do país no mercado internacional.

As empresas que atuam nos estágios de *midstream* e *downstream* da cadeia do cobre incluídas na Figura 9 são classificadas entre as maiores do setor em faturamento e porte, sendo referências para prospecção e fornecimento de produtos metálicos de cobre. Esta concentração significativa de empresas nestes estágios da cadeia produtiva, reflete a forte presença da indústria transformadora de cobre no Brasil. No entanto, atividades de pesquisa e desenvolvimento indicam uma baixa intensidade de inovação formal na cadeia, assim como a reciclagem de cobre que ainda apresenta participação limitada, sugerindo potencial para expansão da economia circular.

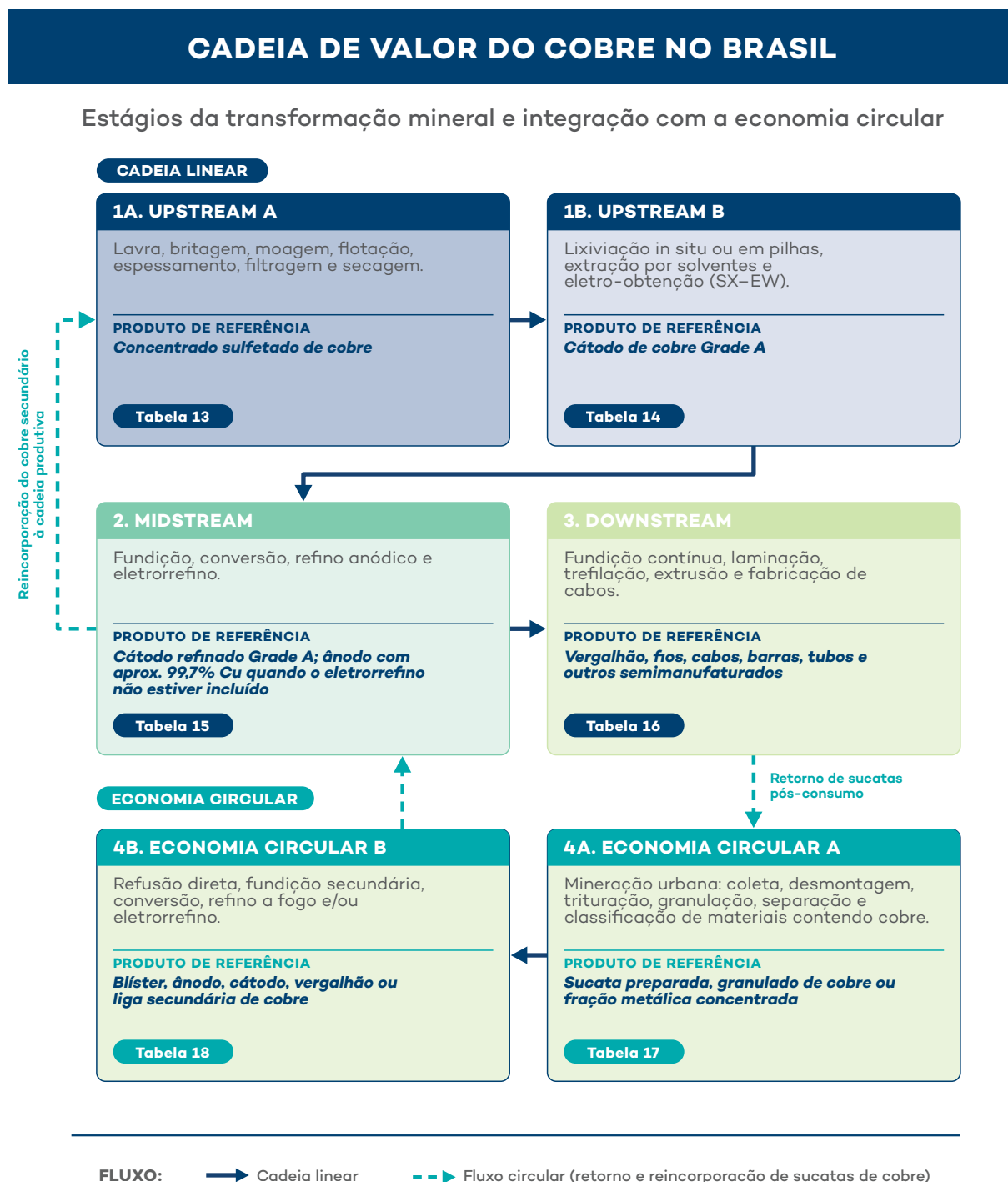
Relatórios do *International Copper Association* (ICA) estimam que o consumo mundial de cobre refinado deve crescer 28% até 2035, impulsionado por veículos elétricos, redes inteligentes e sistemas de energia renovável. Em todos os cenários avaliados, o mercado global de concentrado de cobre e refinado apresenta projeções de déficit futuro acentuado. A tendência é de enorme valorização do cobre ou de ajuste no crescimento da demanda (oferta insuficiente de cobre, substituição, menor intensidade de uso, novas tecnologias etc) e elevação da reciclagem (de 20% para cerca de 35% em duas décadas; Heider *et al.*, 2024).

A análise dos indicadores apresentados permite identificar os principais gargalos e oportunidades para o adensamento da cadeia de valor no contexto brasileiro.

A intensidade de capital corresponde, em princípio, ao CAPEX inicial (ou pré-produção) dividido pela capacidade nominal anual do produto de referência. CAPEX anual, sustaining CAPEX, capital de expansão futura e investimentos em infraestrutura compartilhada não devem ser tratados como CAPEX inicial sem identificação.

Projetos que terminam em concentrado, ânodo ou cátodo possuem fronteiras distintas. Da mesma forma, uma intensidade calculada por tonelada anual de minério ROM não deve ser comparada diretamente com outra calculada por tonelada anual de cobre contido.

Em projetos de reciclagem multimetálica, o CAPEX integral não deverá ser atribuído ao cobre. O denominador preferencial será a capacidade de alimentação da planta, salvo quando houver CAPEX segregado para uma linha ou produto específico.

Figura 10. Etapas da cadeia primária e da economia circular do Cobre

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 13. Benchmarking para Upstream A (Beneficiamento e flotação)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Tucumã, Brasil (antigo Boa Esperança)	Greenfield, mina a céu aberto com flotação	Planta de 4.0 Mtpa de ROM; Cu no concentrado: 32,5 a 37,5 ktpa Cu	C1: US\$ 1,95 a 2,15/lb, equivalentes a US\$ 4.299 a 4.740/t Cu	US\$ 294 M inicial US\$ 96 M sustaining	US\$ 8.400 a 10.899 tpa
Chapada, Brasil	Operação de referência, sulfeto Cu-Au	Planta de 65 kt/d; Produção 2025 de 43.974 t Cu	C1: US\$ 1,00 a 1,20/lb, equivalente a US\$ 2.205 a 2.646/t Cu	US\$ 100 M (CAPEX para 2026, não é para expansão)	n/a
Caravel Copper, Austrália	Greenfield, grande escala, baixo teor	Produção média de 60,2 ktpa Cu	C1: US\$ 1,73/lb (US\$ 3814/t Cu); AISC de US\$ 2.07/lb (US\$ 4564/t Cu)	US\$ 1,18 B	US\$ 19.622/tpa Cu
Kansanshi S3, Zâmbia	Expansão brownfield S3 (em operação desde dez/2025)	Capacidade de processamento: +25 Mtpa de ROM; Capacidade total 53 Mtpa de ROM	Não divulgado isoladamente	US\$ 1,25 B	US\$ 50/tpa de capacidade adicional de processamento de minério
Cerro Verde, Peru	Operação de referência, grande escala	Cu no concentrado: 413 a 463 ktpa	US\$ 2,23/lb* ou US\$ 4916/t Cu	US\$ 5,2Bi (total no LOM, não é só CAPEX inicial)	n/a

*Nota: Custos e valores em US\$/lb Cu foram convertidos para US\$/t Cu

Fonte:³⁶

- Tucumã/Boa Esperança: 2026.
- Chapada: Lundin reporta para Chapada guidance 2026 de 45–50 kt de cobre, C1 de US\$ 1,00–1,20/lb e capex de US\$ 100 mi; o relatório técnico atualizado mantém a referência de operação em Goiás.
- Caravel: Developing Australia's Next Copper Project, RIU Gold Coast, 2026
- Kansanshi: First Quantum Announces Board Approval of the Kansanshi S3 Expansion and Enterprise Nickel Project, 2022
- Cerro Verde: Technical Report Summary of Mineral Reserves and Mineral Resources, 2025

36 Disponíveis em:

<https://www.ero.com/what-we-do/tucuma-operation/>
<https://pt.lundinmining.com/our-portfolio/operations/chapada/>
<https://company-announcements.afr.com/asx/cvv/c7848beb-65ed-11f1-ad98-d2cb74331d54.pdf>
<https://www.first-quantum.com/news/first-quantum-announces-board-approval-of-the-kansanshi-s3-expansion-and-enterprise-nickel-project/>
<https://fcx.com/sites/fcx/files/documents/operations/TRS-CerroVerde.pdf>

Tabela 14. Benchmarking para *Upstream B* (Lixiviação in-situ, em pilhas e SX-EW)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Florence Copper, EUA	ISR / SX-EW	95 M lb/ano produzindo 38,6 ktpa de cátodo Grade A	US\$ 1,11/lb ou US\$ 2447/t Cu	US\$ 232 M remanescente	US\$ 6.017/tpa Cu sobre capital remanescente
Gunnison Copper, EUA	ISR / SX-EW	78,9 ktpa de Cu	C1: US\$ 1,70/lb ou US\$ 3748/t Cu; AISC: US\$ 2,05/lb ou US\$ 4519 t/ Cu	US\$ 1,56 B	US\$ 19425/tpa Cu com planta de ácido US\$ 15.892/tpa Cu
Marimaca Oxide Deposit, Chile	Greenfield com lixiviação dinâmica em pilhas e SX-EW	Capacidade nominal de 50 ktpa de cátodo Grade A	C1 de US\$ 1,45/lb* (US\$ 3.197/t Cu); AISC de US\$ 1,97/lb (US\$ 4.343/t Cu)	US\$ 587 M	US\$ 11.700/tpa de cátodo
Caraíba, Ero Brasil, Brasil	Heap leach + SX-EW, referência nacional	Capacidade de 4,5 a 5,0 ktpa de cátodo	n/a	n/a	n/a

*Nota: Custos e valores em US\$/lb Cu foram convertidos para US\$/t Cu

Fonte: ³⁷

- Florence Copper: Taseko Announces Improved Economics for its Florence Copper Project, 2023
- Gunnison Copper: Gunnison Copper Files Technical Report for Preliminary Economic Assessment, 2025
- MOD Feasibility Study Confirms Robust Capital Intensity and 31%+ IRR; Maiden Ore Reserve, 2025
- SX-EW/heapleach no Brasil: A Estrutura Produtiva e Potencialidades do Cobre no Brasil, 2024.

A unidade SX-EW de Caraíba pode permanecer como referência histórica brasileira de tecnologia, mas não como benchmark econômico atual. A fonte utilizada não fornece CAPEX,

37 Disponíveis em:

<https://www.trekormetals.com/investors/news-releases/taseko-announces-improved-economics-for-its-florence-copper-project>

<https://www.gunnisoncopper.com/news/news-2024/gunnison-copper-files-technical-report-for-preliminary-econo2024-12-24-10440>

<https://marimaca.com/mod-feasibility-study-confirms-robust-capital-intensity-and-31-irr-maiden-ore-reserve/>

<https://www.inthemine.com.br/site/a-estrutura-produtiva-e-potencialidades-do-cobre-no-brasil>

OPEX ou confirmação suficientemente recente da capacidade operacional. A referência não deve ser utilizada para construir referência de custos ou intensidade de capital.

Tabela 15. Benchmarking para *Midstream* (Fundição e Refino)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Paranapanema Brasil	Operação existente; referência nacional	280 ktpa de cátodo (não é a capacidade atual)	n/a	n/a	n/a
Kamoa-Kakula Smelter, RDC	Smelter on-site integrado	500 ktpa de ânodo (99,7% Cu)	n/a	US\$ 1,1 B	US\$ 2.200/tpa de ânodo
Manyar, Freeport Indonésia	Smelter com eletrorefino greenfield	480 ktpa de cátodo	n/a	US\$ 3,7 B	US\$ 7.700/tpa
Kutch Copper, Adani, Índia	Smelter/refinery greenfield	500 ktpa Cu refinado (futura expansão para 1 Mtpa Cu)	n/a	US\$ 1,2 B	US\$ 2.400/tpa
Amman Mineral, Indonésia	Smelter/refinery greenfield	Até 220 ktpa de cátodo	n/a	US\$ 1,4 B	US\$ 6.364/tpa

Fonte:³⁸

- Paranapanema: Fact Sheet
- Kamoa-Kakula: Ivanhoe Mines Announces First Anode Production from Kamoa-Kakula Copper Smelter, 2026
- Manyar, Freeport Indonesia: Firing Up PTFI Smelter in Manyar Is More Than Flipping a Switch, 2024
- Kutch Copper/Adani: Adani's copper unit in Mundra begins operations, 2024
- Amman Mineral: AMNT 2026

Kamoa-Kakula termina em ânodo com aproximadamente 99,7% Cu, enquanto Manyar, Kutch, Amman e Paranapanema incluem eletrorefino até cátodo. Além disso, os CAPEX podem incluir plantas de ácido sulfúrico, dessalinização, refinaria de metais preciosos, geração ou

38 Disponíveis em:

<https://ri.paranapanema.com.br/en/profile/fact-sheet>
<https://www.ivanhoemines.com/news-stories/news-release/ivanhoe-mines-announces-first-anode-production-from-kamoa-kakula-copper-smelter/>
<https://www.fcx.com/freeport-features/052924>
<https://www.adanienterprises.com/newsroom/media-releases/adanis-copper-unit-in-mundra-begins-operations>
https://www.amman.co.id/rails/active_storage/blobs/proxy/eyJfcmFpbHMiOnsiZGFOYSI6NTE3MCwicHVl-joiYmxvYl9pZCJ9fQ%3D%3D--15ea233583ee6429ca290df72d5527119c280a74/Press%20Release%20-%20AMMAN%20Q1%202026%20Earnings%20Results%20vF.pdf?disposition=inline

outras utilidades. As intensidades devem ser comparadas levando em conta a equalização da fronteira industrial.

Tabela 16. Benchmarking para *Downstream* (Produtos Vergalhões, Cabos, Fios e Semimanufaturados)

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Paranapanema Brasil	Operação brasileira (dados históricos)	120 ktpa de vergalhão, 40 ktpa de trefilados; 80 ktpa de fios	n/a	n/a	n/a
Vedanta Ras Al Khair, Arábia Saudita	Greenfield copper rod mill	125 ktpa de copper rod	n/a	US\$ 30 M	US\$ 240/tpa de copper rod
Vedanta Smelter, Arábia Saudita	Smelter/ refinery e wire rod	400 ktpa cobre refinado e 300 ktpa copper rod	n/a	US\$ 2 B	US\$ 5.000/ tpa sobre a capacidade de cobre refinado US\$ 6.667/ tpa sobre a capacidade de copper rod

Fonte: ³⁹

- Paranapanema: Paranapanema Investe em sua Estratégia Global
- Vedanta Ras Al Khair: Vedanta Copper International Partners with Saudi Arabia to Boost Copper Output, 2024

A Economia Circular do cobre deve ser dividida em duas fronteiras. A primeira corresponde à mineração urbana e à preparação física de sucatas provenientes de cabos, motores, transformadores, equipamentos eletroeletrônicos, veículos, construção e demolição e resíduos industriais. A segunda corresponde à conversão metalúrgica das frações preparadas em metal secundário.

O fluxo industrial de referência é: cabos, motores, transformadores, resíduos eletrônicos, veículos, sucata de construção e sucata industrial; coleta e consolidação; desmontagem; trituração ou granulação; separação magnética, densitária, óptica ou por sensores; fração rica em cobre; refusão direta para sucata limpa ou fundição secundária para materiais

39 Disponíveis em:

<https://www.paranapanema.com.br/noticias/paranapanema-investe-em-sua-estrategia-global>
https://www.vedantalimited.com/public/uploads/11473/FINAL-Press_Release_KSA-Nov26_2024.pdf

complexos; conversão e refino a fogo; eletrorrefino, quando necessário; cátodo, vergalhão, fios, ligas ou semimanufaturados.

Sucatas de alta pureza, como certos cabos e retornos industriais, podem seguir diretamente para refusão e produção de vergalhão. Resíduos eletrônicos e materiais multimetálicos exigem fundição secundária e recuperação conjunta de cobre, metais preciosos, níquel, estanho, zinco e outros elementos.

Na mineração urbana, a intensidade deverá ser expressa por tonelada anual de material alimentado ou de fração preparada. Na reciclagem metalúrgica, poderá ser expressa por tonelada anual de alimentação e, complementarmente, por tonelada anual do principal produto metálico.

Tabela 17. Economia Circular do Cobre A: Mineração Urbana e preparação de sucata

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
RecyCâbles, França	Coleta, trituração, granulação e separação de cabos básicos e complexos	36 ktpa de cabos; 18 ktpa de granulado metálico; 13 ktpa de plásticos	Não divulgado isoladamente	Não divulgado	n/a
Wieland Recycling North America, EUA	Coleta, consolidação e pré-processamento de sucatas metálicas e eletrônicas	100 mil tons/ano; inclui cobre, resíduos eletrônicos e diversos outros metais	Não divulgado isoladamente	Não divulgado	n/a

Fonte:⁴⁰

- RecyCâbles, 2026.
- Wieland Recycling North America, 2026.

RecyCâbles produz granulado de cobre com pureza reportada de 99,9%, mas não divulga CAPEX ou OPEX. A capacidade de Wieland Recycling North America é multimetálica e não deve ser tratada como capacidade exclusiva de cobre.

Não foram identificadas informações públicas suficientes para benchmarking robusto de CAPEX de unidades independentes de mineração urbana e preparação de sucata de cobre.

⁴⁰ Disponíveis em: <https://www.suez.com/en/references/recycables-cable-waste-recovery>
<https://www.wieland.com/en/about/wieland-worldwide/wieland-recycling-north-america/>

Tabela 18. Economia Circular do Cobre B: Reciclagem metalúrgica e produção de cobre secundário

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Aurubis Richmond, EUA	Smelter secundário multimetálico para placas de circuito, cabos e outros materiais complexos	180 ktpa de alimentação; 70 ktpa de blister copper	Não divulgado isoladamente	US\$ 800 M	US\$ 4.444/tpa de alimentação; US\$ 11.429/tpa de blister como indicador complementar
Nexans Lens, França	Reciclagem de sucata, fundição contínua e expansão de wire rod	80 ktpa de sucata de cobre;	Não divulgado isoladamente	+US\$ 97,2 M	US\$ 1.216/tpa de capacidade de alimentação de sucata
Wieland Vöhringen, Alemanha	Expansão de reciclagem para produção de cobre e semimanufaturados	+80 ktpa de capacidade de reciclagem	Não divulgado isoladamente	US\$ 80 M	US\$ 1.000/tpa de capacidade adicionada

Fonte: ⁴¹

- Aurubis Richmond: o empreendimento entrou em comissionamento a quente em setembro de 2025. O CAPEX corresponde a uma fundição secundária multimetálica, e não exclusivamente ao cobre. A intensidade por blister é um indicador complementar, pois o projeto também recupera níquel, estanho, zinco e metais preciosos (2025).
- Nexans Lens: CAPEX de US\$ 97,2 milhões também amplia a produção de wire rod; portanto, não representa CAPEX exclusivo de reciclagem (2024).
- Wieland Vöhringen, 2022.

Não foram identificados OPEX públicos suficientemente segregados e comparáveis para os projetos selecionados. Não se deve inferir OPEX a partir do preço de compra da sucata, da receita corporativa ou da diferença entre os preços do cobre primário e secundário.

Para futuros projetos, recomenda-se apresentar separadamente: (a) custo de preparação: coleta, transporte, desmontagem, trituração, granulação, separação e disposição dos rejeitos não metálicos; (b) custo de conversão metalúrgica: energia, combustível, oxigênio,

41 Disponíveis em:

https://www.aurubis.com/dam/jcr%3Aa1012ca0-be19-4f6c-aac1-068d385d6e14/20250922_Factsheet%20Richmond.pdf

<https://www.nexans.com/press-releases/nexans-signs-a-strategic-investment-agreement-in-france-to-increase-its-copper-production-and-recycling-capacity-across-europe/>

<https://www.reuters.com/markets/commodities/wieland-invest-80-mln-euros-expand-copper-recycling-germany-2022-10-05/>

fundentes, reagentes, eletrodos, mão de obra, manutenção, tratamento de gases, escórias, poeiras e efluentes, excluindo a aquisição da sucata; e (c) custo total: custo da sucata entregue mais preparação e conversão, deduzidos os créditos de metais preciosos, níquel, estanho, zinco, plásticos e outros coprodutos.

Em projetos de resíduos eletrônicos ou alimentação multimetálica, a metodologia de alocação dos custos e créditos deverá ser explicitada. O CAPEX total não deverá ser atribuído ao cobre apenas porque o blister é o principal produto em massa.

As rotas de concentrado sulfetado, lixiviação/SX-EW, fundição de concentrados, transformação de cátodos e reciclagem secundária devem permanecer em análises separadas. Cada uma possui produto, processo, estrutura de custos e denominador de capacidade distintos.

No *upstream* de sulfetos, Tucumã passa a ser referência operacional brasileira, enquanto Chapada permanece como operação de grande escala e Caravel como projeto greenfield. Kansanshi S3 deve ser comparado por capacidade adicional de processamento de minério, pois a produção incremental de cobre não foi divulgada de forma isolada.

No *upstream* de óxidos, Florence representa recuperação *in situ*, enquanto Gunnison e Marimaca utilizam lavra, lixiviação em pilhas e SX-EW. Esses processos não devem ser agrupados sem considerar recuperação, consumo de ácido, teor do minério, tempo de lixiviação e manejo das soluções.

No *midstream*, Kamo-a-Kakula termina em ânodo, enquanto Manyar, Kutch e Amman avançam até cátodo. Paranapanema é uma referência brasileira de infraestrutura e capacidade nominal, mas não deve ser utilizada como benchmark econômico de operação em plena capacidade sem dados recentes de produção, CAPEX e OPEX.

Na Economia Circular, sucata limpa apta à refusão direta deve permanecer separada de resíduos eletrônicos e materiais complexos que exigem fundição multimetálica. Aurubis Richmond não deve ser comparada diretamente com Nexans ou Wieland, pois sua alimentação, produtos, recuperação de coprodutos e fronteira metalúrgica são muito mais amplos.

Para futuros projetos brasileiros de mineração urbana e reciclagem de cobre, as análises deverão incluir tipo e origem da sucata, teor de cobre, composição de outros metais, capacidade de alimentação, recuperação metálica, pureza do produto, perdas em rejeitos e escórias, custo da sucata entregue, custo de preparação, custo de conversão, consumo de energia e reagentes, créditos de coprodutos, capital de giro, utilização efetiva da capacidade e fronteira exata do CAPEX.

2.2.3 Elementos Terras Raras

O Brasil possui papel estratégico no setor de Elementos Terras Raras (ETR), devido ao seu elevado potencial geológico e à crescente importância desses elementos para a transição energética e tecnologias de alto desempenho. O país abriga as segundas maiores reservas

mundiais de ETR, estimadas pelo USGS (2025) variando entre 21 e 22 Mt, equivalentes a cerca de 23,3 % do total global. A ANM (2025), indicam reservas provadas e prováveis para 11,4 Mt de equivalente em óxidos de terras raras (CHEMALE *et al.*, 2026), (Tabela 5).

Apesar do elevado potencial geológico, a produção brasileira de terras raras permaneceu historicamente limitada. Esse cenário começou a se modificar em 2024, com o início da produção industrial de óxidos de terras raras (REO) a partir de depósitos de argila de adsorção iônica (AAI).

Em 2025, a produção brasileira desse minério alcançou 77 mil toneladas, enquanto a produção beneficiada foi de 325,77 toneladas, segundo dados da ANM (2026) (Tabela 13). Nesse contexto, destaca-se a Serra Verde Mining Company, localizada em Minaçu, Goiás, considerada a primeira produtora brasileira de terras raras a partir de depósitos do tipo AAI. A Fase I do projeto prevê capacidade produtiva de aproximadamente 5.000 t/ano de óxidos totais de terras raras (TREO), na forma de carbonatos mistos de terras raras.

Atualmente, o país conta com 62 projetos de ETR em diferentes estágios de desenvolvimento. Entre os principais destacam-se Pela Ema (GO), da Serra Verde; Araxá (MG), associado ao nióbio; Caldeira, da Meteoric Resources, e Colossus, da Viridis Mining, em Poços de Caldas e região; além do Projeto Tiros (MG), Ema, Carina, Monte Alto e PCH Project (Figura 10, Tabela 14). A vocação recente do Brasil concentra-se nos depósitos de argila de adsorção iônica em regolitos, que permitem processamento químico mais simplificado em comparação aos minérios em rocha fresca (CHEMALE *et al.*, 2026).

Tabela 19. Produção de Elementos Terras Raras, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia dos Elementos Terras Raras.

Reservas*	Minas em operação*	Produção (ROM; Kt)	Produção beneficiada (t)**	Ranking mundial***	
11,4 Mt **	1	77	325,77	Reservas:	2º (28%)
21 Mt ***				Produção:	-

Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2026 – Anuário Mineral Brasileiro Interativo; *** USGS (2026)

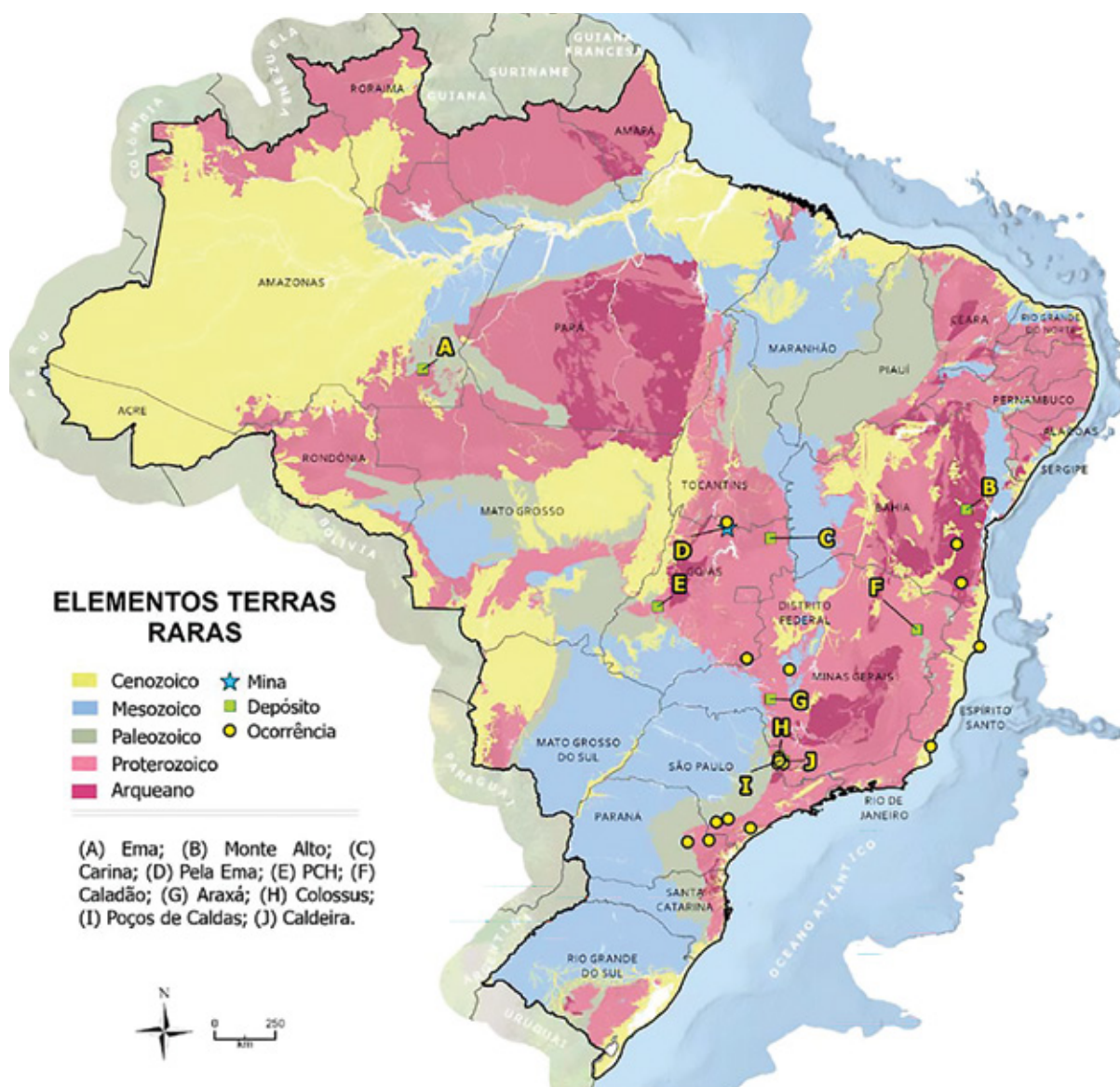


Tabela 20. Depósitos selecionados dos Elementos Terras Raras no Brasil e seus respectivos recursos estimados

Depósito	Empresas operadoras	Recursos estimados (Mt)	Teor (Treo)	Reservas	Status
Poços de Caldas13	Mineração Terras Raras S.A.	3,961.55	37,748 ppm	-	Exploração
Caldeira7	Meteoric Resources NL	1,498	2,413 ppm	103 Mt @ 4,091 ppm	Exploração
Ema10	Brazilian Critical Minerals	943	716 ppm	-	Exploração
Pela Ema ³	Serra Verde Pesquisa e Mineração	911	1,200 ppm	350 Mt @ 1,500 ppm	Em operação
Colossus9	Viridis Mining	493	2,590 ppm	200.6 Mt @ 2,640 ppm	Exploração
Carina8	Aclara Resources	298	1,452 ppm	165.4 Mt @ 1,723 ppm	Exploração
Caladão6	Axel REE Limited	233	2,143 ppm	-	Exploração
Monte Alto IAC11	Brazilian Rare Earths	104.1	1,105 ppm	-	Exploração
PCH Project12	Appia Rare Earth & Uranium	52.8	2,841 ppm	-	Exploração
Araxá5	St George Mining	40.6	4.13%	-	Exploração
Araxá14	CBMM/ CODEMIG	17.22	2.78%	-	Inativo

Fonte: Chemale et al., 2026.

Figura 11. Localização dos principais depósitos e ocorrências de Elementos Terras Raras do Brasil



Fonte: Compilada de Chemale *et al.*, 2026.

A produção beneficiada de ETRs em tem sido pequena e caracterizada pela separação de monazita, um fosfato rico em terras raras, e de concentrados de ETRs. A quantidade beneficiada de monazita foi da ordem de 326 ton. (ANM 2025), a partir de depósitos sedimentares e de complexos alcalinos e carbonatitos (rocha ígnea rica em minerais do grupo dos carbonatos). A concentração de ETRs pela produção de carbonatos mistos contendo neodímio, praseodímio, disprosio e térbio foi incipiente. Esta se deveu ao início das operações do depósito Pela Ema, do tipo argilas iônicas, da empresa Serra Verde Pesquisa e Mineração Ltda, no município de Minaçu-GO, com capacidade de produção de 6.400 toneladas anuais de óxidos totais de terras raras (TREO). A Serra Verde é a única empresa fora do continente asiático a produzir terras raras pesadas em larga escala.

A análise da cadeia produtiva de terras raras no Brasil permanece pouco adensada e marcada por forte assimetria, com amplo desenvolvimento no setor de *upstream*, contando com um conjunto expressivo de ativos minerais em fase de definição de reservas e viabilidade econômica, particularmente em depósitos de argilas iônicas (Heider & Siqueira, 2025; Figura 11).

Figura 12. Panorama da atuação das empresas ao longo da cadeia de valor dos ETRs

Empresa / instituição	P&D	Upstream Recursos/ Reservas	Upstream Extração	Midstream Carbonatos mistos; óxidos-hidróxidos	Downstream Ímãs	Recuperação Reciclagem
Serra Verde Mineração						
CBMM						
ADL Mineração						
Meteoric resources						
Viridis						
Aclara Resources						
Mosaic						
Brazilian Rare Earths						
St George Mining						
Appia Rare Earth & Uranium						
Power Minerals						
Axel REE Limited						
WEG						
Typy						
Schultz						

Presença forte

Presença relevante

Ausência de atuação

Cobertura por etapa: P&D: 8 UPSTREAM: 9 MIDSTREAM: 11 DOWNSTREAM: 1 RECUPERAÇÃO: 0

Fonte: Heider & Siqueira, 2025.

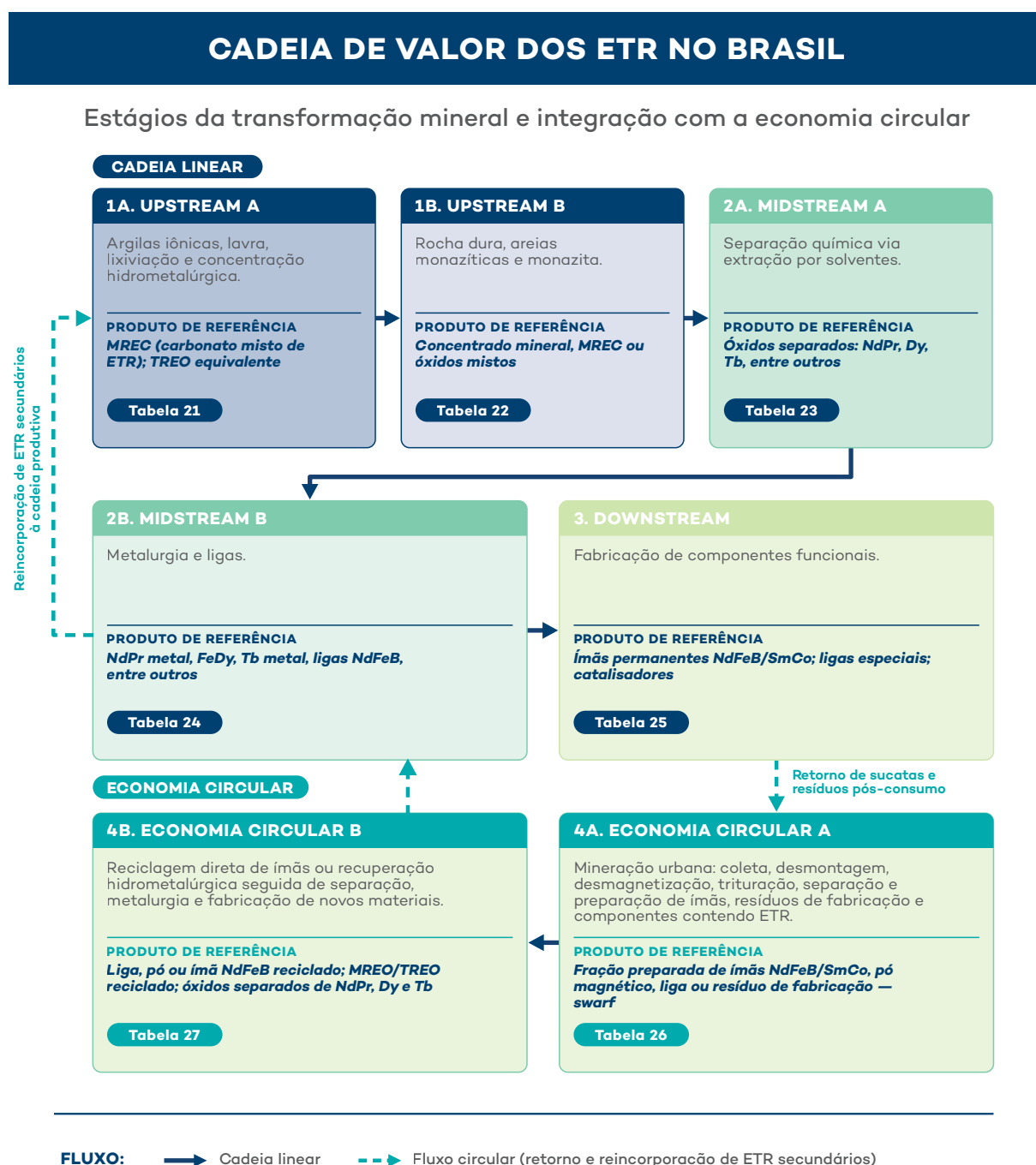
Os segmentos de *midstream* e *downstream* ainda apresentam baixa maturidade industrial, pois o Brasil ainda não possui infraestrutura para produção em escala industrial em separação química, refino, metalurgia, produção de ligas e fabricação de ímãs permanentes (CEBRI 2026).

Em alguns casos, os avanços já incluem testes de processamento em escala-piloto e a produção de materiais intermediários, como nos casos das empresas Viridis, Meteoric e Aclara.

Há projetos industriais e de inovação em desenvolvimento, como o Projeto MagBras que reúne 38 empresas patrocinadoras, focado na produção de ímãs permanentes a partir de terras raras, abrangendo toda a cadeia produtiva, da extração ao processamento e reciclagem.

No campo da circularidade, o desenvolvimento ainda é incipiente e depende da consolidação de bases tecnológicas, regulatórias e de mercado (CEBRI 2026).

Figura 13. Etapas da cadeia primária e da economia circular do ETR



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

No caso das ETR, os indicadores para comparação entre projetos podem incluir unidades de custo em US\$/kg TREO, US\$/kg Nd, US\$/kg Pr, US\$/t ROM, US\$/kg REO separado ou US\$/kg de liga/ímã. Os resultados abaixo utilizam as unidades originais e, sempre que possível, incluem a estimativa de intensidade de capital por tpa dos produtos de referência.

As seguintes unidades relacionadas às ETR não devem ser tratadas como equivalentes:

- **MREC:** massa física de carbonato misto de terras raras;
- **TREO:** massa equivalente do total de óxidos de terras raras;
- **MREO:** óxidos de terras raras utilizados em ímãs, normalmente Nd, Pr, Dy e Tb, conforme a definição de cada fonte;
- **REO separado:** produto purificado individual, como óxido de Nd, Pr, Dy ou Tb;
- **Metal, liga e ímã:** produtos de etapas metalúrgicas e industriais posteriores.

A intensidade de capital deverá utilizar, preferencialmente, o CAPEX de construção dividido pela capacidade nominal anual do produto de referência. Contingência, capital de giro, financiamento, incentivos públicos e linhas de crédito deverão ser identificados separadamente.

Custos em US\$/kg TREO processado referem-se normalmente à alimentação da planta e não ao kg de produto recuperado. Em projetos integrados, a mesma intensidade não deverá ser contabilizada novamente em *upstream*, *midstream* e *downstream* como se correspondesse a três empreendimentos independentes.

Tabela 21. Benchmarking para *Upstream A* (Argilas lônica, Lixiviação e Recuperação in situ)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Mineração Serra Verde	Operação de argilas lônicas em Minaçu, Goiás (Projeto Pela Ema)	Meta de 6,4 ktpa TREO até o fim de 2027; vida útil de 25 anos	Não divulgado de forma comparável	Financiamento DFC de US\$ 565M para otimização/expansão (não é CAPEX de operação)	n/a
Caldeira Meteoric, Brasil	Projeto Caldeira, MG, Fase PFS, argila lônica	6 Mtpa ROM; 13,6 ktpa REO; 4,23 ktpa NdPr	US\$ 8,91/kg TREO nos 5 primeiros anos; US\$ 9,78/kg TREO LOM	US\$ 443M	US\$ 32,6 mil/tpa REO; US\$ 104,8 mil/tpa NdPr
Colossus, Viridis, Brasil	Projeto Colossus, MG, Fase PFS, argila lônica	5 Mtpa ROM; 9,45 ktpa REO; 3,52 ktpa MREO	US\$ 6,20/kg TREO C1; US\$ 9,30/kg TREO AISC	US\$ 358M (inclui contingência de 25%)	US\$ 30,3 mil/tpa REO (com contingência); US\$ 101,8 mil/tpa MREO (com contingência)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Carina, Aclara, Brasil	Projeto Carina, Nova Roma GO, Fase FS, argila iônica	4,38 ktpa REO em MREC; 1,19 ktpa NdPr, 156 tpa Dy, 27 tpa Tb	US\$ 13,1/t processada; (não diretamente comparável a US\$/kg TREO)	US\$ 780,9M (inclui US\$ 102,7M de contingência)	US\$ 178 mil/tpa REO (com contingência); US\$ 568,3 mil/tpa NdPr+Dy+Tb (com contingência)
Brazilian Critical Minerals, Brasil	Projeto Ema, AM, Argilas iônicas, DFS Publicado em junho 2026	Média LOM de 10,5 ktpa MREC, 5,5 ktpa TREO e 1,9 ktpa MREO	C1: US\$ 8,84/kg TREO; US\$ 22,44/kg MREO	US\$ 101M (Estágio 1 e 2, inclui contingência)	US\$ 18,4 mil/tpa TREO; US\$ 53,2 mil/tpa MREO, considerando o CAPEX total e a produção média LOM

Fontes⁴²:

- A Mineração Serra Verde entrou em produção comercial em 2024 e informa meta de 6,4 kt/ano de óxidos de terras raras até o fim de 2027, com vida útil de 25 anos; a empresa informa em 2026 que o depósito é de argila iônica, raso e sem geração de rejeito úmido. O anúncio da parceria com a USA *Rare Earth* informa que a fase 1 da Serra Verde deve atingir aproximadamente 6,4 ktpa TREO, com potencial de expansão de ROM antes de 2030 e financiamento DFC de US\$ 565M para otimização e expansão.
- O PFS do Projeto Caldeira, da *Meteoric Resources* (2025) considera lavra de 6 Mtpa de ROM com produção média de 13.584 tpa REO, 4.228 tpa NdPr, CAPEX de US\$ 443,4M e OPEX de US\$ 8,91/kg TREO nos 5 primeiros anos e US\$ 9,78/kg TREO LOM.
- O PFS do Projeto Colossus, da *Viridis* (2025), indica lavra de 5 Mtpa de ROM com produção de 9.448 tpa REO, 3.518 tpa MREO, CAPEX de US\$ 358M, C1 de US\$ 6,20/kg TREO e AISC de US\$ 9,30/kg TREO.
- O FS do Projeto Carina, da Aclara (2026), reporta produção média de 4.378 tpa REO em MREC, incluindo 1.191 tpa NdPr, 156 tpa Dy e 27 tpa Tb, com CAPEX total de US\$ 780,9M; o custo reportado é US\$ 13,1/t processada (o que indica que deve ser tratado separadamente dos *benchmarks* em US\$/kg TREO).
- O Bankable Feasibility Study do projeto Ema foi publicado em junho 2026. O CAPEX do Estágio 1 de US\$ 74M inclui contingência de 14.4% e um sistema de captura de carbono. A intensidade foi calculada sobre o investimento total de US\$ 101 milhões (Estágio 1 e 2) e a produção média do plano completo.

42 Disponíveis:

<https://www.serraverde.com/operations/>
<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1970622/000121390026045339/ea028691001ex99-1.htm>
<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/MEI/02969122.pdf>
<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/VMM/02965946.pdf>
<https://www.juniorminingnetwork.com/junior-miner-news/press-releases/3072-tsx/ara/201065-aclara-announces-filing-and-results-of-feasibility-study-for-its-flagship-carina-project.html>
<https://smallcaps.com.au/article/brazilian-critical-minerals-delivers-strong-ema-bankable-feasibility-study>

Tabela 22. Benchmarking para *Upstream B* (Rocha Dura e Monazita)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Nolans, Arafura, Austrália	Greenfield integrado, mina + planta química até óxidos separados	4,44 ktpa NdPr óxido; ~0,57 ktpa SEG/HRE óxido; 144 ktpa ácido fosfórico	US\$ 43,7/kg NdPr; US\$ 28,6/kg NdPr (após crédito de P ₂ O ₅)	US\$ 1,226 B	US\$ 276,1 mil/tpa óxido NdPr; US\$ 244,6 mil/tpa considerando conjuntamente 4,44 ktpa de NdPr e 0,573 ktpa de SEG/HRE
Eneabba, Iluka, Austrália	Refinaria para monazita/xenotima e terceiros	Alimentação de 55 ktpa de concentrado; 23 tkpa de REO. Circuitos de até 5,5 ktpa NdPr e 0,75 ktpa Dy+Tb)	Não divulgado de forma comparável	US\$ 1,19 a 1,26 B	US\$ 51,7 a 54,8 mil/tpa REO sobre a capacidade plena de 23 tkpa; US\$ 68,0 a 72,0 mil/tpa sobre a capacidade 17,5 ktpa
Grupo Lynas: Projeto Mt Weld; Projeto Kalgoorlie; e Projeto Malaysia	Operação integrada de referência: Mt Weld: mina e concentração; Kalgoorlie: MREC; Malaysia: separação	Mt Weld: 12 ktpa NdPr; Kalgoorlie MREC: suporta 9 ktpa NdPr; Malaysia 10,5 ktpa NdPr	Não divulgado de forma comparável	N/A	Referência operacional de escala

Fonte⁴³:

- O projeto Nolans, da Arafura na Austrália, é uma referência para operação integrada de mina + processamento químico até óxidos separados, com CAPEX de US\$ 1,226B, produção de 4.440 tpa óxido de NdPr e custo operacional de US\$ 43,7/kg NdPr, ou US\$ 28,6/kg NdPr após crédito de ácido fosfórico.
- O FID (Final Investment Decision) da Iluka para Eneabba (2024) informa capacidade modelada de 17,5 ktpa TREO, capacidade total de 23 ktpa TREO, 4 ktpa NdPr e 0,5 ktpa Dy+Tb; o CAPEX original foi indicado em US\$ 700 a 860M, e a refinaria recebeu posteriormente financiamento público de US\$ 1,14B.
- Lynas (2025) é referência operacional fora da China: Mt Weld é mina/concentrador, Kalgoorlie produz MREC e Malaysia faz separação; a empresa informa capacidades de infraestrutura de 12 ktpa NdPr na unidade Mt Weld, 9 ktpa NdPr na unidade Kalgoorlie e 10,5 ktpa NdPr na unidade Malaysia.

43 Disponíveis em:

<https://www.arultd.com/projects/nolans/project-update/>
<https://www.iluka.com/media/qx4hjxxd/6dec24-eneabba-rare-earths-positive-outcome-of-funding-discussions-and-updated-economics-presentation.pdf>
<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/LYC/03028317.pdf>

Tabela 23. Benchmarking para Midstream A (Separação Química)

Bench-mark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Project Dynamo, Aclara, EUA	Separação de MREC para óxidos individuais	1.131 tpa óxido NdPr; 148 tpa óxido Dy; 25 tpa óxido Tb	US\$ 12,6/kg TREO alimentado à planta	US\$ 277M + Capital de giro de US\$ 52M apresentado em separado	US\$ 212,4 mil/tpa de óxido NdPr+Dy+Tb sobre o CAPEX; US\$ 252 mil/tpa incluindo o capital de giro
Eneabba, Iluka, Austrália	Separação de monazita e xenotima para óxidos	Alimentação de 55 ktpa de concentrado; 23 tkpa de REO. Circuitos de até 5,5 ktpa NdPr e 0,75 ktpa Dy+Tb)	Não divulgado de forma comparável	US\$ 1,19 a 1,26 B	US\$ 51,7 a 54,8 mil/tpa REO sobre a capacidade plena de 23 tkpa; US\$ 68,0 a 72,0 mil/tpa sobre a capacidade 17,5 ktpa
Lynas Malaysia, Malásia	Separação e acabamento de óxidos	10,5 ktpa NdPr de capacidade nominal expandida, além de outros óxidos	Não divulgado de forma comparável	N/A	Referência operacional de grande escala
Nolans, Arafura, Austrália	Mina + separação integrada até óxidos	4,44 ktpa óxido NdPr + óxido Samário-Európio-Gadolínio e ETR pesados (HRE)	US\$ 43,7/kg NdPr; US\$ 28,6/kg após crédito P ₂ O ₅	US\$ 1,226B	US\$ 276 mil/tpa NdPr

Fonte⁴⁴:

- O projeto Dynamo da Aclara (2026), na Luisiania, EUA, foi projetado para processar MREC do Projeto Carina em óxidos individuais de NdPr, Dy e Tb; o estudo reporta CAPEX de US\$ 277M, *working capital* de US\$ 52M, OPEX médio de US\$ 12,6/kg TREO processado e produção média de 1.131 tpa de óxido NdPr, 148 tpa óxido Dy e 25 tpa óxido Tb.
- O projeto Eneabba da Iluka (2022) é *benchmark* de separação de grande escala para ROM de areia monazítica/monazita/xenotima, com capacidade de 17,5–23 ktpa REO e CAPEX de US\$ 700 a 830M; pode ser usado referência de escala, mas é menos aderente à rota brasileira de argila iônica. No entanto, pode ser referência para futuros projetos de monazita no Brasil.
- A Lynas (2024) é uma referência operacional por escala e integração: a unidade Mt Weld produz concentrado, a unidade Kalgoorlie produz MREC e a unidade Lynas Malaysia separa e finaliza óxidos; a empresa indica capacidade nominal expandida na unidade da Malaysia de 10,5 ktpa NdPr.
- O anúncio do Grupo Arafura (2022) caracteriza Nolans como um projeto integrado “ore-to-oxide”, abrangendo mina, beneficiamento, processamento químico e produção de óxidos separados.

⁴⁴ Disponíveis em:

<https://www.newswire.com/news/aclara-announces-results-from-technical-reports-on-its-integrated-heavy-rare>
<https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20220404/pdf/457n00z958ghfd.pdf>
<https://lynasrareearths.com/mt-weld-western-australia-2/>
<https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20221111/pdf/45hscx5jhx0fh.pdf>

Eneabba e Nolans aparecem no *Upstream B* e no *Midstream A* porque são empreendimentos integrados que abrangem mais de uma fronteira industrial. Seus CAPEX e intensidades não constituem observações independentes em cada seção e não devem ser somados ou utilizados duas vezes em uma mesma análise. Da mesma forma, Mt Weld, Kalgoorlie e Lynas Malaysia representam estágios sucessivos da cadeia integrada da Lynas. A capacidade de cada instalação não deve ser somada como se correspondesse à produção de três volumes independentes de NdPr.

Tabela 24. Benchmarking para *Midstream B* (Metalurgia e Ligas)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Aclara Metals & Alloys, EUA/Chile	Metalurgia + strip casting para ligas NdFeB	811 tpa metal NdPr; 154 tpa liga FeDy; 19 tpa metal Tb metálico; 2.681 tpa liga NdFeB; capacidade nominal de 3.500 tpa	US\$ 17/kg óxido NdPr; US\$ 31/kg óxido Dy; US\$ 92/kg óxido Tb; US\$ 2/kg liga NdFeB	US\$ 149M + Capital de giro de US\$ 11M	US\$ 55,6 mil/tpa sobre a produção de 2.681 tpa em ligas; US\$ 42,6 mil/tpa sobre a capacidade nominal de 3.500 tpa (ambas calculadas somente sobre o CAPEX)
USA Rare Earth, unidades Stillwater e Blacksborg, EUA	Unidade integrada de metalização, ligas, strip casting e fabricação de ímãs	5 ktpa de metais/ligas e 6,4 ktpa de ímãs NdFeB nos EUA;	Não divulgado	US\$ 1,2 B para o complexo integrado	US\$ 105,3 mil/tpa, estimados se o CAPEX for dividido pelos 11,4 ktpa de produtos combinados
MP Materials, Unidades Independence e 10X, EUA	Metalurgia integrada para ligas e ímãs	Independence: 1 ktpa ímãs; 10X: 10 ktpa NdFeB para ímãs	Não divulgado	10X: investimento de >US\$ 1,25B	US\$ 125 mil/tpa para 10 ktpa de ímãs, mas inclui escopo de operações integradas

Fonte:⁴⁵

- A Aclara (2026) informa que sua unidade de metais e ligas deve produzir 154 tpa FeDy, 19 tpa Tb metal, 811 tpa NdPr metal e 2.681 tpa liga NdFeB, com capacidade nominal de 3.500 tpa de ligas; o estudo reporta CAPEX de US\$ 149M, working capital de US\$ 11M e OPEX por insumo/etapa.
- A USA Rare Earth (2026) informa que as unidades Stillwater e Blacksborg devem formar a base de produção de ímãs NdFeB e metais/ligas.
- A MP Materials (2025) informa que a unidade Independence deve produzir cerca de 1.000 tpa de ímãs NdFeB. Os dados de capacidade e investimento divulgados para Independence e 10X estão associados principalmente à fabricação de ímãs e não permitem isolar uma unidade econômica de metais ou ligas. O benchmark deverá permanecer somente no *downstream*, evitando dupla contagem.

45 Disponíveis em:

<https://www.newswire.com/news/aclara-announces-results-from-technical-reports-on-its-integrated-heavy-rare>
<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1970622/000121390026063832/ea029312701ex99-1.htm>
<https://investors.mpmaterials.com/investor-news/news-details/2025/MP-Materials-Restores-U.S.-Rare-Earth-Magnet-Production/default.aspx>

Tabela 25. Benchmarking para Downstream (Componentes Funcionais)

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
MP Materials Independence, EUA	Ímãs NdFeB: planta integrada	~1.000 tpa de ímãs NdFeB acabados	Não divulgado	Não divulgado em base específica para ímãs	n/a
MP Materials e 10X, Northlake, EUA	Unidade integrada de fabricação de ímãs	Capacidade total esperada de 1k ttpa ímãs de NdFeB	Não divulgado	>US\$ 1,25B	>US\$ 125 mil/tpa
USA Rare Earth, Stillwater, EUA	Fabricação de ímãs NdFeB; Linha 1a comissionada em março de 2026	600 tpa de ritmo de produção até 2026; expansão para 1,2 ktpa no primeiro trimestre de 2027	Não divulgado	Não divulgado em base isolada	n/a
USA Rare Earth, Blacksburg, EUA	Complexo integrado de metais, ligas e ímãs NdFeB	6,4 ktpa de ímãs e 5 ktpa de metais/ligas	Não divulgado	US\$ 1,2 bilhão para o complexo integrado	US\$ 187,5 mil/tpa na base da capacidade de ímãs; US\$ 105,3 mil/tpa sobre os produtos combinados
Neo Performance Materials, Narva, Estônia	Planta comercial de ímãs permanentes NdFeB	Capacidade 2 ktpa de ímãs; Expansão futura para 5 ktpa anunciada (sem CAPEX incremental segregado)	Não divulgado	US\$ 75 milhões para a capacidade inicial	US\$ 37,5 mil/tpa sobre a capacidade inicial de 2 ktpa

Fonte:⁴⁶

- A MP Materials (2026) informa que a unidade Independence deve produzir aproximadamente 1.000 tpa de ímãs NdFeB acabados, com ramp-up a partir de 2025; a mesma fonte indica produção de >45.000 t REO em concentrado e ~1.300 t óxido NdPr em 2024. O projeto 10X/Northlake prevê investimento superior a US\$ 1,25B e capacidade total de aproximadamente 10.000 tpa de ímãs NdFeB, com comissionamento previsto para 2028.
- Stillwater e Blacksburg não devem ser tratados como uma única planta. O CAPEX de Blacksburg inclui etapas de metais e ligas, enquanto o CAPEX isolado de Stillwater não foi divulgado.
- Neo Performance Opens State-of-the-Art Permanent Magnet Facility in Europe (2025).

46 Disponíveis em:

<https://mpmaterials.com/news/mp-materials-selects-northlake-texas-as-the-site-of-10X-a-new-us-rare-earth-magnet-manufacturing-campus/>
<https://www.usare.com/operations/>
<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1970622/000121390026063832/ea029312701ex99-1.htm>
<https://www.nist.gov/news-events/news/2026/06/departament-commerces-chips-program-finalizes-definitive-agreement-usa-rare>
<https://www.neomaterials.com/neo-opens-state-of-the-art-magnet-facility-europe/>
<https://www.ft.com/content/6b16c87e-bdfd-45ab-ab01-b69d97541126>

A Economia Circular das terras raras deve separar duas rotas industriais:

- **Rota curta (ou magnet-to-magnet):** desmontagem, desmagnetização, trituração, decrepitação por hidrogênio, classificação, ajuste de composição, produção de liga ou pó e fabricação de novos ímãs.
- **Rota longa (ou magnet-to-oxide):** desmontagem e preparação, lixiviação, remoção de impurezas, separação química, precipitação e calcinação para produção de MREO ou óxidos separados de Nd, Pr, Dy e Tb, seguidas, quando aplicável, por metalização e fabricação de novos ímãs.

Os denominadores deverão ser identificados em cada *benchmark*:

- toneladas anuais de equipamentos ou componentes em fim de vida;
- toneladas anuais de ímãs ou resíduos magnéticos alimentados;
- toneladas anuais de MREO ou óxidos separados;
- toneladas anuais de ligas, pós ou ímãs produzidos.

A intensidade calculada por tonelada de equipamentos contendo ímãs não é comparável à intensidade por tonelada de óxido ou de ímã acabado.

Tabela 26. *Benchmarking para Economia Circular A: Mineração urbana e preparação de materiais magnéticos*

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Cyclic Materials, Mesa, EUA	Primeira instalação comercial MagCycle para recebimento, desmontagem e processamento de produtos em fim de vida contendo ímãs permanentes	Até 25 ktpa de equipamentos e componentes em fim de vida	Não divulgado	Superior a US\$ 20 milhões	Superior a US\$ 800/tpa de capacidade de alimentação

Fonte⁴⁷:

- Cyclic Materials: o denominador de 25 ktpa corresponde à massa de equipamentos e componentes recebidos, e não à massa de ímãs ou de terras raras recuperadas. A intensidade de US\$ 800/tpa é, portanto, um benchmark de mineração urbana e preparação física, não de produção de MREO.

Não foram identificados outros projetos independentes de desmontagem e preparação de ímãs com capacidade, CAPEX e OPEX simultaneamente divulgados em base suficientemente

⁴⁷ Disponível em: <https://via.ritzau.dk/pressemeddelelse/14367860/cyclic-materials-to-invest-over-usd-dollar20m-in-its-first-commercial-facility-in-the-united-states?lang=en&publisherId=90456>

segregada. Plantas que integram preparação e processamento químico deverão permanecer na tabela de reciclagem e não ser contabilizadas novamente nesta seção.

Tabela 27. Benchmarking para Economia Circular B: Reciclagem direta e recuperação até óxidos

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Ionic Technologies Belfast	Rota hidrometalúrgica longa para reciclagem de ímãs NdFeB e resíduos de fabricação até óxidos separados	1,2 ktpa de ímãs e resíduos alimentados; aproximadamente 400 tpa de REO separados	US\$ 27,68/kg REO, excluindo o custo de aquisição dos ímãs e resíduos alimentados	US\$ 108,7 milhões, incluindo contingência	US\$ 90,6 mil/tpa de alimentação; US\$ 271,8 mil/tpa de REO separado
Cyclic Materials, Carolina do Sul, EUA	Planta integrada Spoke-and-Hub para processamento de material magnético e produção de MREO reciclado	Fase inicial: 2 ktpa de material magnético e 600 tpa MREO; expansão projetada para 6 ktpa de alimentação e 1,8 ktpa MREO	Não divulgado	Superior a US\$ 82 milhões	Superior a US\$ 41 mil/tpa de alimentação e superior a US\$ 136,7 mil/tpa MREO na fase inicial
HyProMag USA, EUA	Rota curta baseada em processamento de ímãs, decrepitação por hidrogênio, produção de liga e novos ímãs NdFeB	941 tpa de ímãs acabados e 611 tpa de produtos de liga; total de 1.552 tpa	AISC de US\$ 22,30/kg de produto NdFeB	US\$ 142 milhões	US\$ 150,9 mil/tpa de ímãs acabados; US\$ 91,5 mil/tpa considerando conjuntamente ímãs e produtos de liga

Fonte: ⁴⁸

- Ionic Technologies: o OPEX exclui o valor de aquisição dos ímãs ou resíduos alimentados e não deve ser interpretado como custo caixa completo. A produção de aproximadamente 400 tpa compreende principalmente óxidos separados de NdPr, Dy e Tb.
- Cyclic Materials: as intensidades devem ser calculadas apenas para a capacidade inicial. A expansão para 6 ktpa de alimentação e 1,8 ktpa MREO não possui CAPEX incremental segregado nas informações divulgadas.
- HyProMag USA: o investimento abrange uma configuração integrada com instalações centrais e unidades de alimentação. A intensidade por ímã acabado não é diretamente comparável à intensidade por REO da Ionic Technologies ou da Cyclic Materials.

48 <https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20241118/pdf/06bhdjv6pmmqxs.pdf>
<https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/IXR/02881658.pdf>
<https://cyclicmaterials.earth/resources/cyclic-materials-to-expand-u-s-rare-earth-recycling-footprint-with-new-south-carolina-campus>
<https://mkango.ca/news/hypromag-usa-provides-positive-update-to-valuation-of-expanded-dallas-fort-worth-plant-and-commences-strategic-review-to/>

A estimativa de OPEX para a Economia Circular das ETR deve ser apresentada em pelo menos duas bases:

- Custo de conversão: desmontagem, desmagnetização, trituração, decrepitação, lixiviação, reagentes, separação, precipitação, calcinação, metalização, energia, mão de obra, manutenção e tratamento de resíduos, excluindo o custo da alimentação.
- Custo total: custo de conversão mais aquisição, coleta e transporte dos ímãs ou equipamentos, deduzidos créditos por aço, cobre, alumínio, plásticos e outros materiais recuperados.

A recuperação de NdPr, Dy e Tb deve ser informada separadamente. Um alto rendimento de TREO pode ocultar perdas economicamente relevantes de Dy ou Tb.

Em rotas curtas, devem ser analisados a composição da liga, a contaminação, as propriedades magnéticas e o percentual de material virgem necessário para corrigir a composição. Em rotas longas, devem ser analisados o teor da alimentação, consumo de ácido e base, número de estágios de extração por solventes, pureza dos produtos, geração de efluentes e rendimento global até o óxido separado.

Os *benchmarks* mais aderentes ao contexto mineral brasileiro permanecem Serra Verde, Caldeira, Colossus, Carina e o Projeto Ema. Entretanto, esses projetos não devem ser agrupados sem considerar método de extração, recuperação, composição do MREC, conteúdo de NdPr/Dy/Tb, consumo de reagentes, teor de U/Th e estágio de desenvolvimento.

O BFS de junho de 2026 substitui a base econômica preliminar anteriormente utilizada para o Projeto Ema. Serra Verde permanece como referência operacional, mas seu pacote de financiamento não deverá ser tratado como CAPEX.

Nolans, Eneabba e a cadeia da Lynas são referências internacionais integradas. Quando aparecerem em mais de uma seção, seus CAPEX e capacidades deverão ser reconhecidos como os mesmos ativos ou estágios sucessivos, e não como observações econômicas independentes.

No *downstream*, Aclara Metals & Alloys deverá permanecer no estágio de metais e ligas. MP Materials, USA Rare Earth e Neo Performance Materials deverão ser usados como referências de fabricação de ímãs, com distinção entre capacidade existente, capacidade futura e investimentos integrados sem segregação por etapa.

A Economia Circular deverá manter separadas a mineração urbana, a reciclagem direta de ímãs e a recuperação química até óxidos. Cyclic Mesa utiliza como denominador a massa de equipamentos e componentes; Ionic Technologies e Cyclic South Carolina utilizam alimentação magnética e produto em REO; HyProMag utiliza produtos de liga e ímãs acabados. Essas intensidades não pertencem a uma única curva sem normalização.

Para projetos brasileiros, os indicadores mínimos devem incluir capacidade de alimentação, massa e teor de ímãs contidos, composição Nd–Pr–Dy–Tb, recuperação por elemento, produto final, pureza, propriedades magnéticas, consumo de reagentes e energia, custo da alimentação entregue, créditos de coprodutos, capital de giro, utilização efetiva da capacidade e fronteira exata do CAPEX.

2.2.4 Fósforo (Fosfato)

O fósforo, lavrado no Brasil principalmente na forma de fosfato, é um insumo estratégico para o setor agrícola e para a segurança alimentar. Apesar de sua importância, o país ainda apresenta elevada dependência externa, especialmente pela forte demanda nacional por fertilizantes.

No cenário global, o Brasil detém cerca de 4,85 Gt de rocha fosfática, ocupando a 7ª posição em reservas, com aproximadamente 2,2% do total mundial (Tabela 28). O país também figura como o 7º maior produtor mundial, respondendo por cerca de 2,9% da oferta global de fosfato (ANM, 2025; (MANFREDI e CUNHA, 2026; USGS, 2025).

Em 2025, a produção nacional de minério bruto de fosfato foi de aproximadamente 42 milhões de toneladas ROM, das quais cerca de 8,91 milhões de toneladas corresponderam ao produto beneficiado (Tabela 28) (ANM, 2025). Apesar desse volume, a produção interna ainda é insuficiente para atender à demanda nacional, especialmente do setor agrícola.

Essa dependência é evidenciada pelo elevado volume de importações de fertilizantes, que varia anualmente entre 41 e 44 Mt. Além disso, cerca de 86% do fósforo utilizado na agricultura brasileira provém de fontes externas, reforçando a importância estratégica do fosfato para a segurança mineral e alimentar do país (ANDA, 2025).

Cerca de 80% dos depósitos brasileiros estão associados ao enriquecimento residual de complexos carbonatítico-alcálinos, enquanto os demais 20% ocorrem em contextos sedimentares. Atualmente, existem 12 minas de fosfato em operação no país, com destaque para os depósitos da Província Ígnea do Alto Paranaíba, como Barreiro/Araxá, Tapira, Mata da Corda e Serra do Salitre, além de Catalão I, Irecê/Fazenda Juazeiro e projetos como Santa Quitéria, Miriri e Três Estradas (MANFREDI; CUNHA, 2026), (Tabela 29, Figura 14).

Tabela 28. Produção de fosfato no Brasil, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia do fosfato.

Reservas*	Minas em Operação*	Produção (Rom; Mt)	Produção Beneficiada (Mt)***	Ranking Mundial	
4,85 Gt	12	42	8,91	Reservas:	7º (2,2%)**
				Produção:	7º (2,9%)*

Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2025 – Sumário Mineral 2025; *** ANM 2026 – Anuário Mineral Brasileiro Interativo **** USGS (2025)

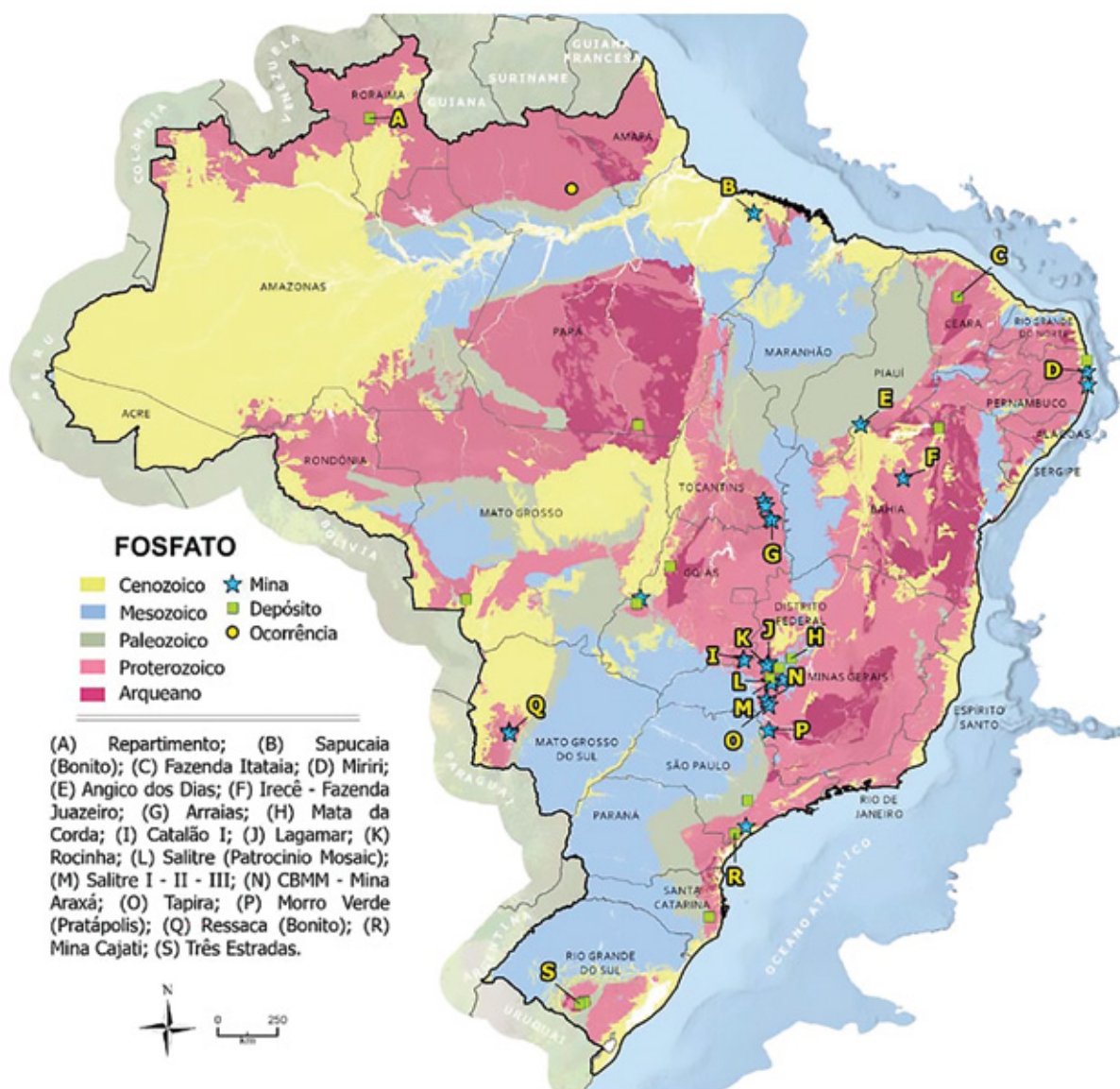
Tabela 29. Depósitos selecionados de fosfato no Brasil e seus respectivos recursos estimados

Depósito	Empresas operadoras	Recursos estimados (mt)	Teor (% p ₂ o ₅)	Status
barreiro - Complexo Araxá	Codemi/Mosaic	460	15.1	Produzindo
Rocinha	Fosfatados Centro	415	12.5	Interrompido
Tapira	Mosaic	432.5	9.0	Produzindo
Maecuru	Vale	200	15	Não explorado
Morro Preto Sul	CMOC	228	8.6	Viabilidade
Mata da Corda	Terra Brasil Direitos Minerários	520	3.5	Não explorado
Serra do Salitre (Eurochem)	Eurochem	350	4.5	Produzindo
Jauru (Mirassol D' Oeste)	BEMISA	314	5.0	Planejado
Santana (PA)	Itafós	87	12.0	Planejado
Mina Ouvidor/ Chapadão	CMOC	80.0	10.4	Produzindo
Fazenda Ipanema	Not available	117	6.1	Não explorado
Catalão I	Mosaic	65.5	10.4	Produzindo
Irecê/Fazenda Juazeiro	Galvani	40	15.0	Produzindo
Miriri	Elephant Mineração	114	4.2	Não explorado
Morro Verde (Pratápolis)	Morro Verde (Ore Investments)	50.6	9.2	Produzindo
Arraias	Itafos	91	4.9	Interrompido
Morro Preto Norte	CMOC	61	7.3	Viabilidade
Anitápolis	Mosaic	53	8.2	Não explorado

Depósito	Empresas operadoras	Recursos estimados (mt)	Teor (% p2o5)	Status
Três Estradas	Aguia Resources	74.7	4.1	Viabilidade
Cajati	Mosaic	55.7	5.4	Produzindo
Lucena	Aguia Resources	55	4.4	Não explorado
Angico dos Dias	Galvani	12.5	15.4	Produzindo
Juquiá (Registro)	Mineração Juquiá	18	10.0	Não explorado
Ressaca (Bonito)	Edem	11.5	14.0	Produzindo
Taipas	Rialma Fertilizantes	25	5.0	Planejado
Fazenda Itataia	Galvani	8.9	11.0	Viabilidade
Sapucaia/Boa Vista (Bonito)	Viso Fertilizantes (Grupo Scheffler)	4	21.0	Produzindo
Mundo Novo	EDEM/Summit Minerals	2.5	8.8	Viabilidade
Mandacaru (CE)	Harvest Minerals	4.38	4.5	Produzindo
Joca Tavares	Aguia Resources	2.75	4.4	Não explorado
Bonfim	FENGRO/DuSolo	1.16	8.2	Não explorado
Serrote da Batateira	CBPM	0.66	11.0	Não explorado
Repartimento	Não disponível	3.5	3 a 5	Não explorado

Fonte: Manfredi e Cunha, 2026.

Figura 14. Localização dos principais depósitos e ocorrências de fosfato do Brasil



Fonte: Compilado de Manfredi e Cunha, 2026.

A cadeia produtiva de fosfato no Brasil abrange a extração de minérios de fosfatos e se estende até a produção e distribuição de fertilizantes fosfatados (Figura 15).

O setor de extração conta com 18 minas em operação e a produção nacional de concentrados de fosfato, em 2025, foi de 8,9 Mt, não suficiente para atender à demanda do mercado. Como consequência, o Brasil ainda importa cerca de 85% de todo o fertilizante consumido. As importações de fertilizantes no Brasil em 2025 registraram recorde, totalizando 38,3 milhões de toneladas, refletindo a manutenção de uma alta demanda agrícola brasileira, aliada a uma estratégia de recomposição de estoques e de um movimento de substituição de produtos que foram adotados por produtores e distribuidores frente às condições de preço e disponibilidade (GlobalFert, 2025)

Figura 15. Panorama da atuação das empresas ao longo da cadeia de valor do fosfato.

Empresa / instituição	P&D	Upstream	Midstream Compostos químicos fosfatados + concen- trados	Downstream Fertilizantes, retardantes de chama, gesso	Recuperação Reciclagem
Mosaic					
CMOC					
Itafós					
Galvani					
EuroChem					
Yara					
Yoorin Fertilizantes					
YCL					
Timac Agro					
OCP Brasil					
EDEM					
Mineração Morro Verde					
Água Resources					

Presença forte
 Presença relevante
 Ausência de atuação

Cobertura por etapa: P&D: **8** UPSTREAM: **9** MIDSTREAM: **11** DOWNSTREAM: **1** RECUPERAÇÃO: **0**

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

No Brasil, várias empresas de grande porte mostram domínio parcial ou integral da cadeia de valor de fosfatos, produzindo concentrados fosfáticos, fertilizantes fosfatados e insumos relacionados. Estas se concentram preferencialmente na parte oriental do país (Figura 16).

Figura 16. Localização de empresas que dominam a cadeia produtiva de fosfato no Brasil

INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS

Mapa das plantas e minas de fosfato no Brasil

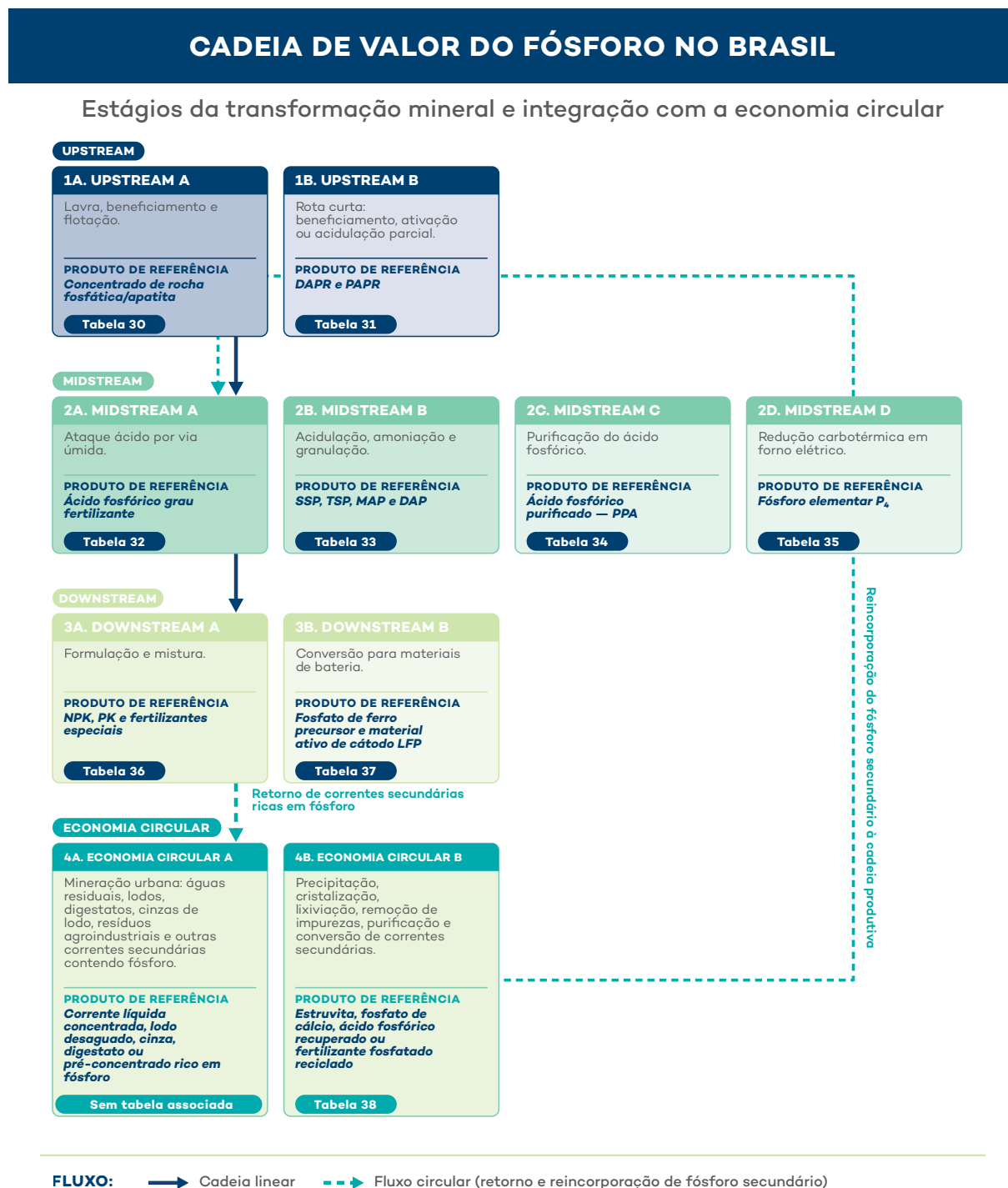
Localização das unidades operacionais por empresa, tipo de produto e capacidade



Fonte: GlobalFert, 2024.

A análise dos indicadores apresentados permite identificar os principais gargalos e oportunidades para o adensamento da cadeia de valor no contexto brasileiro.

Figura 17. Etapas da cadeia primária e da economia circular do Fósforo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

No Brasil, a análise comparativa deve privilegiar depósitos de apatita associados a complexos alcalino-carbonatíticos, frequentemente intemperizados, e plantas com britagem, moagem, deslamagem e flotação. Depósitos sedimentares de outros países são úteis como referência de escala, mas podem ter lavra e beneficiamento significativamente mais simples.

A intensidade de capital deverá ser calculada pelo CAPEX inicial ou de expansão dividido pela capacidade nominal anual correspondente à mesma fronteira industrial. Para expansões brownfield, deverá ser utilizado o CAPEX incremental dividido pela capacidade incremental. Não deverão ser somadas diretamente capacidades expressas em minério ROM, concentrado, produto fertilizante, ácido físico, P_2O_5 equivalente ou material ativo LFP. Projetos integrados, como Serra do Salitre e o programa da Paradeep Phosphates, podem aparecer em mais de uma seção para representar diferentes estágios da cadeia. Entretanto, seus investimentos não constituem observações independentes e não deverão ser somados ou contabilizados mais de uma vez em uma mesma análise.

Em relação às unidades para a análise comparativa entre projetos, os dados indicam produções reportadas em toneladas de: minério ROM; de concentrado fosfático; de produto fertilizante; de P_2O_5 contido; de ácido fosfórico em base úmida; e de ácido fosfórico em base 100% P_2O_5 . Essas unidades devem ser convertidas em P ou P_2O_5 conforme os padrões a seguir. Para fins de normalização:

$$P_2O_5 = P \times 2,2914$$

$$P = P_2O_5 \times 0,4364$$

$$P_2O_5 \text{ equivalente} = H_3PO_4 \text{ puro} \times 0,7244$$

$$H_3PO_4 \text{ puro} = P_2O_5 \times 1,3807$$

A massa física de uma solução de ácido fosfórico não equivale à massa de P_2O_5 . Por exemplo, uma tonelada de produto com 57% H_3PO_4 contém aproximadamente 0,413 t de P_2O_5 equivalente. Da mesma forma, a massa de estruvita, fosfato de cálcio, fertilizante granulado ou material ativo LFP não deverá ser tratada como massa de fósforo ou P_2O_5 sem conversão pela composição química do produto.

Tabela 30. Benchmarking para Upstream A (Lavra-Flotação)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Irecê, Galvani-Fosnor, Brasil	Greenfield de concentrado fosfático e corretivo agrícola	1,2 Mtpa de minério; 350 ktpa de concentrado; 600 ktpa de calcário agrícola	Não divulgado de forma comparável	US\$ 103,4 M	US\$ 296/tpa de concentrado, mas inclui a produção de 600 ktpa de corretivo agrícola
Bégin-Lamarche, First Phosphate, Canadá	Greenfield; apatita ígnea + magnetita	900 ktpa de concentrado, com aproximadamente 40% P ₂ O ₅	US\$ 154/t de concentrado antes de créditos; US\$ 85/t após crédito da magnetita	US\$ 476M	Aproximadamente US\$ 529/tpa de concentrado
Farim, Itafos, Guiné-Bissau	Greenfield; depósito sedimentar	1,75 Mtpa ROM; aproximadamente 1,36 Mtpa de concentrado	Aproximadamente US\$ 69/t de concentrado	US\$ 308M	Aproximadamente US\$ 227/tpa de concentrado
Serra do Salitre, EuroChem, Brasil	Complexo integrado mina-fertilizante	Aproximadamente 1 Mtpa de fertilizantes acabados	Não divulgado por etapa	Aproximadamente US\$ 1B para o complexo integrado	Não comparável a upstream isolado

Fonte:⁴⁹

- Projeto Irecê, BA (2025): o projeto prevê investimento de aproximadamente R\$ 340 milhões, com capacidade de 1,2 milhão de toneladas de minério por ano e produção de 350 mil t/ano de concentrado fosfático e 600 mil t/ano de calcário agrícola. Esse investimento atende os dois produtos, portanto a intensidade de R\$ 971/tpa não deve ser tratada como CAPEX só do concentrado.
- Bégin-Lamarche, Canadá (2025): PEA do projeto indica 900 ktpa de concentrado de apatita, CAPEX inicial de US\$ 476 milhões, OPEX de US\$ 154/t de concentrado antes do crédito da magnetita e US\$ 85/t líquido desse crédito. Esse projeto é uma referência mais próxima do Brasil do que outros depósitos tipos de sedimentares, por envolver apatita ígnea e flotação. Entretanto, clima, logística, energia e o crédito de magnetita precisam ser normalizados.
- Farim, Guiné-Bissau (2023): FS reporta 1,75 Mtpa de minério seco, produção aproximada de 1,36 Mtpa de concentrado na fase sul, CAPEX inicial de US\$ 308,3 milhões e custo de US\$ 69,0/t de concentrado. Farim é um depósito sedimentar com beneficiamento relativamente simples. Deve ser tratado como referência de grande escala e baixo custo, mas com atenção ao fato da geologia ser distinta em relação à apatita ígnea brasileira.
- Serra do Salitre, Minas Gerais (2024): referência de complexo integrado, mas seu CAPEX de aproximadamente US\$ 1 bilhão não poderá ser utilizado como CAPEX isolado da produção de concentrado. O mesmo investimento aparece em outros estágios do relatório e representa uma única cadeia integrada de mina, beneficiamento, ácidos e fertilizantes.

49 Disponíveis em:

https://galvanifertilizantes.com/wp-content/uploads/2026/04/23510-Relatorio_da_Administracao_2025.pdf
https://firstphosphate.com/wp-content/uploads/2025/01/FPC-Begin-Lamarche_PE_PEA_2025.01.17.pdf
<https://itafos.com/site/assets/files/1898/farim-ni-43-101-report-final-jun26.pdf>
<https://www.eurochemgroup.com/project/eurochem-serra-do-salitre-brazil/>
<https://www.eurochemgroup.com/media-announcements/eurochem-launches-state-of-the-art-phosphate-fertilizer-complex-in-brazil>

Tabela 31. Benchmarking para Upstream B (Aplicação direta e acidulação parcial)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Arraias DAPR, Itafos, Brasil	Restart, brownfield	Média aproximada de 45 ktpa DAPR*	US\$ 36,22/t de produto	CAPEX inicial total de US\$ 11,5 M, sendo US\$ 8 M para o retrofit da planta. Sustaining: US\$ 49 M ao longo da vida útil, apresentado separadamente.	n/a (os investimentos para DAPR, PAPR e SSP não foram segregados por produto)
Arraias PAPR, Itafos, Brasil	Restart/ brownfield	Média aproximada de 54,3 ktpa PAPR	US\$ 74,42/t de produto	Mesmo CAPEX compartilhado	Não atribuível isoladamente
Cabinda, Minbos, Angola	Greenfield, fertilizante fosfatado melhorado	187,5 ktpa na primeira linha; expansão adicional de 187,5 ktpa	US\$ 73,4/t de produto na planta de processamento	Aproximadamente US\$ 55,6 M na primeira etapa; US\$ 28,2 M para a segunda linha	Aproximadamente US\$ 296/tpa inicial e US\$ 150/tpa adicionada na expansão

*Nota:

DAPR (Direct Application Phosphate Rock): rocha fosfática para aplicação direta.

PAPR (Partially Acidulated Phosphate Rock): rocha fosfática parcialmente acidulada.

Fonte: ⁵⁰

- Projeto Arraias, Tocantins (2026): DAPR, PAPR e SSP pertencem ao mesmo plano de desenvolvimento. O CAPEX inicial de US\$ 11,5 milhões e o sustaining CAPEX de US\$ 49 milhões não deverão ser repetidos como investimentos independentes nas três linhas. Aproximadamente US\$ 8,0 milhões do capital inicial estão associados especificamente ao retrofit do beneficiamento e ao sistema de rejeitos filtrados.
- Projeto Minbos, Cabinda, Angola (2022): No projeto Cabinda, a primeira linha possui capacidade de 187,5 ktpa, com CAPEX combinado de mina e planta de aproximadamente US\$ 55,6 milhões. Uma segunda linha de igual capacidade foi estimada em US\$ 28,2 milhões. O custo da planta é reportado em US\$ 73,4/t de produto; o custo de mina possui outro denominador e não deve ser somado diretamente.

Na rota úmida, o concentrado fosfático reage normalmente com ácido sulfúrico, produzindo ácido fosfórico e fosfogesso. Para comparar projetos, é essencial diferenciar fatores como: concentração do ácido; produção em base física ou 100% P₂O₅; inclusão ou não da planta de ácido sulfúrico; tratamento e disposição de fosfogesso; origem e custo do enxofre; e integração com MAP, DAP ou TSP.

50 Disponíveis em:

https://itafos.com/site/assets/files/2441/itafos_-_arraias_43101_news_release_-_1_27_26_final.pdf
<https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20221017/pdf/45gcj21ypqfcd5.pdf>

Tabela 32. Benchmarking para *Midstream A* (Ácido Fosfórico – Via Úmida)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Paradeep Phosphates, Índia	Expansão brownfield de ácido fosfórico	+200 ktpa, elevando a capacidade de 500 para 700 ktpa	Não divulgado isoladamente	US\$ 30 M	US\$ 150/tpa adicionada
Coromandel Kakinada, Índia	Expansão integrada de ácidos	650 tpd de ácido fosfórico (237 ktpa) + 1.800 tpd de ácido sulfúrico	Não divulgado	US\$ 120 M para o conjunto integrado	US\$ 506/tpa de capacidade de ácido fosfórico
Abu Tartour, Egito	Greenfield	250 ktpa de ácido, em base 100% P ₂ O ₅	Não divulgado	US\$ 658 M	Aproximadamente US\$ 2.632/tpa P ₂ O ₅
First Phosphate, Canadá	Estudo industrial de planta para ácido fosfórico	190 ktpa de ácido fosfórico	Não divulgado publicamente de forma completa	US\$ 175 M	US\$ 921/tpa

Fonte: ⁵¹

- Paradeep (2026). PPL Outcome of the Board Meeting under Regulation 30 of the SEBI (Listing Obligations & Disclosure Requirements) Regulations, 2015
- Coromandel (2024): anunciou uma unidade de 650 t/d de ácido fosfórico e outra de 1.800 t/d de ácido sulfúrico em Kakinada, com investimento combinado superior a US\$ 105M. Portanto, a intensidade calculada não representa uma planta isolada de ácido fosfórico.
- Complexo Abu Tartour (2026): prevê 250 ktpa de ácido fosfórico comercial em base 100% P₂O₅, com investimento de US\$ 658 milhões.
- First Phosphate divulgou estudo de uma planta de aproximadamente 190 ktpa e CAPEX de US\$ 175 milhões. O estudo tem natureza industrial e não constitui relatório técnico dentro dos padrões internacional; a base de concentração do produto deve ser confirmada antes da análise comparativa.

51 Disponíveis em:

<https://www.paradeepphosphates.com/uploads/content/outcomeofboardmeeting1730193348.pdf>
https://www.murugappa.com/uploads/Coromandel_to_set_up_its_1000_Crore_plus_Phosphoric_Acid_and_Sulphuric_Acid_Plants_in_Kakinada_April_29_2024_0340cb930a.pdf
<https://abugir.net/minister-of-petroleum-and-mineral-resources-and-new-valley-governor-witness-the-signing-of-final-contracts-to-launch-the-phosphoric-acid-production-complex-in-new-valley>
<https://firstphosphate.com/first-phosphate-updates-on-corporate-developments-2/>

No caso de Paradeep, a expansão de 500 para 700 ktpa de ácido fosfórico constitui um subprojeto específico. A companhia divulgou posteriormente um programa integrado mais amplo, que prevê expansão da capacidade total de ácido fosfórico para 1,2 Mtpa, além de ampliações de ácido sulfúrico e granulação. O investimento do subprojeto não deverá ser simplesmente somado ao CAPEX do programa mais amplo sem confirmação de que esteja excluído deste último.



fábrica de fertilizantes fosfatados

Tabela 33. Benchmarking para *Midstream* B (Acidulação e Granulação)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Arraias SSP, Brasil	Restart, brownfield	Média de 161 ktpa SSP	US\$ 118/t de SSP	US\$ 11,5 M de CAPEX inicial (DAPR, PAPR e SSP); US\$ 8,0 M para retrofit da planta de beneficiamento; sustaining CAPEX de US\$ 49 M em separado	n/a
Serra do Salitre, Brasil	Greenfield integrado	Aproximadamente 1 Mtpa de fertilizantes fosfatados	Não divulgado por etapa	Próximo de US\$ 1B	Cerca de US\$ 1.000/tpa, mas para complexo integral mina-fertilizante
Paradeep, Índia	Expansão integrada	Granulação de 3,9 para 5,0 Mtpa; Ácido fosfórico de 0,5 para 1,2 Mtpa; Ácido sulfúrico de 1,93 para 3,53 Mtpa	Não divulgado isoladamente	US\$ 406 M para o programa completo	n/a
CILEM, Galvani, Brasil	Expansão brownfield de granulação	Capacidade da planta de granulação expandirá de 500 para 950 ktpa	Não divulgado	CAPEX corporativo de US\$ 102,1 M compartilhado com Irecê e outros projetos do grupo	Não atribuível isoladamente

Fonte:⁵²

- Arraias (2026): OPEX de US\$ 118,28/t de SSP e produção média aproximada de 161,1 ktpa, mas utiliza infraestrutura compartilhada com DAPR e PAPR.
- Serra do Salitre (2026): referência brasileira de integração vertical, com capacidade próxima de 1 Mtpa e investimento próximo de US\$ 1B. A intensidade de US\$ 1.000/tpa representa o complexo completo, incluindo mina, beneficiamento, ácido e fertilizantes.
- Paradeep (2026): O investimento abrange três locais industriais e amplia simultaneamente granulação, ácido fosfórico e ácido sulfúrico. Não deverá ser dividido apenas pelos 1,1 Mtpa adicionados de granulação como se correspondesse a uma expansão isolada de fertilizantes.
- Galvani (2025): ampliação de aproximadamente 400 ktpa na capacidade de granulação da CILEM. O CAPEX de R\$ 587M divulgado para 2025 também abrange Irecê e outros investimentos, não podendo ser usado diretamente como CAPEX unitário da granulação.

52 Disponíveis em:
https://itafos.com/site/assets/files/2441/itafos_-_arraias_43101_news_release_-_1_27_26_final.pdf
<https://www.eurochemgroup.com/project/eurochem-serra-do-salitre-brazil/>
<https://www.paradeepphosphates.com/uploads/content/paradeep-phosphates-earnings-ppt-q2fy26-final-version1.pdf>
https://galvanifertilizantes.com/wp-content/uploads/2026/04/23510-Relatorio_da_Administracao_2025.pdf

Serra do Salitre, Paradeep e Arraias aparecem em mais de uma seção porque abrangem etapas integradas. Seus CAPEX deverão ser registrados apenas uma vez em análises consolidadas, com indicação da fronteira industrial correspondente.

O PPA é produzido pela purificação do ácido fosfórico, normalmente usando extração por solventes e outras etapas de remoção de metais e impurezas. Pode atender aplicações alimentícias, industriais, eletrônicas e de baterias.

Tabela 34. Benchmarking para *Midstream C* (Ácido Fosfórico Purificado)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Arianne PPA, Canadá	Estudo integrado de MGA/PPA	350 ktpa PPA em base 100% P_2O_5 ; adicional de 220 ktpa de ácido secundário	Aproximadamente US\$ 1.195/t PPA	US\$ 1,65 B incluindo US\$ 240 M de contingência	US\$ 4.714/tpa PPA; ou US\$ 2.895/tpa em base 100% P_2O_5
EMAPHOS/OCP, Marrocos	Expansão operacional	Capacidade de PPA de 140 para 280 ktpa P_2O_5	Não divulgado	Não divulgado	Referência de escala
Prayon Bex, Suíça	Expansão de ácido grau eletrônico	Capacidade anunciada como duplicação	Não divulgado	Não divulgado	Referência tecnológica

Fonte: ⁵³

- Arianne (2024): PFS considera 350 ktpa de PPA em base 100% P_2O_5 , mais 220 ktpa de produto ácido secundário, CAPEX de US\$ 1,65B e custo operacional de US\$ 1.195/t de PPA. O escopo inclui logística de concentrado, ácido sulfúrico, ácido fosfórico de via úmida e purificação.
- EMAPHOS (2020): o grupo ampliou a capacidade de ácido fosfórico purificado de aproximadamente 140 para 280 ktpa de P_2O_5 . Não há CAPEX e OPEX públicos isolados suficientemente detalhados para uma curva de custo.
- Prayon (2025): anúncio de nova unidade para duplicar sua capacidade de ácido fosfórico grau eletrônico em Bex, com entrada prevista para 2028, mas não divulgou capacidade absoluta ou CAPEX.

53 Disponíveis em:

<https://www.arianne-inc.com/arianne-phosphate-announces-positive-results-from-its-purified-phosphoric-acid-prefeasibility-study/>
<https://www.arianne-inc.com/arianne-phosphate-provides-clarification-to-prior-news-release>
<https://www.ocpgroup.ma/en/press-release/emaphos-launches-new-unit-to-double-its-production-capacity>
<https://www.prayon.com/en/news/prayon-invests-in-a-new-unit-to-double-its-electronic-grade-phosphoric-acid-production/>

A rota térmica utiliza rocha fosfática, coque/carbono, sílica/quartzo em forno elétrico submerso para produzir fósforo elementar P_4 . É uma cadeia diferente da produção de ácido fosfórico por via úmida. Seu principal direcionador econômico é o consumo de eletricidade, seguido por coque, sílica, qualidade da rocha e tratamento dos gases.

Para o contexto brasileiro, a rota P_4 deve ser tratada como rota industrial potencial, podendo ser uma opção futura para o *midstream* do fosfato nacional.

Tabela 35. Benchmarking para *Midstream* D (Fósforo Elementar P_4)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Duc Giang Chemicals, Vietnã	Operação integrada e referência de escala para fósforo amarelo	Produção de aproximadamente 54,1 kt de fósforo amarelo em 2022. Expansão com linha adicional de 20 ktpa	Não divulgado	Não divulgado	Referência operacional

Fonte:⁵⁴

- Duc Giang (2023): produção de aproximadamente 54.145 t de fósforo amarelo em 2022 e implantação de linha adicional de cerca de 20 ktpa. A empresa também informou vendas próximas de 57.400 t de fósforo industrial em 2023.
- Não foram identificados, nas fontes públicas recentes consultadas. Esta etapa deve permanecer como referência de escala operacional. Para o contexto brasileiro, a rota P_4 deve ser tratada como rota industrial potencial.

O *downstream* de fertilizantes formulados considera a mistura, formulação, recobrimento, micronutrientes, ensacamento e distribuição como NPK, PK ou fertilizantes especiais.

54 Disponíveis em:

<https://ducgiangchem.vn/en/dgc-tiep-tuc-lot-top-50-cong-ty-niem-yet-tot-nhat-cua-nam-2023/>
<https://ducgiangchem.vn/en/hoa-chat-duc-giang-dgc-chi-phoi-1-3-luong-phot-pho-vang-xuat-khau-toan-cau/>

Tabela 36. Benchmarking para *Downstream A* (Fertilizantes Formulados)

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Serra do Salitre, Brasil	Complexo integrado	1 Mtpa de produtos fertilizantes	Não disponível	US\$ 1 B para o complexo integrado	US\$ 1.000/tpa, mas para toda a cadeia mina–fertilizante
Galvani CILEM, Brasil	Granulação e formulação brownfield	Capacidade indicada de 500 para 950 ktpa	Não disponível	Parte de US\$ 101,2 M de CAPEX corporativo compartilhado	n/a
Paradeep Phosphates, Índia	Programa integrado de granulação e produção de ácidos em três localidades	Granulação de 3,9 para 5,0 Mtpa, além das expansões de ácido fosfórico e sulfúrico	Não disponível	US\$ 406 M para o programa integrado	n/a para formulação ou granulação isolada

Fonte:

- Serra do Salitre (2026): referência brasileira de integração vertical, com capacidade próxima de 1 Mtpa e investimento próximo de US\$ 1B. A intensidade de US\$ 1.000/tpa representa o complexo completo, incluindo mina, beneficiamento, ácido e fertilizantes.
- Galvani (2025): ampliação de aproximadamente 400 ktpa na capacidade de granulação da CILEM. O CAPEX de R\$ 587M divulgado para 2025 também abrange Irecê e outros investimentos, não podendo ser usado diretamente como CAPEX unitário da granulação. O Projeto Santa Quitéria, parceria da Galvani Fertilizantes e a INB (Indústrias Nucleares do Brasil), prevê investimentos de cerca de R\$ 3 bilhões para explorar uma jazida em Santa Quitéria (CE).
- Paradeep (2026): projeto de expansão eleva a capacidade de granulação de aproximadamente 3,9 para 5,0 Mtpa, junto com ampliações de ácido fosfórico e sulfúrico, em um programa de US\$ 37,3M.

As linhas de Serra do Salitre, CILEM e Paradeep repetem projetos já apresentados em estágios anteriores. Esses benchmarks são úteis como referência para analisar as escalas industriais e o grau de integração dos projetos. Uma planta de mistura e ensacamento do tipo do *downstream A* possui intensidade de capital muito inferior à de um complexo integrado com ácidos e granulação.

O *downstream* de LFP considera a cadeia de PPA para fosfato de ferro e para material ativo de cátodo LFP. É importante não atribuir todo o CAPEX de uma fábrica de LFP à etapa de fósforo: o produto também incorpora outras substâncias como ferro e lítio, além de controle de partículas, tratamento térmico e revestimento de carbono.

Tabela 37. Benchmarking para *Downstream B* (LFP)

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
First Saguenay, First Phosphate, Canadá	Fosfato de ferro precursor	11.882 tpa em plena escala prevista	Não disponível	US\$ 76 M financiamento estimado; não confirmada como CAPEX de construção	US\$ 6.396/tpa LFP
Nano One, Canadá	Projeto de planta de material ativo LFP, com processo One-Pot	25 ktpa em duas linhas de 12,5 ktpa	Não disponível	ão disponível	n/a
ICL St. Louis, EUA	Projeto de material ativo LFP posteriormente descontinuado	30 ktpa	Não disponível	US\$ 400 M	13.333/tpa LFP

Fonte:⁵⁵

- First Phosphate (2025): instalação de fosfato de ferro com capacidade de aproximadamente 11.882 tpa e necessidade de financiamento de cerca de US\$ 76M. O valor resulta em intensidade aproximada de US\$ 6.396/tpa.
- Nano One (2025): planta LFP de 25 ktpa, composta por duas linhas de 12,5 ktpa. O CAPEX integral ainda não foi tornado público em base suficiente para benchmark.
- ICL (2026) projeto de fábrica de LFP de 30 ktpa e investimento de US\$ 400M em St. Louis. Entretanto, a ICL posteriormente decidiu descontinuar os projetos de LFP nos Estados Unidos e na Espanha, sendo apenas benchmark de concepção e intensidade de capital e não como capacidade futura confirmada.

A Economia Circular do fósforo abrange a recuperação do nutriente presente em estoques e fluxos antropogênicos, principalmente águas residuais municipais e industriais, lodos de esgoto, dejetos animais, resíduos agroindustriais e cinzas de mono-incineração de lodo.

O fluxo industrial de referência é: águas residuais, lodos, digestato, dejetos, resíduos agroindustriais ou cinzas; coleta e concentração; espessamento e desaguamento; preparação da corrente secundária; precipitação/cristalização direta ou mono-incineração seguida de

55 Disponíveis em:

<https://firstphosphate.com/first-phosphate-updates-on-corporate-developments-2/>
<https://nanoone.ca/wp-content/uploads/2025/04/AIF-Final.pdf>
<https://investors.icl-group.com/reports-news-and-events/press-releases/press-releases-details/2022/ICL-to-Lead-Efforts-in-U.S.-to-Develop-Sustainable-Supply-Chain-for-Energy-Storage-Solutions-with-400-Million-Investment-in-New-Lithium-Iron-Phosphate-Manufacturing-Capabilities/default.aspx>
<https://investors.icl-group.com/reports-news-and-events/press-releases/press-releases-details/2026/ICL-Reports-Fourth-Quarter-and-Full-Year-2025-Results/default.aspx>

lixiviação; remoção de metais e outras impurezas; precipitação, purificação ou concentração; estruvita, fosfato de cálcio, ácido fosfórico recuperado ou fertilizante fosfatado reciclado.

As duas rotas principais deverão permanecer separadas:

- Recuperação em correntes líquidas, normalmente por precipitação ou cristalização de estruvita ou fosfato de cálcio.
- Recuperação a partir de cinzas, normalmente por lixiviação, separação de impurezas e produção de ácido fosfórico ou fosfato reciclado.

Nos benchmarks públicos selecionados (4ª), a captura da corrente, sua preparação e a recuperação do fósforo estão integradas no mesmo empreendimento, sem CAPEX ou OPEX segregados.

Por isso, cada empreendimento deverá aparecer apenas uma vez, na seção “4b Recuperação e produção de fósforo secundário”, com indicação tanto da capacidade de alimentação quanto da capacidade do produto, quando ambas estiverem disponíveis.

Para futuros projetos, a etapa de preparação das correntes secundárias recomenda-se que sejam registrados separadamente:

- vazão e concentração de fósforo da corrente líquida;
- toneladas de matéria seca de lodo ou digestato;
- toneladas de cinza alimentada;
- teor de P ou P_2O_5 ;
- custo de coleta, transporte, espessamento, desaguamento ou incineração; e
- percentual da infraestrutura de tratamento já existente aproveitado pelo projeto.

Tabela 38. Benchmarking para Economia Circular B: Recuperação e produção de fósforo secundário

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Rock Creek, EUA	Recuperação de fósforo e nitrogênio de água residual por cristalização; produção de fertilizante Crystal Green	1,09 ktpa	Não disponível	US\$ 4,475 M	US\$ 4.111/tpa de produto

Benchmark	Tipo	Capacidade	OPEX	CAPEX	Intensidade
Stickney, EUA	Recuperação integrada de fósforo e nitrogênio de água residual por cristalização	Capacidade instalada de até 10.000 tons/ano, equivalentes a aproximadamente 9,07 ktpa métricas se consideradas toneladas curtas	Não disponível	US\$ 30 M de investimento estimado no anúncio do projeto	US\$ 3.307/tpa de produto
TetraPhos, Hamburgo, Alemanha	Lixiviação de cinza de lodo e produção de ácido fosfórico técnico	20 ktpa de cinza alimentada; 7 ktpa de ácido com 57% H_3PO_4 , equivalentes a aproximadamente 2,89 ktpa de P_2O_5	Não disponível	Não disponível	n/a
Ash2Phos, Schkopau, Alemanha	Lixiviação e recuperação de fósforo, ferro, alumínio e fração mineral de cinza de lodo	30 ktpa de cinza; recuperação superior a 90% do fósforo; operação prevista para 2027	Não disponível	Não disponível	n/a

Fonte: ⁵⁶

- Rock Creek: o valor de US\$ 4,475 milhões corresponde à unidade de recuperação de nutrientes, não à estação completa de tratamento de água residual. A instalação também gera economias de operação e manutenção e receita pela venda do fertilizante, mas esses benefícios não deverão ser apresentados como OPEX negativo. O projeto tem apoio tributário, separado do CAPEX bruto.
- Stickney: a capacidade instalada divulgada é de até 10.000 tons/ano de Crystal Green. O investimento de US\$ 30 milhões era uma estimativa de implantação. A fonte também menciona economias operacionais e receita do produto, mas não divulga um OPEX isolado por tonelada.
- TetraPhos: as 7 ktpa referem-se à massa física de ácido a 57% H_3PO_4 . Essa capacidade não deverá ser comparada diretamente com uma planta expressa em base 100% P_2O_5 . A conversão resulta em aproximadamente 2,89 ktpa de P_2O_5 equivalente.
- Ash2Phos: a capacidade de 30 ktpa refere-se à alimentação de cinza, e não à massa do fertilizante recuperado. O processo também recupera produtos de ferro e alumínio e areia, exigindo metodologia de alocação de CAPEX, OPEX e créditos.

56 Disponíveis em:

<https://www.prnewswire.com/news-releases/clean-water-services-and-ostara-nutrient-recovery-technologies-open-worlds-largest-municipal-nutrient-recovery-facility-150593155.html>
<https://ostara.com/new-technology-will-turn-water-pollution-into-fertilizer/>
<https://www.phosphorusplatform.eu/activities/p-recovery-technology-inventory?catid=93%3A nutrient-recovery-technology-catalogue&id=2286%3Atetraphos-remondis&view=article>
<https://www.phosphorusplatform.eu/activities/p-recovery-technology-inventory?catid=93%3A nutrient-recovery-technology-catalogue&id=2286%3Atetraphos-remondis&view=article>

✓ NOTA SOBRE ANÁLISE COMPARATIVA DO BENCHMARKING DE ECONOMIA CIRCULAR

Os *benchmarks* de *Rock Creek* e *Stickney* utilizam como denominador a massa de fertilizante recuperado. TetraPhos divulga simultaneamente alimentação de cinza e produção física de ácido. Ash2Phos por sua vez apresenta alimentação de cinza, mas não a capacidade anual absoluta do produto fosfatado.

A massa de estruvita incorpora magnésio, amônio, água de cristalização e fósforo. Consequentemente, uma tonelada de estruvita não equivale a uma tonelada de P ou P_2O_5 . Para futuras referências de Economia Circular, sempre que possível o OPEX deverá ser apresentado em três níveis:

- Custo de preparação da alimentação: coleta, bombeamento, transporte, concentração, espessamento, desaguamento, secagem ou incineração.
- Custo de conversão: reagentes, magnésio ou outros agentes precipitantes, energia, lixiviação, purificação, precipitação, concentração, mão de obra, manutenção e tratamento de resíduos.
- Custo caixa total: custos de preparação e conversão, deduzidos créditos de produtos recuperados, economias de reagentes, custos evitados de disposição e eventuais tarifas recebidas pelo tratamento da corrente.

Custos evitados, receitas de fertilizantes e incentivos públicos deverão ser mostrados separadamente; não deverão ser incorporados ao CAPEX ou apresentados como redução do OPEX técnico sem reconciliação.

Para o contexto brasileiro, a cadeia primária deve continuar priorizando depósitos de apatita, produção de concentrado por beneficiamento e flotação, ácido fosfórico por via úmida e fabricação de SSP, TSP, MAP, DAP e fertilizantes formulados.

As rotas de aplicação direta e acidulação parcial, ácido fosfórico purificado, fósforo elementar, fosfato de ferro e material ativo LFP deverão permanecer em curvas separadas, pois possuem produtos, processos, insumos e estruturas de capital distintos.

Irecê deverá utilizar o investimento atualizado de aproximadamente US\$ 103,4 milhões. Arraias deverá ser tratado como um único projeto integrado de DAPR, PAPR e SSP. Serra do Salitre deverá permanecer como referência de complexo integral e não de um estágio isolado.

Na *Paradeep Phosphates*, a expansão específica de ácido fosfórico e o programa integrado de aproximadamente US\$ 406 milhões não deverão ser somados sem reconciliação de escopo. O programa integrado aparece no *midstream* e no *downstream* apenas para representar sua abrangência industrial e não como dois investimentos independentes.

No ácido fosfórico purificado, a intensidade da Arianne deverá utilizar somente a capacidade de 350 ktpa de PPA em base 100% P_2O_5 . A massa do ácido secundário não deverá ser adicionada sem equalização de concentração.

No *downstream* de baterias, First Saguenay e ICL são referências de intensidade de plantas completas, e não do CAPEX atribuível apenas ao fósforo. Nano One deverá permanecer sem CAPEX e OPEX na tabela enquanto os valores continuarem confidenciais.

Na Economia Circular, a cristalização de estruvita a partir de águas residuais deverá permanecer separada da recuperação de fósforo a partir de cinzas. Rock Creek e Stickney utilizam capacidade de fertilizante; TetraPhos divulga alimentação de cinza e ácido produzido; e Ash2Phos divulga principalmente capacidade de alimentação. Essas bases não pertencem a uma única curva sem normalização para P ou P_2O_5 recuperado.

Para futuros projetos brasileiros de fósforo secundário, os indicadores mínimos deverão incluir origem da corrente, capacidade de alimentação, teor de matéria seca, concentração de P ou P_2O_5 , recuperação do fósforo, composição e pureza do produto, contaminantes e metais pesados, consumo de reagentes, água e energia, custo de preparação, custo de conversão, custos evitados, créditos de coprodutos, utilização efetiva da capacidade, capital de giro e fronteira exata do CAPEX.

2.2.5 Grafita

O Brasil destaca-se no mercado global de grafita natural por reunir elevado potencial geológico, reservas expressivas, produção ativa e grafita em flocos de alta qualidade. O país possui uma das maiores reservas mundiais, estimada em 199,3 Mt por dados nacionais, equivalente a cerca de 25,5% do total global, ocupando a 2ª posição mundial (MATOS, 2026).

Na produção, o Brasil ocupa a 4ª posição mundial, respondendo por cerca de 4,3% da oferta global. Em 2025, produção nacional de minério bruto de grafita foi de aproximadamente 1,57 milhões de toneladas ROM, das quais cerca de 67,7 mil toneladas corresponderam ao produto beneficiado o país conta com cinco minas de grafita em operação (ANM 2025) (Tabela 9).

A produção concentra-se principalmente na Província Grafítica Bahia–Minas (Figura 18), com destaque para depósitos em Minas Gerais e na Bahia, como Salto da Divisa, Itapecerica, Mateus Leme, Pedra Azul, Maiquinique, Fazenda Boa Sorte e a Mina Santa Cruz, que iniciou operações em 2024 (Tabela 40). A qualidade da grafita brasileira, especialmente em flocos, é favorecida pelas condições metamórficas que controlam sua cristalinidade e granulometria, tornando-a estratégica para aplicações industriais e para a cadeia de baterias de íons de lítio.

Tabela 39. Produção de grafita no Brasil, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia da Grafita.

Reservas*	Minas em operação*	Produção (ROM; Mt)**	Produção beneficiada (Kt)**	Ranking mundial	
199,3 Mt	5	1,57	67,7	Reservas:	2º (25.5%)*
				Produção:	4º (4,3%)*

Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2025 – Anuário Mineral Brasileiro Interativo *** USGS (2026)

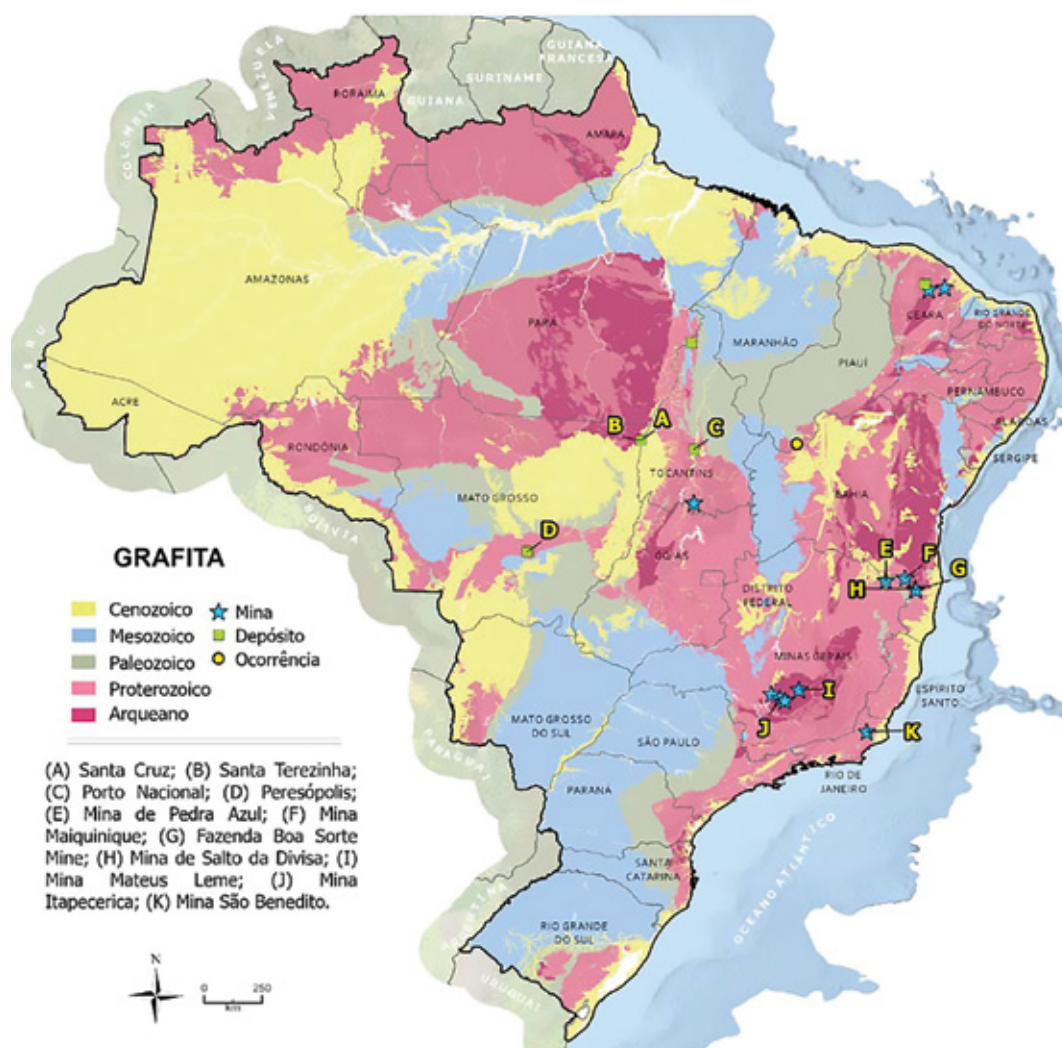
Tabela 40. Depósitos selecionados de grafita no Brasil e seus respectivos recursos estimados

Depósito	Empresas operadoras	Recursos e estimados (Mt)	Teor (% cg*)	Status
Mina Itapecerica	Nacional Grafite	209.59	9.79	Operando
Mina Mateus Leme	Grafita MG	91.67	14	Operando
Depósito Peresópolis	Lucra Minerals	40	12	Exploração inicial
Mina Maiquinique	Extrativa / Grafite do Brasil	33.3	9.6	Operando
Depósito Porto Nacional	Di Castro's Construtora	49.7	5.3	Exploração inicial
Mina Pedra Azul	Nacional Grafite	19.07	12.59	Operando
Mina São Benedito	São Benedito	2.09	57.43	Interrompido
Mina Fazenda Boa Sorte	Graphcoa	21.68	2.86	Operando
Mina Salto da Divisa	Nacional Grafite	232.6	0.25	Operando
Depósito Santa Terezinha	Mineração de Calcário Montevídiu	7.5	6.33	Exploração inicial
Santa Cruz	South Star Mining Group	14.9	2.29	Exploração

Nota *Grau de grafite de carbono

Fonte: Matos, 2026.

Figura 18. Localização dos principais depósitos e ocorrências de Grafita do Brasil



Fonte: Compilado de Matos, 2026).

O mercado global de grafita está crescendo de forma significativa em função da demanda por baterias para veículos elétricos, onde este mineral é insumo essencial para a constituição das células de anodo. Projeções de demanda revelam que esta poderá aumentar de 8 vezes até 2030 a 24 vezes até 2040. Além disso, até o momento não há substituto para o uso da grafita em baterias íon – lítio de veículos elétricos.

Neste contexto global, a cadeia produtiva da grafita no Brasil revela que, apesar do país possuir reservas significativas do mineral, sua produção ainda é limitada a poucas empresas, com foco majoritário no mercado interno industrial (Figura 19). Além disso, o desenvolvimento em toda a cadeia de valor ainda se encontra restrito à expansão de algumas plantas industriais. Por exemplo, em 2025, a Graphcoa iniciou a operação de sua primeira planta integrada em Itagimirim, Bahia, com capacidade prevista de 5.500 toneladas anuais, e com expansão planejada para mais duas unidades que somarão 60.000 toneladas anuais, totalizando 65.500 toneladas de concentrado de grafita.

A cadeia produtiva da grafita ainda revela que o maior desafio é o avanço tecnológico potencializar a produção de grafita com maior valor agregado, como por exemplo a grafita esférica e modificada superficialmente, assim como grafeno, que pode multiplicar em até 20 vezes o valor agregado do mineral. As iniciativas de grafeno no Brasil envolvem universidades e centros de pesquisa (e.g., UCSGraphene, MackGraphe), empresas (e.g., Gerdau Graphene) e o governo (e.g., EMBRAPII), atuando em conjunto para acelerar a inovação (Figura 19).

Figura 19. Panorama da atuação das empresas ao longo da cadeia de valor da grafita

Empresa / instituição	P&D	Upstream Concentrado em pó	Midstream Concentrado em flocos, SPG/CSPG, óxido	Downstream Grafeno, produtos finais	Recuperação Reciclagem
Grafite do Brasil					
Nacional de Grafite Ltda.					
Graphcoa					
Grafita MG					
South Star Mining Group					
Gerdau Graphene					
Hexo Graphene					
UCS Graphene (Univ. Caxias do Sul)					
MackGraphe (Univ. Presb. Mackenzie)					
MGráfico (Univ. Fed. MG)					
EMBRAPII					

 **Presença forte**
 **Presença relevante**
 **Ausência de atuação**

Cobertura por etapa: P&D: 8 UPSTREAM: 5 MIDSTREAM: 3 DOWNSTREAM: 6 RECUPERAÇÃO: 0

Figura 20. Etapas da cadeia primária e da economia circular da Grafita



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

No caso da grafita, a análise comparativa depende da fronteira de produto. No *upstream*, os custos são normalmente reportados em US\$/t de concentrado; no *midstream* e *downstream*, em US\$/t de PSG, CSPG ou AAM.

Os benchmarks da cadeia primária priorizam grafita natural em flocos. Plantas exclusivamente dedicadas à grafita sintética não foram consideradas. Projetos que combinam grafita natural e sintética deverão permanecer identificados como multiproduto e fora da curva principal de grafita natural. Em projetos de Economia Circular, a alimentação poderá conter grafita natural, sintética ou uma mistura das duas, dependendo da química e da origem das baterias.

Na Economia Circular, a capacidade de processamento de baterias, black mass ou resíduos de fabricação não equivale à capacidade de produção de grafita recuperada. A massa de

alimentação inclui materiais catódicos, cobre, alumínio, eletrólito, polímeros e outros componentes. Em plantas multimetálicas, o CAPEX integral não deverá ser atribuído à grafita. A intensidade de capital deverá utilizar a capacidade de alimentação da planta, salvo quando a fonte divulgar capacidade e investimento segregados para a linha de recuperação ou regeneração da grafita. A produção de black mass representa uma etapa intermediária. A circularidade da grafita somente estará concluída quando a fração anódica for separada, purificada, regenerada e qualificada para reutilização industrial.

Para cada referência, devem ser considerados teor de alimentação, recuperação, pureza, distribuição granulométrica, rendimento de esferonização, rota de purificação, créditos de finos/subprodutos e escopo de infraestrutura.

Siglas:

- Cg = carbono grafítico
- PFG = grafita em flocos purificada
- SPG/PSG = grafita esférica purificada não revestida
- CSPG = grafita esférica purificada e revestida
- AAM = material ativo de ânodo

Tabela 41. Benchmarking para *Upstream*

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Brasil: produção nacional de grafita beneficiada	Indicador setorial da produção brasileira (concentrada em Minas Gerais); não corresponde a um projeto individual	52,2 kt produzidas em 2024; teor médio de 98,8% C	Não disponível	n/a	n/a
Santa Cruz, operação 2026, Brasil	Ramp-up com comissionamento concluído em maio de 2026	Meta inicial de 5 ktpa; produção comercial estável de concentrado com 95% C	Não disponível	n/a	n/a
Santa Cruz, PFS 2020, Brasil	Estudo de pré-viabilidade	5 ktpa na Fase 1 e 25 ktpa após a Fase 2	US\$ 396/t de concentrado	US\$ 7,3 M na Fase 1 + US\$ 27,2 M na Fase 2	US\$ 1.460/tpa na Fase 1; US\$ 1.380/tpa considerando as duas fases

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Molo, Madagascar	Expansão greenfield de nova planta adjacente à atual	Capacidade atual 17 ktpa; Expansão para 133 ktpa	US\$ 392,59/t EXW; US\$ 638,53/t FOB; AISC US\$ 714,33/t	US\$ 161,7M	US\$ 1.216/tpa
Siviour, Austrália	Greenfield integrado; mina + beneficiamento	75 ktpa Fase 1; 150 ktpa total	US\$ 405/t anos 1-10; US\$ 472/t LOM	US\$ 145,9 M F1 + US\$ 117,8 M F2	US\$ 1.945/tpa F1; US\$ 1.758/tpa total
Matawinie, Canadá	FS atualizado em 2025	105,9 ktpa; 97,5% C; vida útil de 25 anos	US\$ 419/t de concentrado	US\$ 415 M	US\$ 3.919/tpa

Fonte:⁵⁷

- A produção de 52,2 kt e o teor médio de 98,8% C correspondem ao total brasileiro de grafita beneficiada em 2024 e não podem ser atribuídos integralmente à Nacional de Grafite. A participação de 99,2% informada pela ANM refere-se à arrecadação da CFEM de grafite e não à participação física na produção nacional.
- Santa Cruz/South Sta (2026): PFS para dados de escala, CAPEX e OPEX; atualização operacional de junho de 2026 para ramp-up, meta de 5 ktpa e concentrado de até 97% C.
- Molo/NextSource (2023): FS expansão para 150 ktpa de concentrado, 2023.
- Siviour/Renascor (2023): Battery Anode Material Study, 2023, com métricas segregadas para mina/beneficiamento e PSG.
- Matawinie/Nouveau Monde Graphite (2025): Updated FS para mina e planta de material de bateria.

Santa Cruz combina métricas econômicas do PFS de 2020 com o status operacional de 2026; os valores não representam custos realizados da planta em ramp-up. As intensidades foram calculadas como CAPEX dividido pela capacidade nominal e não incluem, salvo indicação da fonte, capital de giro ou sustaining CAPEX.

57 Disponíveis em:

<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2025/sumario-2025.pdf>
<https://minedocs.com/20/Santa-Cruz-CP-042020.pdf>
https://southstarbatterymetals.com/wp-content/uploads/2026/06/06_STS-Operational-Highlights-Jun-2026_vF20260609.pdf
<https://www.nextsourcematerials.com/nextsource-materials-announces-robust-feasibility-study-results-for-molo-mine-expansion-to-150000-tonnes-per-annum-of-superflake-graphite-concentrate/>
<https://renascor.com.au/wp-content/uploads/2023/08/20230808-Siviour-Battery-Anode-Material-Study-Results-2588185.pdf>
https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1649752/000110465925076066/tm2522341d1_ex99-1.htm

Tabela 42. Benchmarking para *Midstream* (Esferonização e Purificação)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Siviour PSG, Austrália	Micronização, esferonização e purificação integradas	50 ktpa Fase 1; 100 ktpa total	US\$ 1.782/t anos 1-10; US\$ 1.846/t LOM; após créditos: US\$ 1.474/t e US\$ 1.452/t	US\$ 268Mi F1 + US\$ 256M F2	US\$ 5.366/tpa F1; US\$ 5.248/tpa total
EcoGraf HFFree, EUA	Purificação química; instalação planejada	25 ktpa; SpG 97,5% C para PSG >99,95% C	US\$ 478/t de purificação	US\$ 95 M	US\$ 3.800/tpa
NextSource BAF Fase 1, EAU	Fase inicial da unidade de material de ânodo nos EAU; FID em maio de 2026	14 ktpa: 10 ktpa PFG + 4 ktpa SPG	Não divulgado isoladamente	US\$ 150,2 M	US\$ 10.729/tpa de produto misto

Fonte: ⁵⁸

- Siviour/Renascor (2023): Battery Anode Material Study; capacidade, CAPEX e custos brutos e líquidos de créditos para PSG.
- EcoGraf (2025): Annual Report; instalação planejada de 25 ktpa, CAPEX de US\$ 95 mi e custo de purificação de US\$ 478/t.
- NextSource UAE BAF (2026): estudo técnico-econômico de 2025 e FID da Fase 1 em maio de 2026.

EcoGraf tem fronteira de purificação-only; Siviour inclui micronização, esferonização e purificação; e a Fase 1 da NextSource produz um mix de PFG e SPG. Portanto, as intensidades não são diretamente comparáveis pois é necessário equalizar rendimento, pureza de alimentação, infraestrutura e limite de bateria.

58 Disponíveis em:

<https://renascor.com.au/wp-content/uploads/2023/08/20230808-Siviour-Battery-Anode-Material-Study-Results-2588185.pdf>
<https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20250923/pdf/06pkwcd4sg5p6b.pdf>
<https://www.newswire.com/news/nextsource-materials-announces-positive-results-of-technical-economic-study-for>
<https://www.nextsourcematerials.com/nextsource-materials-announces-final-investment-decision-for-uae-battery-anode-facility/>

Tabela 43.Benchmarking para *Downstream* (CSPG/AAM)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Vidalia, instalação inicial, EUA	Planta comercial de material ativo de ânodo de grafita natural; produção iniciada em 2024	11,25 ktpa de AAM	US\$ 4.300 a 4.800/t AAM	US\$ 317 M	US\$ 28.178/tpa AAM
Vidalia, Expansão, EUA	Expansão da instalação inicial	Capacidade total de 45 ktpa AAM; +33,75 ktpa de capacidade adicionada; 74,6 ktpa de grafita natural processada	US\$ 3.023/t AAM	US\$ 539 M	US\$ 15.970/tpa de capacidade adicionada; US\$ 11.978/tpa sobre a capacidade total
Bécancour, implantação inicial, Canadá	Primeira implantação comercial	13 ktpa de AAM	Não disponível	Não disponível	n/a
Bécancour, Configuração integrada, Canadá	Shaping, purificação, revestimento e acabamento	44,1 ktpa de AAM e 43,3 ktpa de finos	US\$ 2.810/t AAM	US\$ 911 M	US\$ 20.658/tpa AAM
NextSource BAF, EAU	Estudo 2025; mix PFG/SPG/CSPG; FID apenas Fase 1	30 ktpa total: 10 ktpa PFG, 16 ktpa SPG, e 4 ktpa CSPG	Não divulgado	US\$ 284,1 M de CAPEX + US\$ 6,8 M de capital de giro; total de US\$ 290,9 M	US\$ 9.470/tpa sobre o CAPEX; US\$ 9.697/tpa incluindo o capital de giro
Mauritius BAF1, Maurício	Estudo técnico de 2023 (o projeto ainda não foi implantado)	3,6 ktpa CSPG + 4,0 ktpa de finos	US\$ 5.535/t CSPG; sem crédito de finos	US\$ 23,5 M + US\$ 4,9 M de capital de giro	US\$ 6.528/tpa CSPG (CAPEX)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Graphite One STP, EUA	FS 2025; planta multiproduto natural e sintética	256,5 ktpa total; cerca de 169 ktpa AAM	US\$ 2.119/t na planta; US\$ 2.804/t total com feed e transporte	US\$ 3,92 B	US\$ 15.283/tpa sobre a produção total; US\$ 23.195/tpa sobre a produção de AAM

Fonte⁵⁹:

- Sidalia/Syrah Resources (2024): DFS da expansão para 45 ktpa de AAM.
- Bécancour/Nouveau Monde Graphite (2025): Updated FS; shaping, purificação, coating, CAPEX e OPEX.
- NextSource UAE BAF (2026): estudo técnico-econômico para 30 ktpa de produtos e FID da Fase 1.
- NextSource Mauritius BAF1 (2023): estudo técnico para linha de 3,6 ktpa CSPG (projeto não implantado).
- Graphite One (2025): Bankable FFS para mina de Graphite Creek e Secondary Treatment Plant em Ohio.

NextSource UAE e Graphite One são unidades multiproduto; a intensidade por tonelada total não equivale à de uma planta dedicada a CSPG. Graphite One inclui produtos de grafita natural e sintética. A configuração Mauritius BAF1 é uma referência técnica de projeto não implantado. Vidalia e Bécancour são as referências mais relevantes para plantas completas de AAM natural.

A Economia Circular da grafita deverá separar o pré-processamento de baterias da recuperação e regeneração da fração anódica.

O fluxo industrial de referência é: resíduos de fabricação e baterias em fim de vida; descarga segura; desmontagem; trituração e peneiramento; separação de cobre, alumínio, aço, plásticos e eletrólito; black mass ou fração rica em ânodo; separação da grafita; lixiviação, lavagem e

59 Disponíveis em:

<https://company-announcements.afr.com/asx/syr/2911ad3a-e487-11ed-9428-f6ba9bacc4fd.pdf>
<https://www.phosphorusplatform.eu/activities/p-recovery-technology-inventory?catid=93%3A nutrient-recovery-technology-catalogue&id=2286%3A tetraphos-re>
https://www.syrahresources.com.au/our-business/vidalia-active-anode-material-facility?utm_source=chatgpt.com&view=article
https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1649752/000110465925076066/tm2522341d1_ex99-1.htm
<https://nmg.com/acquisition-of-brownfield-site-in-becancour/>
<https://www.newswire.com/news/nextsource-materials-announces-positive-results-of-technical-economic-study-for>
<https://www.nextsourcematerials.com/nextsource-materials-announces-final-investment-decision-for-uae-battery-anode-facility/>
https://www.nextsourcematerials.com/nextsource-materials-announces-positive-results-of-technical-economic-study-for-proposed-battery-anode-facility-in-the-uae-and-secures-industrial-site-with-building-in-abu-dhabi/?utm_source=chatgpt.com
<https://www.nextsourcematerials.com/nextsource-materials-announces-global-anode-expansion-strategy-and-economic-results-of-first-battery-anode-facility/>
<https://www.graphiteoneinc.com/graphite-one-advances-its-united-states-graphite-supply-chain-solution-with-completion-of-a-bankable-feasibility-study/>

purificação; tratamento térmico e regeneração da estrutura; classificação granulométrica; revestimento e acabamento; grafita recuperada ou AAM reciclado.

A produção de black mass deverá ser classificada no estágio 4a. A separação, purificação, regeneração e qualificação da grafita deverão ser classificadas no estágio 4b.

Tabela 44. Benchmarking para Economia Circular A: Mineração Urbana e pré-processamento

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Ascend Elements Base 1, EUA	Planta comercial para pré-processamento de baterias descartadas e resíduos de fabricação	30 ktpa de baterias e resíduos alimentados	Não disponível	US\$ 43 M	US\$ 1.433/tpa de alimentação
BASF Schwarzheide, Alemanha	Planta comercial de produção de black mass a partir de baterias e resíduos de fabricação	15 ktpa de baterias e resíduos alimentados	Não disponível	Não disponível	n/a
cylib Wernberg-Köblitz, Alemanha	Descarga, desmontagem e processamento mecânico de baterias de veículos elétricos	Até 10 ktpa de baterias alimentadas	Não disponível	Não disponível	n/a

Fonte:

- Os três benchmarks utilizam como denominador a massa total de baterias e resíduos recebidos. Essa massa não representa a capacidade de produção de grafita recuperada.
- O CAPEX da Ascend Elements Base 1 corresponde a uma instalação de reciclagem de baterias e não a uma unidade exclusiva de grafita. Sua intensidade deverá permanecer expressa por tonelada de alimentação, sem atribuição integral do investimento à fração anódica.
- A unidade da BASF em Schwarzheide iniciou a operação comercial em 2025 e produz black mass para processamento metalúrgico posterior. O projeto deverá permanecer na etapa 4a, pois a divulgação não apresenta capacidade segregada de grafita recuperada.
- A unidade de Wernberg-Köblitz foi incorporada à plataforma da cylib em julho de 2026 e amplia a capacidade de descarga, desmontagem e processamento mecânico.⁶⁰

⁶⁰ Disponíveis em:
<https://georgia.org/press-releases/2022/battery-resourcers-open-north-americas-largest-lithium-ion-battery-recycling>
<https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2025/06/p-25-112>
<https://www.cylib.de/newsroom>

Tabela 45. Benchmarking para Economia Circular B: Recuperação, regeneração e reutilização da grafita

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
cylib Dormagen, Alemanha	Planta integrada de reciclagem de hidrometalúrgica, incluindo recuperação de concentrado de grafita	30 ktpa de baterias em fim de vida e resíduos de fabricação	Não disponível	Não disponível	n/a
Mercedes-Benz Kuppenheim, Alemanha	Planta integrada de reciclagem mecânica e hidrometalúrgica até materiais com qualidade para baterias	2,5 ktpa de baterias alimentadas; recuperação total superior a 96%	Não disponível	Não disponível	n/a
EcoGraf Anode Recycling	Recuperação e purificação de resíduos de fabricação de material de ânodo	Capacidade comercial não divulgada; produto de grafita recuperada com 99,95% C	Não disponível	Não disponível	n/a

Fonte: ⁶¹

- A planta da cylib em Dormagen integra pré-processamento e recuperação hidrometalúrgica de diversos materiais. A companhia também passou a fornecer concentrado de grafita reciclada para testes de qualificação em material de ânodo. O CAPEX e o OPEX da linha de grafita não foram divulgados separadamente.
- Kuppenheim é uma planta multimetálica e não divulga capacidade individual de grafita. O índice superior a 96% corresponde à recuperação global dos materiais da bateria e não deve ser utilizado como recuperação específica da grafita.
- A EcoGraf demonstrou recuperação de grafita de resíduos de fabricação de ânodos com pureza de 99,95% C e propriedades compatíveis com material novo. Como não foram divulgados capacidade comercial, CAPEX ou OPEX da rota de reciclagem, o projeto deverá permanecer como referência tecnológica.

Não foram identificados OPEX públicos suficientemente segregados para as linhas de recuperação e regeneração de grafita dos projetos selecionados. Para futuros projetos, os custos deverão ser separados em:

- Custo de pré-processamento: descarga, desmontagem, trituração, peneiramento, separação física, remoção de eletrólito e produção da black mass ou da fração rica em ânodo.

61 Disponíveis em:

<https://www.cylib.de/post/made-in-germany-battery-recycler-cylib-to-scale-strategic-critical-raw-material-production-for-europe>

<https://group.mercedes-benz.com/dokumente/nachhaltigkeit/produktion/mercedes-benz-raw-material-report.pdf>

<https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20250923/pdf/06pkwcd4sg5p6b.pdf>

- Custo de recuperação da grafita: separação da fração anódica, lixiviação, lavagem, remoção de metais e compostos residuais, tratamento de efluentes e secagem.
- Custo de regeneração: tratamento térmico, restauração da estrutura cristalina, classificação granulométrica, esferonização complementar, revestimento, carbonização e acabamento.
- Custo caixa total: custo da alimentação entregue mais pré-processamento, recuperação e regeneração, deduzidos os créditos de lítio, níquel, cobalto, manganês, cobre, alumínio e outros materiais recuperados.

O balanço de massa deverá informar separadamente a grafita contida na alimentação, a fração recuperada após o processamento físico, a massa purificada e o produto efetivamente qualificado como AAM reciclado.

A produção de 52,2 kt de grafita beneficiada em 2024 corresponde ao total brasileiro e não deve ser atribuída integralmente à Nacional de Grafite. Essa informação deverá permanecer como referência setorial, sem CAPEX ou OPEX. Santa Cruz deverá ser apresentada em duas bases: a operação de 2026, em ramp-up para 5 ktpa, e o PFS histórico de 2020. Os custos e investimentos do estudo não deverão ser tratados como resultados realizados da operação atual.

No *upstream* internacional, Molo deverá ser classificado como expansão brownfield. Sua intensidade de capital deverá utilizar os 133 ktpa de capacidade adicionada, e não os 150 ktpa de capacidade total. Siviour e Matawinie permanecem como referências greenfield de maior escala, com diferenças relevantes de localização, infraestrutura e estágio de desenvolvimento.

No *midstream* e *downstream*, a fronteira industrial altera materialmente a comparação. EcoGraf contempla purificação; Siviour inclui micronização, esferonização e purificação; Vidalia e Bécancour avançam até AAM revestido. NextSource UAE produz um mix de PFG, SPG e CSPG, enquanto Graphite One combina grafita natural e sintética. Vidalia e Bécancour deverão separar as implantações iniciais das configurações integrais de expansão. As capacidades e os investimentos das etapas sucessivas do mesmo ativo não deverão ser tratados como projetos independentes.

Na Economia Circular, a capacidade de pré-processamento de baterias deverá permanecer separada da capacidade de produção de grafita recuperada. Ascend Elements Base 1, BASF Schwarzheide e cylib Wernberg-Köblitz são referências de alimentação e preparação. cylib Dormagen, Mercedes-Benz Kuppenheim e EcoGraf são referências para a recuperação ou regeneração da fração anódica, embora ainda não apresentem CAPEX e OPEX segregados para a grafita. Para futuros projetos brasileiros, os indicadores mínimos deverão incluir origem e química das baterias, participação de grafita natural e sintética, massa de alimentação, teor de grafita, recuperação mássica, pureza, morfologia, distribuição granulométrica, área superficial, capacidade reversível, eficiência de primeira carga, vida em ciclos, consumo de reagentes e energia, geração de efluentes, créditos de coprodutos, utilização efetiva da capacidade, capital de giro e fronteira exata do CAPEX.

2.2.6 Lítio

O Brasil consolidou-se como um dos principais atores emergentes no mercado global de lítio, impulsionado pela expansão de projetos voltados à transição energética e à cadeia de baterias. Segundo Cabral Neto (2026) e USGS (2026), o país ocupa a 8ª posição mundial em reservas, com cerca de 642,5 kt de Li_2O contido, equivalentes a aproximadamente 1,3% das reservas globais. Em termos de produção, o Brasil figura como o 6º maior produtor mundial, respondendo por cerca de 4,2% da oferta global (Tabela 46).

Em 2025, a produção nacional de minério bruto foi de 2 milhões de toneladas ROM, com produção beneficiada totalizando aproximadamente 52,2 kt de Li_2O contido, com teor médio de 8.15%, proveniente de três minas em operação industrial (ANM, 2025).

O potencial brasileiro concentra-se principalmente em Minas Gerais, nas províncias pegmatíticas Oriental do Brasil e de São João Del Rei, além de ocorrências conhecidas no Rio Grande do Norte Ceará e Paraíba (Figura 21). Entre as operações em atividade destacam-se Xuxa, da Sigma Lithium, em Araçuaí/Itinga; Volta Grande, da AMG Brasil, em Nazareno; e Mina da Cachoeira, da CBL, em Itinga (Tabela 47). Em estágio de viabilidade ou implantação, destacam-se os projetos Colina, Nezinho do Chicão, Barreiro, Bandeira e Neves (CABRAL NETO, 2026).

Do ponto de vista geológico, o lítio brasileiro ocorre predominantemente em pegmatitos do tipo LCT, tendo o espodumênio como principal mineral de minério. O beneficiamento atual é voltado à produção de concentrado de espodumênio de alta pureza.

Tabela 46. Produção de lítio no Brasil, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia do lítio.

Reservas*	Minas em operação*	Produção (ROM; Mt)**	Produção beneficiada (Kt)**	Ranking mundial	
642,5 kt	3	2,0	52,2	Reservas:	8º (1,3%)*
				Produção:	6º (4,2%)*

Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2025 – Anuário Mineral Brasileiro Interativo *** USGS (2026)

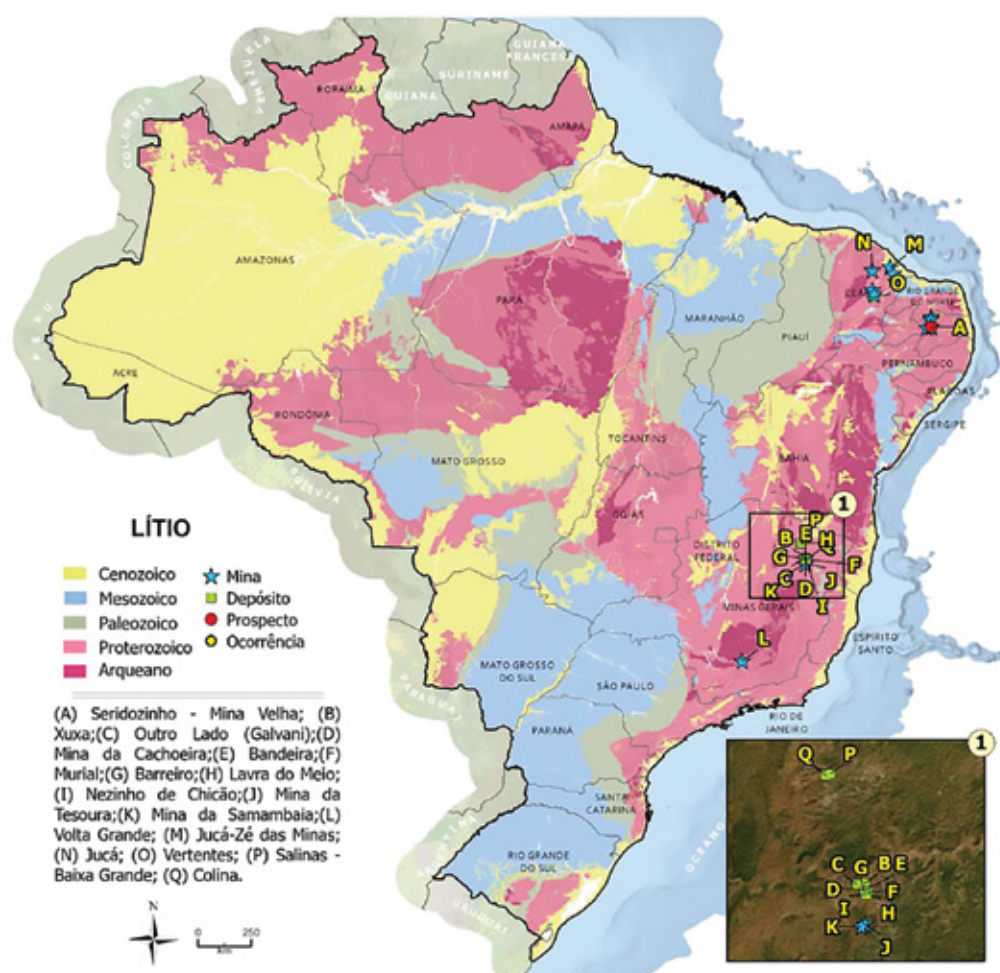
Tabela 47. Principais depósitos e ocorrências selecionados de lítio no Brasil e seus respectivos recursos estimados.

DEPÓSITO	EMPRESAS OPERADORAS	RECURSOS ESTIMADOS (Mt)	TEOR (% Li_2O)	STATUS
Nezinho do Chicão ⁴	Sigma Lithium	38.3	1.41	Viabilidade
Bandeira ³	Lithium Ionic	27.27	1.34	Viabilidade

DEPÓSITO	EMPRESAS OPERADORAS	RECURSOS ESTIMADOS (Mt)	TEOR (%Li ₂ O)	STATUS
Barreiro ⁴	Sigma Lithium	25.6	1.36	Viabilidade
Xuxa ⁴	Sigma Lithium	14.7	1.55	Produção
Volta Grande ⁸	AMG	20.29	1.06	Produção
Muriá ⁴	Sigma Lithium	14.6	1.28	Inexplorado
Salinas – Baixa Grande ⁷	Lithium Ionic	6.52	1.11	Inexplorado
Mina da Cachoeira ⁶	CBL	4.5	1.4	Produção
Lavra do Meio ⁴	Sigma Lithium	4.2	1.17	Inexplorado
Itinga – Outro Lado ⁵	Lithium Ionic	2.97	1.46	Inexplorado

Fonte: Cabral Neto, 2026

Figura 21. Localização dos principais depósitos e ocorrências de lítio do Brasil

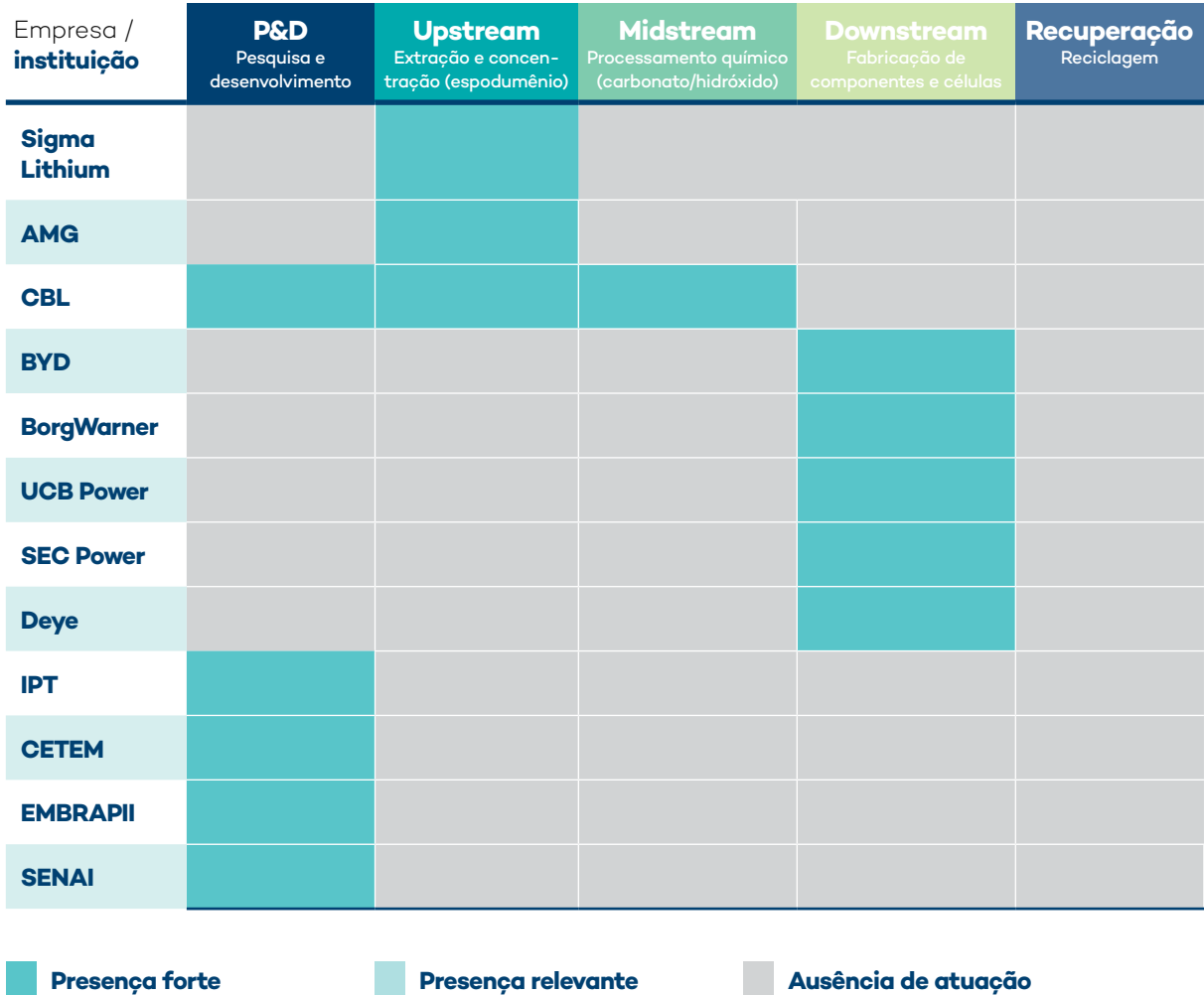


Fonte: Compilado de Cabral Neto, 2026.

O mercado global de baterias de íons-lítio é um dos mais estratégicos da atualidade, impulsionado pela transição energética, pela eletrificação da frota automotiva e pela demanda crescente por sistemas de armazenamento de energia.

A verticalização da cadeia de valor do lítio no Brasil ainda carece de expansão da capacidade de refino químico (Figura 22). A CBL é a única que avança na cadeia de valor produzindo carbonato de lítio grau técnico (98.5% de pureza), carbonato de lítio grau bateria (99.5% de pureza), carbonato de lítio grau farmacêutico (99.5% de pureza), e hidróxido de lítio (99.99% pureza), a partir da transferência da produção de concentrado de lítio para a sua fábrica de Divisa Alegre (MG) (Sumário Mineral ANM 2025). Outro fator que influencia este avanço ainda restrito na cadeia produtiva é a quase inexistência de ações colaborativas entre os setores público e privado em projetos de P&D&I.

Figura 22. Panorama da da cadeia de valor de lítio no Brasil: empresas e instituições P&D



Cobertura por etapa: P&D: 5 UPSTREAM: 3 MIDSTREAM: 1 DOWNSTREAM: 5 RECUPERAÇÃO: 0

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

A produção de baterias de íons de lítio (LFP) para carros elétricos no Brasil ainda caminha lentamente, com algumas empresas como BorgWarner e BYD realizando a montagem com peças importadas.

A ausência de uma cadeia produtiva nacional limita a competitividade da indústria automotiva e de energia renovável, além de aumentar a dependência externa em um segmento considerado crítico para a segurança energética e industrial.

O panorama da cadeia de valor do lítio no Brasil revela uma concentração de atividades no *upstream*, com avanços pontuais no *midstream*. A Figura a seguir apresenta a distribuição das empresas atuantes ao longo dos elos da cadeia produtiva do lítio, evidenciando as lacunas de verticalização e as oportunidades de adensamento tecnológico.

Figura 23. Etapas da cadeia primária e da economia circular do Lítio



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

No caso do lítio, a comparação depende da matéria-prima e da fronteira de processo. Projetos de rocha dura normalmente reportam custos em US\$/t de concentrado de espodumênio, enquanto projetos de salmoura, DLE e depósitos sedimentares tendem a reportar custos em US\$/t de carbonato de lítio ou LCE. Conversores químicos reportam custos por tonelada de hidróxido ou carbonato grau bateria, e unidades *downstream* utilizam toneladas de CAM. Para os projetos de salmoura e depósitos sedimentares, o *benchmark* foi mantido integrado até carbonato de lítio porque as referências normalmente não separam economicamente a etapa de extração da etapa de purificação e conversão. Esses projetos, portanto, não devem ser comparados diretamente com uma operação de rocha dura que vende concentrado de espodumênio. A análise *downstream* é limitada ao material ativo de cátodo que incorpora lítio.

Siglas:

- **SC5/SC6:** concentrado de espodumênio com 5% ou 6% de Li_2O ;
- **SC5,2:** concentrado de espodumênio com 5,2% de Li_2O
- **SpodCon:** Concentrado de espodumênio
- **LCE:** equivalente de carbonato de lítio;
- **DMS:** separação em meio denso;
- **DLE:** extração direta de lítio;
- **LHM:** hidróxido de lítio monohidratado;
- **CAM:** material ativo de cátodo;
- **NCM/NMC:** óxido de lítio, níquel, cobalto e manganês;
- **NCA:** óxido de lítio, níquel, cobalto e alumínio;
- **NCMA:** óxido de lítio, níquel, cobalto, manganês e alumínio;
- **LFP:** fosfato de ferro-lítio.

As intensidades apresentadas abaixo foram calculadas como CAPEX inicial dividido pela capacidade nominal anual.

Na Economia Circular, a capacidade de processamento de baterias, resíduos de fabricação ou black mass não equivale à capacidade de produção de carbonato ou hidróxido de lítio recuperado. A alimentação inclui materiais catódicos, grafita, cobre, alumínio, aço, eletrólito, polímeros e outros componentes.

Em instalações multimetálicas, o CAPEX integral não deverá ser atribuído ao lítio. A intensidade deverá ser calculada pela capacidade de alimentação da planta e, quando disponível, também pela capacidade do composto de lítio recuperado.

A produção de *black mass* constitui uma etapa intermediária. A recuperação do lítio somente estará concluída quando o material for lixiviado, separado das demais substâncias, purificado e convertido em composto comercial ou reutilizado diretamente em material ativo.

Projetos integrados de salmouras, DLE e depósitos sedimentares deverão permanecer separados dos projetos de rocha dura que terminam em concentrado de espodumênio. Da mesma forma, purificação de hidróxido técnico, conversão integral de concentrado e operações integradas entre mina e refinaria possuem fronteiras industriais distintas.

Tabela 48. Benchmarking para Upstream A: Rocha dura e concentrado de espodumênio

Bench- mark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Inten- sidade
Sigma Lithium, Brasil	Operação DMS e expansão brownfield	Capacidade instalada: 270 ktpa de concentrado com 5% Li ₂ O; Fase 2: capacidade total de 520 ktpa; Fase 3: capacidade total de 770 ktpa	Fase 1: US\$ 624/t CIF China e AISC de US\$ 710/t; Fases 1 e 2 combinadas: US\$ 571/t CIF China e AISC de US\$ 620/t	Fase 1 realizada: US\$ 131,9 M; Fase 2: US\$ 107,4 M; CAPEX da Fase 3 não divulgado em base segregada	Fase 1: US\$ 489/tpa; Fase 2 incremental: US\$ 429/ tpa; Fase 3: n/a
CBL, Mina Cachoeira, Brasil	Lavra subterrânea de espodumênio em pegmatito	45 ktpa de concentrado com 5,4% Li ₂ O	Não divulgado	Não divulgado	n/a
AMG Mibra, Brasil	Operação integrada com coprodutos de tântalo e feldspato; expansão/ ramp-up	Capacidade de referência de 130 ktpa de concentrado de espodumênio	Q1 2026: custo médio realizado de produção de US\$ 417/ dmt CIF China, ainda influenciado pelo ramp-up da expansão	Não divulgado de forma segregada	n/a

Bench- mark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Inten- sidade
Bandeira, Brasil	Greenfield subterrâneo; estudo de viabilidade atualizado em 2025	Produção média de 177 ktpa de SC5,2; vida útil de 18,5 anos	US\$ 378/t de SC 5,2 no site	US\$ 191 mi, incluindo contingência	US\$ 1.079/tpa
Colina, Brasil	Greenfield a céu aberto; PEA 2023.	405 ktpa de SC5,5 e 123 ktpa de SC3; 499 ktpa em base SC5,2 equivalente, conforme o PEA	AISC de US\$ 536/t do mix de produtos entregue CIF China, conforme o PEA	US\$ 253 M na Fase 1 + US\$ 55 M na Fase 2; total de US\$ 308 M antes dos custos de fechamento	US\$ 617/tpa de SC5,2 equivalente, conforme o PEA

Fonte⁶²:

- A Sigma Lithium é uma referência operacional brasileira de grande escala. Entretanto, os custos de US\$ 624/t e US\$ 710/t possuem fronteira CIF China, incluindo logística internacional. O AISC projetado possui exclusões específicas informadas pela companhia. Os custos combinados das Fases 1 e 2 são projeções para a configuração expandida e não custos realizados da operação atual. O guidance de produção deverá ser mantido separado da capacidade nominal instalada.
- A CBL é referência operacional brasileira para extração de espodumênio por lavra subterrânea, mas não há divulgação pública de CAPEX e OPEX.
- A AMG Mibra divulga um custo trimestral realizado de produção relacionado à entrega CIF China. A operação possui integração e coprodutos de tântalo e feldspato, que podem alterar a alocação econômica de custos.
- O Projeto Bandeira apresenta custo de US\$ 378/t no site, sem a mesma extensão de transporte e frete internacional das referências CIF China. A intensidade de aproximadamente US\$ 1.079/tpa foi calculada dividindo-se o CAPEX de US\$ 191 milhões pela produção média de 177 ktpa.
- Os números do Projeto Colina são uma referência conceitual derivada do PEA preparado antes da aquisição pela Pilbara Minerals. O total de US\$ 308 milhões corresponde às duas fases apresentadas no estudo. A Pilbara Minerals está preparando uma nova base técnica e econômica para o projeto, com conclusão dos estudos prevista para o trimestre encerrado em dezembro de 2027.

62 Disponíveis em:

<https://sigmalithiumcorp.com/sigma-lithium-announces-record-results-for-1q26-3q-ebitda-margin-26-profitability-21-of-total-debt-repaid/>

<https://www.cblitio.com.br/nossas-operacoes>

<https://amg-nv.com/wp-content/uploads/Investor-Presentation-May-2026.pdf>

https://pt.lithiumionic.com/news/lithium-ionic-announces-definitive-feasibility-study-results-for-bandeira-lithium-project-minas-gerais-brazil?utm_source=chatgpt.com

https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20230928/pdf/05vdbxgz4y0nn.pdf?utm_source=chatgpt.com

Tabela 49. Benchmarking para Upstream B: Salmouras, DLE e depósitos sedimentares

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Cauchari-Olaroz, Argentina	Operação integrada de salmoura, evaporação e produção de carbonato de lítio; em estabilização operacional	Capacidade nominal: 40 ktpa de carbonato de lítio grau bateria	US\$ 5.391/t de carbonato de lítio	US\$ 979M	US\$ 24,5 mil/tpa
Centenario-Ratones, Argentina	DLE com purificação integrada; operação em ramp-up	Capacidade nominal de 24 ktpa;	US\$ 4.500 a US\$ 5.000/t LCE em plena capacidade	US\$ 950 M	US\$ 39,6 mil/tpa
Rio Tinto Rincon, Argentina	DLE; projeto em construção e desenvolvimento	Capacidade nominal de 60 ktpa de carbonato de lítio grau bateria	Não divulgado	US\$ 2,50B	US\$ 41,7 mil/tpa
Thacker Pass, Fase 1, EUA	Depósito sedimentar/argiloso; lavra a céu aberto e lixiviação ácida	Fase 1: 40 ktpa de carbonato de lítio grau bateria Fases 2 a 4: ampliação para 160 ktpa	US\$ 6.238/t para o cenário de 160 ktpa	Fase 1: US\$ 2,93 B; Fase 2: US\$ 2,328 B; Fase 3: US\$ 2,754 B; Fases 4 e 5: US\$ 4,315 B	Fase 1: US\$ 73,3 mil/tpa; Fase 2: US\$ 58,2 mil/tpa adicionada; Fase 3: US\$ 68,9 mil/tpa adicionada; Fases 4 e 5: US\$ 107,9 mil/tpa adicionada

Fontes⁶³:

- Cauchari-Olaroz utiliza extração de salmoura, lagoas de evaporação e processamento integrado até carbonato de lítio. O CAPEX de aproximadamente US\$ 979M abrange uma fronteira industrial mais longa do que a de uma operação de rocha dura que termina em concentrado de espodumênio.

63 Disponíveis em:

<https://www.lithium-argentina.com/projects/cauchari-olaroz>
<https://www.aramet.com/en/news/aramet-inaugurates-its-direct-lithium-extraction-plant-in-argentina-becoming-the-first-european-company-to-produce-battery-grade-lithium-carbonate-at-industrial-scale/>
https://www.riotinto.com/en/news/releases/2024/rio-tinto-to-invest-2_5-billion-to-expand-rincon-lithium-project-capacity-to-60000-tonnes-per-year
<https://www.riotinto.com/en/news/releases/2026/rio-tinto-secures-1-175-billion-financing-package-for-rincon-lithium-project-in-argentina>
<https://lithiumamericas.com/news/news-details/2025/Lithium-Americas-Increases-Mineral-Resource-and-Reserve-for-Thacker-Pass/default.aspx>

- Centenario-Ratones utiliza extração direta de lítio. O custo de US\$ 4.500 a US\$ 5.000/t LCE corresponde à expectativa para plena capacidade, não ao custo realizado durante o ramp-up. A intensidade de US\$ 36,3 mil/tpa considera o investimento total dividido por 24 ktpa.
- Rincon também utiliza DLE, mas permanece como referência prospectiva. O investimento de US\$ 2,50 bilhões contempla a expansão da capacidade total para 60 ktpa, incluindo a planta inicial e a unidade principal. Não há OPEX público suficientemente detalhado para inclusão no quadro.
- Thacker Pass não é uma operação de salmoura. Trata-se de um depósito sedimentar cuja rota inclui mineração, preparação do minério, lixiviação ácida, purificação e produção de carbonato. A capacidade de 160 ktpa resulta das quatro fases produtivas de 40 ktpa cada. O custo de US\$ 6.238/t pertence à configuração otimizada de plena escala e não deverá ser utilizado como OPEX da Fase 1. A conclusão da primeira fase está prevista para o final de 2027, com ramp-up comercial em 2028.

Tabela 50. 2. Benchmarking para *Midstream*: Conversão e Refino Químico

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
CBL, Divisa Alegre, Brasil	Operação integrada de concentrado de espodumênio até compostos de lítio	2 ktpa de carbonato e hidróxido de lítio	Não divulgado	Não divulgado	N/A
AMG Lithium, Bitterfeld, Alemanha	Purificação de hidróxido técnico para hidróxido grau bateria	Módulo 1: 20 ktpa de LHM grau bateria	Não divulgado	US\$ 150 M	US\$ 7.500/tpa
Rock Tech, Guben, Alemanha	Conversor completo de concentrado de espodumênio para LHM	24 ktpa de LHM grau bateria	US\$ 4.417/t de LHM	US\$ 774,5 M	US\$ 32,3 mil/tpa
Keliber, Finlândia	Projeto integrado de minas, concentrador e refinaria de hidróxido	15 ktpa de LHM grau bateria	Não divulgado	US\$ 891,8 M para o sistema integrado	US\$ 59,6 mil/tpa de LHM

Fonte:⁶⁴

- CBL permanece como a referência operacional brasileira para conversão química de espodumênio em carbonato e hidróxido de lítio. Entretanto, não há divulgação pública de CAPEX e OPEX.

64 Disponíveis em:<https://www.cblitio.com.br/nossas-operacoes>https://amg-nv.com/wp-content/uploads/ODDO-BHF-Forum-Presentation_January-2024-vF.pdf<https://rocktechlithium.com/en/rock-tech-lithium-projects-23-reduction-in-operating-costs-for-guben-converter/><https://www.sibanyestillwater.com/business/europe/keliber-en/keliber-news/2026/keliber-update-19jan2026/>

- O investimento da AMG Lithium em Bitterfeld já havia sido divulgado em dólares e foi mantido em US\$ 150 milhões. A intensidade correspondente é de US\$ 7.500/tpa. A fronteira industrial da planta, entretanto, é mais curta: a unidade recebe hidróxido de grau técnico e realiza purificação e acabamento para grau bateria.
- Para a Rock Tech, OPEX estimado em US\$ 4.430/t de LHM; CAPEX estimado em US\$ 776,8 milhões; e intensidade de US\$ 32,4 mil/tpa. O Projeto Guben representa um conversor completo alimentado por concentrado de espodumênio, com valores sendo projeções de projeto.
- Para a Keliber, a conversão pela mesma taxa resultou em CAPEX de aproximadamente US\$ 894,5 milhões e intensidade de US\$ 59,6 mil/tpa de LHM. Esse investimento não corresponde exclusivamente à refinaria: inclui minas, concentrador e unidade química, devendo ser interpretado como intensidade da cadeia integrada até o hidróxido de lítio.

Comparabilidade do *midstream*: as três referências internacionais representam fronteiras diferentes: AMG Bitterfeld adota purificação e acabamento de hidróxido técnico; Rock Tech Guben utiliza conversão completa de concentrado de espodumênio em LHM; enquanto Keliber é uma operação integrada entre mina, concentrador e refinaria. Consequentemente, a menor intensidade da AMG não significa necessariamente maior eficiência de implantação; ela corresponde a um processo físico e químico mais curto.

Tabela 51. 3. Benchmarking para *Downstream* (CAM)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
EcoPro BM, Debrecen, Hungria	Complexo integrado para CAM de alto teor de níquel e processamento associado	Capacidade inicial: 54 ktpa; expansão futura para 108 ktpa	Não divulgado	US\$ 831,7 M	US\$ 15,4 mil/tpa para 54 ktpa; US\$ 7,7 mil/tpa para 108 ktpa
POSCO Future M, Pohang, Coreia do Sul	Planta dedicada a material catódico NCA	30 ktpa de CAM	Não divulgado	US\$ 262,4 M	US\$ 8,75 mil/tpa
LG Chem, Tennessee, EUA	Greenfield de CAM NCMA em construção	Fase 1: 60 ktpa de CAM	Não divulgado	US\$ 1,6 B	US\$ 26,7 mil/tpa

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Ultium CAM, Bécancour, Canadá	Fase 1 da joint venture GM/ POSCO Future M para produção de CAM; entrada em operação prevista para 2026	30 ktpa de CAM	Não divulgado	US\$ 425,4 M	US\$ 14,2 mil/tpa

Fontes:⁶⁵

- Para a EcoPro BM, o investimento US\$ 831,7M com intensidades de US\$ 15,4 mil/tpa, considerando 54 ktpa; e US\$ 7,7 mil/tpa, considerando 108 ktpa. O investimento abrange um complexo industrial integrado e instalações associadas, não apenas uma linha isolada de produção de CAM.
- Para a POSCO Future M, o investimento é de US\$ 262,4M. Dividido pela capacidade de 30 ktpa, resulta em intensidade de US\$ 8,75 mil/tpa.
- Para a LG Chem, o investimento original foi de US\$ 1,34B, equivalente a US\$ 22,3 mil/tpa para a capacidade inicial de 60 ktpa. Esse valor difere do equivalente histórico de aproximadamente US\$ 1,6 bilhão apresentado à época do anúncio. Para manter consistência com a análise, o quadro utiliza exclusivamente a conversão pelo câmbio atual.
- Para a Ultium CAM, o investimento foi de US\$ 424,5 milhões. Considerando capacidade de aproximadamente 30 ktpa, a intensidade resultante é de US\$ 14,1 mil/tpa.

A Economia Circular do lítio deverá separar o pré-processamento das baterias da recuperação química ou direta dos materiais a partir do black mass.

O fluxo industrial começa com resíduos de fabricação e baterias em fim de vida; segue com descarga segura, desmontagem, trituração, peneiramento e separação de cobre, alumínio, aço, plásticos e eletrólito; produz black mass ou frações catódicas e anódicas; continua com lixiviação, separação, purificação, precipitação e cristalização; e termina com carbonato de lítio, hidróxido de lítio, sais intermediários, pCAM ou CAM regenerado.

No estágio 4a, a escala deverá ser expressa pela massa anual de baterias ou resíduos alimentados. No estágio 4b, deverão ser divulgadas tanto a capacidade de black mass processada quanto a capacidade de composto de lítio ou material ativo produzido.

65 Disponíveis em:

<https://hipa.hu/news/construction-of-ecopro-bm-s-cathod-material-plant-on-schedule/>

<https://www.poscofuturem.com/en/pr/view.do?num=670>

<https://www.lgcorp.com/media/release/27138><https://www.canada.ca/en/innovation-science-economic-development/news/2023/05/government-of-canada-invests-in-gm-posco-to-strengthen-canadas-ev-battery-supply-chain.html>

Projetos de reciclagem de baterias são multimetálicos. Níquel, cobalto, manganês, cobre, alumínio, grafita e outros materiais podem representar parcela relevante das receitas e dos custos. O CAPEX total não deverá ser associado exclusivamente ao lítio.

Tabela 52. Benchmarking para Economia Circular A: Mineração Urbana e pré-processamento de baterias

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Hydrovolt Fredrikstad, Noruega	Planta comercial de descarga, desmontagem, trituração e separação de baterias de veículos elétricos	12 ktpa de baterias alimentadas	Não disponível	US\$ 12,4 M de investimento dos sócios; apoio público de US\$ 4,5 M apresentado separadamente; CAPEX total não divulgado	US\$ 1.037/tpa sobre o investimento dos sócios
SungEel HiTech Bátonyterenye, Hungria	Expansão de unidade para processamento de resíduos de fabricação e baterias usadas	+50 ktpa sobre capacidade existente de 7 ktpa; capacidade total de 57 ktpa	Não disponível	US\$ 29,3 M	US\$ 587/tpa de capacidade adicionada

Fontes: ⁶⁶

- Hydrovolt: a planta está em operação comercial desde 2022 e produz black mass, cobre, alumínio, aço e plásticos recuperados. O investimento divulgado pelos sócios não deverá ser tratado como CAPEX integral sem confirmação de outros aportes e itens de implantação.
- SungEel HiTech: a expansão atende principalmente resíduos de fabricação de baterias e amplia uma operação já existente. A intensidade deverá utilizar os 50 ktpa adicionados, e não a capacidade total de 57 ktpa.
- As capacidades acima correspondem à massa total de baterias e resíduos recebidos (elas não representam toneladas de black mass, lítio contido ou composto de lítio recuperado).

⁶⁶ Disponíveis em:
<https://www.hydrovolt.com/article/europe-s-largest-electric-vehicle-battery-recycling-plant-begins-operations>
<https://hipa.hu/hir/a-sungeel-hitech-hungary-uj-globalis-zold-akkumulator-ujrafeldolgozo-uzemet-nyit-batonyterenyen/>

Tabela 53. Benchmarking para Economia Circular B: Recuperação química e reutilização dos materiais

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Fortum Harjavalta, Finlândia	Planta hidrometalúrgica para processamento de black mass e produção de materiais grau bateria	3 ktpa de black mass	Não disponível	US\$ 27,3 M	US\$ 9100/tpa de black mass
Green Li-ion Atoka, EUA	Planta comercial modular para conversão de black mass não classificada em pCAM, compostos de lítio e materiais anódicos	4 a 6 t/d de alimentação	Não disponível	Não disponível	n/a
Li-Cycle Rochester Hub, EUA, referência histórica não concluída	Projeto hidrometalúrgico para processamento de black mass; construção suspensa antes da entrada em operação	35 ktpa de black mass; 8,25 ktpa de carbonato de lítio; produção conjunta de níquel, cobalto e outros materiais	Não disponível	US\$ 960 M	US\$ 27,4 mil/tpa de black mass; US\$ 116,4 mil/tpa de carbonato de lítio

Fonte: ⁶⁷

- Fortum Harjavalta: a unidade recupera lítio, níquel e cobalto da black mass e produz compostos destinados à cadeia de baterias. O CAPEX não está segregado por elemento e deverá permanecer relacionado à capacidade total de black mass. Uma expansão para 28 ktpa foi anunciada, mas não deverá ser incorporada ao benchmark enquanto o investimento definitivo não estiver divulgado.
- Green Li-ion Atoka: a instalação entrou em operação comercial e utiliza uma rota de regeneração para produção de pCAM, além da recuperação de lítio e materiais anódicos. Como CAPEX e OPEX não foram divulgados, deverá permanecer como referência tecnológica e operacional.
- Li-Cycle Rochester Hub: o projeto nunca entrou em operação. A construção foi suspensa, a Li-Cycle entrou em processo de insolvência em 2025 e os ativos foram posteriormente adquiridos pela Glencore. O empreendimento deverá permanecer apenas como referência histórica de escopo e intensidade, sem ser apresentado como capacidade operacional futura confirmada.

⁶⁷ Disponíveis em:

<https://www.fortum.com/en/media/2021/06/fortum-makes-new-harjavalta-recycling-plant-investment-expand-its-battery-recycling-capacity>

<https://www.greenli-ion.com/post/green-li-ion-launches-north-americas-first-commercial-scale-pcam-producing-plant-in-atoka-oklahoma>

<https://www.fastmarkets.com/insights/li-cycle-closes-on-475-million-doe-loan-and-reports-stronger-revenue-growth/>

- A intensidade calculada por tonelada de carbonato de lítio do Rochester Hub atribui todo o CAPEX a um único produto, embora a instalação também tenha sido projetada para recuperar níquel, cobalto e outros materiais. Esse indicador deverá ser utilizado somente em conjunto com a intensidade por capacidade de alimentação.

Não foram identificados OPEX com dados públicos suficientemente segregados e comparáveis para os projetos selecionados. Para futuros empreendimentos, os custos deverão ser apresentados separadamente em:

- Custo de coleta e preparação: recebimento, transporte, descarga segura, desmontagem, trituração, peneiramento, separação física, remoção de eletrólito e produção de black mass.
- Custo de conversão: lixiviação, reagentes, extração por solventes, precipitação, cristalização, filtração, secagem, energia, mão de obra, manutenção, tratamento de gases, efluentes e resíduos.
- Custo de regeneração direta: separação das frações catódicas, remoção de contaminantes, recomposição de lítio, tratamento térmico, ajuste de composição, moagem, classificação e qualificação do material ativo.
- Custo caixa total: aquisição e transporte da alimentação, pré-processamento e conversão, deduzidos os créditos de níquel, cobalto, manganês, cobre, alumínio, grafita e demais materiais recuperados.

O balanço de massa deverá informar a quantidade de lítio contida na alimentação, a recuperação após o processamento físico, a recuperação química, a pureza do composto final e o volume efetivamente qualificado para reutilização em baterias.

No *upstream* de rocha dura, Sigma deverá permanecer como principal referência operacional brasileira de grande escala. O guidance anual deverá ser apresentado separadamente da capacidade nominal. Bandeira permanece como referência brasileira greenfield, enquanto os dados econômicos de Colina deverão ser identificados como pertencentes ao PEA histórico preparado antes da aquisição pela Pilbara Minerals.

Os projetos de salmoura convencional, DLE e depósitos sedimentares possuem fronteiras integradas até carbonato de lítio e não deverão ser comparados diretamente com operações que terminam em concentrado de espodumênio. Cauchari-Olaroz e Centenario-Ratones estão em ramp-up; Rincon está em construção; e Thacker Pass deverá ser apresentado por fases, sem atribuir à Fase 1 o OPEX da configuração total de 160 ktpa.

No *midstream*, AMG Bitterfeld realiza purificação e acabamento de hidróxido técnico; Rock Tech Guben corresponde a um conversor completo alimentado por concentrado; e Keliber integra minas, concentrador e refinaria. A diferença de intensidade entre esses projetos reflete principalmente a fronteira industrial e não apenas a eficiência de implantação.

No *downstream*, EcoPro Debrecen iniciou produção comercial em 2026, mas a capacidade futura de 108 ktpa ainda deverá ser apresentada separadamente dos 54 ktpa instalados. LG Chem Tennessee permanece em construção. Ultium Bécancour deverá utilizar somente o CAPEX da Fase 1, pois a expansão posterior foi suspensa.

Na Economia Circular, Hydrovolt e SungEel HiTech são referências de mineração urbana e pré-processamento. Fortum e Green Li-ion representam rotas posteriores de recuperação ou regeneração. Rochester Hub deverá permanecer como referência histórica não concluída.

A capacidade de alimentação de baterias ou black mass não deverá ser tratada como capacidade de produção de lítio recuperado. Em instalações multimetálicas, a avaliação deverá considerar simultaneamente a alimentação total, o lítio contido, a recuperação do elemento, a capacidade do composto final e os créditos dos demais materiais.

Para futuros projetos brasileiros, os indicadores mínimos deverão incluir origem e química das baterias, estado de carga e estado de saúde, massa anual de alimentação, teor de lítio, capacidade de black mass, recuperação por etapa, pureza e especificação do produto final, consumo de reagentes, água e energia, tratamento de efluentes, custos de coleta e transporte, custo da alimentação, créditos de coprodutos, utilização efetiva da capacidade, capital de giro e fronteira exata do CAPEX.



2.2.7 Nióbio

O Brasil exerce liderança absoluta no mercado mundial de nióbio, respondendo por cerca de 91% a 93% da produção global e detendo aproximadamente 94,1% das reservas mundiais, estimadas em 14,1 Mt de Nb₂O₅ contido (Tabela 54) (USGS 2026; SGB, 2026).

A produção nacional de nióbio está concentrada principalmente em Minas Gerais, responsável por cerca de 85% do total, e em Goiás, com aproximadamente 15% (Figura 24). Em 2024, o Brasil exportou cerca de 92 mil toneladas de ferronióbio, tendo a China como principal destino.

Em 2025, a produção bruta de minério de nióbio alcançou aproximadamente 16,1 milhões de toneladas ROM, enquanto a produção beneficiada foi de 3,28 milhões de toneladas, com teor médio de 1,36% de Nb₂O₅. Esse volume corresponde a aproximadamente 44,5 mil toneladas de Nb₂O₅ contido, segundo dados da ANM (Tabela 54) (2025). Atualmente, o país conta com quatro minas de nióbio em operação industrial (CARNEIRO; MELO, 2026).

O nióbio brasileiro está associado sobretudo a complexos alcalino-carbonatíticos, onde ocorre principalmente na forma de pirocloro, com aproveitamento favorecido por perfis lateríticos enriquecidos. Os principais depósitos são Araxá, Catalão, Pitinga, Seis Lagos e Santa Bárbara (Tabela 55, Figura 12), que asseguram ao Brasil posição estratégica e dominante no suprimento global desse metal crítico.

Tabela 54. Produção de nióbio no Brasil, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia do nióbio.

Reservas*	Minas em operação*	Produção (ROM; Mt)**	Produção beneficiada (Kt)**	Ranking mundial	
14,1 Mt	4	3,8	44.6	Reservas:	1º (94,1%)*
				Produção:	1º (93%)*

Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2025 – Anuário Mineral Brasileiro Interativo *** USGS (2026)

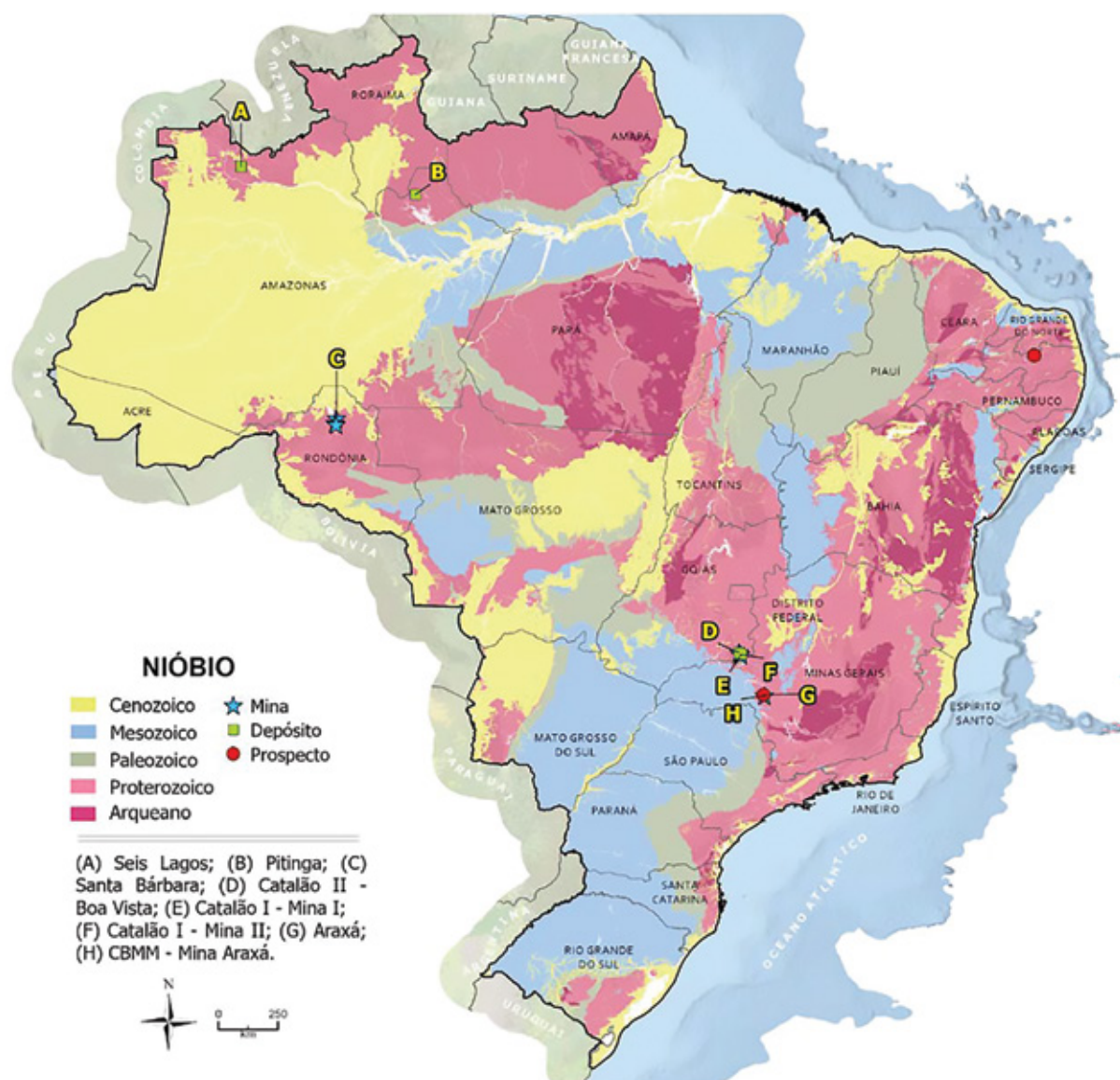
Tabela 55. Principais depósitos e ocorrências selecionados de nióbio no Brasil e seus respectivos recursos estimados.

Depósito	Empresas operadoras	Recursos estimados (Mt)	Teor (% Nb)	Status
Araxá	CBMM	896	1.49	Operando
Pitinga	CNMC	515	0.2	Operando
Boa Vista (Catalão II)	CMOC	26	0.95	Operando

Depósito	Empresas operadoras	Recursos estimados (Mt)	Teor (% Nb)	Status
Mina I (Catalão I)	CMOC	13	0.95	Operando
Mina II (Catalão I)	CMOC	5.9	1.13	Operando
Seis Lagos	SGB-CPRM	1.15	2.99	Operando
Santa Bárbara	ERSA/CSN	-	-	Não explorado

Fonte: Carneiro e Melo, 2026

Figura 24. Localização dos principais depósitos e ocorrências de nióbio do Brasil



Fonte: Compilado de Carneiro e Melo, 2026.

O Brasil domina toda a cadeia produtiva do nióbio, da sua extração até a produção de insumos para aplicações tecnológicas diversificadas em várias indústrias e setores (Figura 25), particularmente na siderurgia (aços de alta resistência), aeroespacial e de defesa (superligas de nióbio) e saúde (ímãs superpotentes em ressonância magnética).

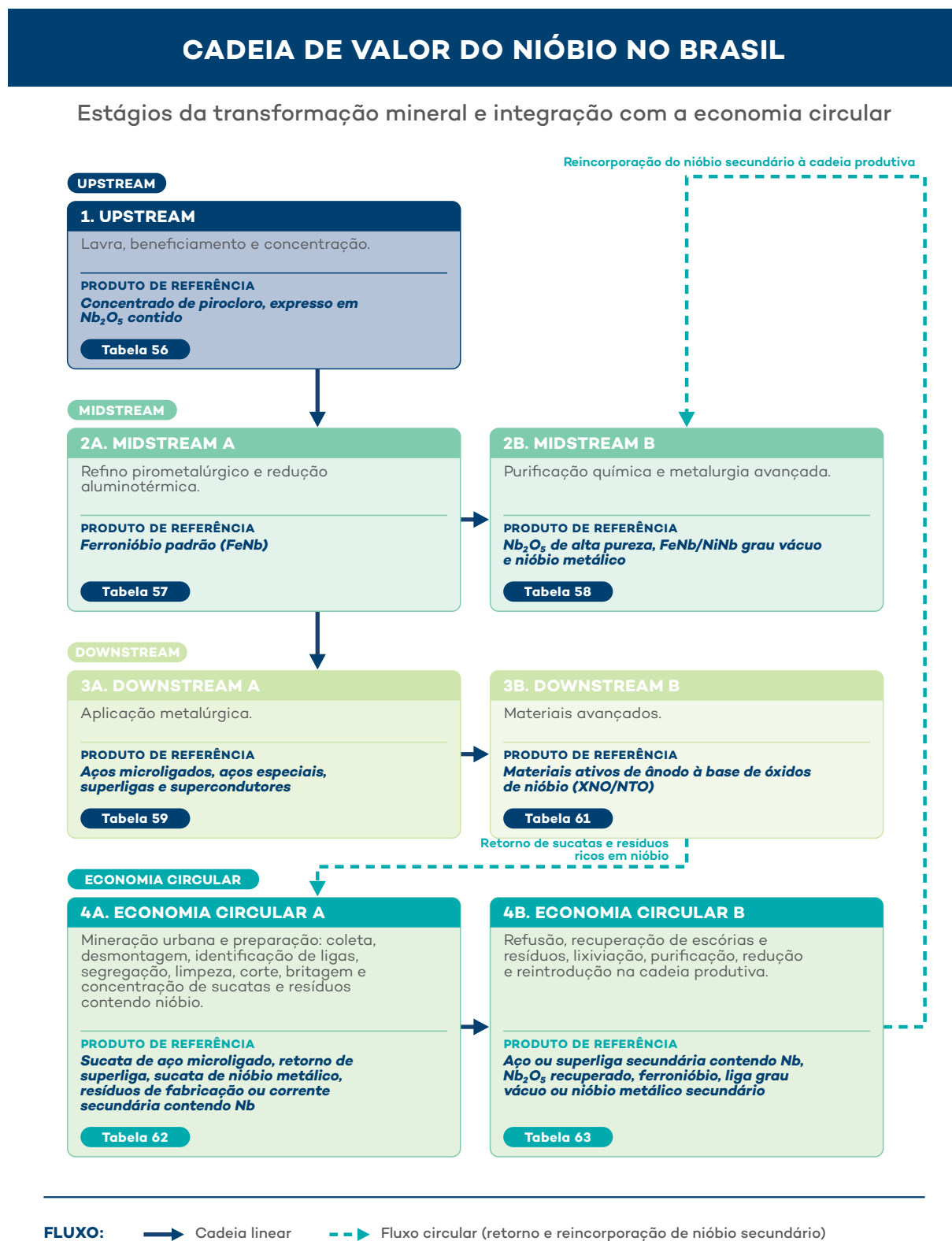
Figura 25. Panorama da indústria de nióbio (Nb) no Brasil: cadeia de valor e principais atores

Empresa / instituição	P&d	Upstream Extração de concen- trado de piroclore	Midstream Liga FeNb; óxidos de Nb	Downstream Componentes p/bateria e veículos; aços especiais	Recuperação Reciclagem
CBMM					
CMOC					
Mosaic					
COMIPA					
Mineração Taboca					
Estanho de Rondônia S.A. / CSN					
ArcelorMittal					
Gerdau					
Ternium					
Echion Technologies					
EMBRAPII					
CETEM					

 **Presença forte**  **Presença relevante**  **Ausência de atuação**

Cobertura por etapa: P&D: **3** UPSTREAM: **6** MIDSTREAM: **3** DOWNSTREAM: **5** RECUPERAÇÃO: **0**

A análise dos indicadores apresentados permite identificar os principais gargalos e oportunidades para o adensamento da cadeia de valor no contexto brasileiro.

Figura 26. Etapas da cadeia primária e da economia circular do Nióbio

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

No contexto brasileiro, a cadeia dominante é altamente integrada: mineração e concentração do pirocloro, passando para o refino do concentrado, e em seguida, produção de ferronióbio, óxidos e produtos especiais. Na operação da CBMM, por exemplo, minério e concentrado não são comercializados; a concentração envolve moagem, separação magnética, deslamagem e flotação, e o concentrado segue diretamente para transformação no mesmo complexo industrial. Por isso, os dados públicos raramente permitem isolar um custo de *upstream* em US\$/t de concentrado. O ferronióbio padrão contém aproximadamente 65%–66% de Nb, enquanto o Nb₂O₅ contém aproximadamente 69,6%–69,9% de nióbio. Portanto: 1t de FeNb650,93t de Nb2O5 equivalente.

Não devem ser comparados diretamente custos em: US\$/t de minério; US\$/kg de Nb₂O₅; US\$/t de ferronióbio; US\$/t de aço contendo nióbio.

Na Economia Circular, deverão ser separadas duas formas de retenção do nióbio. Na primeira, o elemento permanece incorporado ao aço ou à superliga durante a reciclagem metalúrgica, sem ser recuperado como produto isolado. Na segunda, resíduos concentrados, escórias, sucatas de ligas especiais e materiais de alta pureza são processados para recuperação de óxido, liga ou metal de nióbio.

A capacidade de processamento de sucata de aço ou superliga não equivale à capacidade de produção de nióbio recuperado. Em operações multimetálicas, o CAPEX integral não deverá ser atribuído ao nióbio sem segregação da linha ou do produto. Os grandes produtores brasileiros são verticalmente integrados. Quando o mesmo empreendimento aparecer no *upstream* e no *midstream*, seu CAPEX deverá ser considerado uma única vez nas análises comparativas consolidadas.

Tabela 56. 1. Benchmarking para *Upstream*

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
CBMM, Araxá, Brasil	Operação integrada de pirocloro, abrangendo mineração, concentração, refino e produção de produtos de nióbio; expansão brownfield concluída	Capacidade de 150 ktpa de ferronióbio equivalente; produção de 100 kt de ferronióbio equivalente em 2025	Não disponível por estágio	US\$ 588 M para expansão de 100 para 150 ktpa	US\$ 11,8 mil/tpa de capacidade adicionada; inclui o complexo integrado

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
CMOC, Boa Vista, Catalão, Brasil	Operação integrada de pirocloro	Produção de 10.348 t de Nb contido em 2025; FeNb como principal produto	Não divulgado por estágio	Não disponível	n/a
Kanyika, Malawi	Greenfield integrado, abrangendo mina, concentração, purificação e produção de Nb ₂ O ₅ com 99,986% de pureza;	Fase inicial: 500 ktpa ROM e 1.502 tpa Nb ₂ O ₅ ; Escala plena: 1,5 Mtpa ROM e 3.477 tpa Nb ₂ O ₅	Bruto: US\$ 25,67/kg Nb ₂ O ₅ ; líquido após crédito de Ta ₂ O ₅ : US\$ 14,26/kg	US\$ 139 M iniciais + US\$ 253 M de expansão; total de US\$ 392 M	US\$ 92,5 mil/tpa de Nb ₂ O ₅ na fase inicial; US\$ 112,7 mil/tpa na escala plena; US\$ 128,1 mil/tpa de capacidade adicionada na expansão
Elk Creek, EUA	Greenfield subterrâneo e polimetálico	7450 tpa de FeNb	US\$ 195,94/t de minério processado, incluindo US\$ 42,38/t de mineração e US\$ 106,70/t de processamento	US\$ 1,141B no projeto completo; US\$ 367,4 M na planta de processo	US\$ 153,1 mil/tpa FeNb para o projeto completo; US\$ 49,3 mil/tpa para a planta de processo
Pitinga, Brasil	Operação integrada polimetálica Nb-Ta	Produção de 4.008 t brutas de ferroligas de Nb-Ta em 2022	Não disponível	Não disponível	n/a Rota distinta da cadeia de pirocloro-FeNb

Fontes:⁶⁸

- CBMM, Araxá: o Relatório de Sustentabilidade 2023 informa capacidade anual de 150 mil toneladas de ferro-nióbio e vendas de 92 mil toneladas de FeNb equivalente. A expansão concluída em 2021 elevou a capacidade do complexo de 100 para 150 mil toneladas de produtos de nióbio, com investimento de R\$ 3 bilhões.

68 Disponíveis em:
<https://cbmm.com/relatorio-sustentabilidade/assets/files/cbmm-relatorio-completo.pdf>
<https://en.cmoc.com/html/Business/BRA-Nb-P/>
<https://www.globemmm.com/wp-content/uploads/2026/05/Globe-Investor-Presentation-Final-1-MAY-2026.pdf>
https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1512228/000153949722001510/n2574_x36exh96-1.htm
https://niocorp.com/wp-content/uploads/NioCorp_Presentation.pdf
<https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2022/myb1-2022-niobium.pdf>

- CMOC, Catalão/Ouvidor: o site da CMOC caracteriza o ativo como integrado (exploração, mineração, extração, processamento e venda) e informa produção de 10.348 toneladas de nióbio em 2025, com ferronióbio como principal produto.
- Kanyika: a apresentação de maio de 2026, baseada na BFS de abril de 2026, informa 1.502 tpa de Nb₂O₅ na fase inicial e 3.477 tpa após a expansão, além de CAPEX total de US\$ 392 milhões e custo líquido de US\$ 14,26/kg após o crédito do tântalo. O produto proposto possui pureza de 99,986% Nb₂O₅.
- Elk Creek: o relatório técnico S-K 1300 de 2022 informa aproximadamente 7.450 tpa de FeNb, OPEX LOM de US\$ 195,94/t de minério processado, CAPEX inicial de US\$ 1,1405 bilhão e US\$ 367,4 milhões especificamente classificados como planta de processo. A atualização do estudo de viabilidade estava próxima da conclusão na apresentação de junho de 2026.
- Pitinga: o USGS reporta 4.008 toneladas brutas de ferroligas de nióbio e tântalo produzidas em Pitinga em 2022. Por ser uma rota polimetálica Nb–Ta, esse ponto deve permanecer separado da curva de pirocloro para FeNb.

CBMM e CMOC são as principais referências de escala no Brasil, mas não publicam a distribuição de custos entre mina, concentração e transformação metalúrgica. Kanyika e Elk Creek apresentam dados econômicos mais completos, porém abrangem projetos integrados e produtos diferentes, devendo ser utilizados com ressalvas nas análises comparativas. Para Kanyika, a intensidade incremental da expansão utiliza os 1.975 tpa adicionados entre a fase inicial e a escala plena. Kanyika aparece novamente no *Midstream B* porque produz diretamente Nb₂O₅ de alta pureza; trata-se do mesmo empreendimento e do mesmo investimento

Tabela 57. 2a. Benchmarking para *Midstream A* (Ferronióbio Padrão)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
CBMM, Araxá, Brasil	Operação integrada de pirocloro até ferronióbio e outros produtos; expansão brownfield concluída	Capacidade de 150 ktpa de ferronióbio equivalente; produção de 100 kt em 2025	Não disponível por estágio	US\$ 588 M para a expansão integrada	US\$ 11,8 mil/tpa de capacidade adicionada; inclui o complexo integrado
CMOC, Boa Vista, Catalão, Brasil	Operação integrada de pirocloro; FeNb como principal produto	10.348 t de nióbio em 2025	Não disponível por estágio	Não disponível	n/a
Niobec, Québec, Canadá	Mina subterrânea, concentração e produção integrada de FeNb	11,7 ktpa de FeNb, com cerca de 66% Nb	Não disponível	Não disponível	n/a

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Elk Creek, FS 2022, EUA	Greenfield subterrâneo e polimetálico; produção planejada de FeNb65	7.450 tpa de FeNb	US\$ 195,94/t de minério processado para o projeto integrado	US\$ 1,141 B no projeto completo; US\$ 367,4 M na planta de processo	US\$ 153,1 mil/tpa de FeNb no projeto completo; US\$ 49,3 mil/tpa para a planta de processo
Pitinga, Brasil	Operação integrada polimetálica Nb-Ta	4.008 t brutas de ferroligas Nb-Ta em 2022	Não disponível	Não disponível	n/a Rota distinta da cadeia de pirotoro-FeNb

Fonte:⁶⁹

- O benchmark da CBMM no *upstream* e no *Midstream A* corresponde ao mesmo ativo. Sua repetição serve apenas para demonstrar a fronteira integrada e não deverá resultar em dupla contabilização de CAPEX.
- A Niobec informa capacidade de 11,7 ktpa de ferronióbio padrão com aproximadamente 66% Nb. O mesmo levantamento do USGS registra 9.212 toneladas de nióbio contido no ferronióbio da então Niobras/CMOC em 2022 e 87.880 toneladas brutas de FeNb produzidas pela CBMM naquele ano.

Embora existam quatro referências robustas de escala, apenas as operações da CBMM e Elk Creek possuem CAPEX publicado, sendo que ambas incluem escopos industriais mais amplos.

Tabela 58. Benchmarking para *Midstream B* (Óxidos e Nb metálico)

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Kanyika, Malawi	Greenfield faseado para Nb ₂ O ₅ de alta pureza, com tântalo como coproduto	Fase 1: 1.502 tpa; Escala plena: 3.477 tpa de Nb ₂ O ₅ 99,986%	Bruto: US\$ 25,67/kg Nb ₂ O ₅ ; Líquido após crédito de Ta ₂ O ₅ : US\$ 14,26/kg	US\$ 139 M iniciais + US\$ 253 M de expansão; total de US\$ 392M	US\$ 92,5 mil/tpa na fase inicial; US\$ 112,7 mil/tpa na escala plena; US\$ 128,1 mil/tpa de capacidade adicionada na expansão

⁶⁹ Disponíveis em:

<https://cbmm.com/relatorio-sustentabilidade/assets/files/cbmm-relatorio-completo.pdf>
<https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2022/myb1-2022-niobium.pdf>

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
CBMM: óxidos e produtos especiais, Brasil	Operação integrada para Nb ₂ O ₅ de alta pureza, ligas grau vácuo e nióbio metálico	Capacidade industrial histórica de 4,8 ktpa de óxidos de nióbio; capacidades não segregada para os demais produtos	Não disponível por produto	Não disponível por produto	n/a
CBMM: planta-piloto de óxidos para baterias, Brasil	Planta-piloto para desenvolvimento e produção de amostras de óxidos de nióbio para baterias	40 tpa	Não disponível	US\$ 2,9 M	US\$ 73,5 mil/tpa
CBMM: planta industrial de óxidos grau bateria, Brasil	Unidade industrial para produção de óxidos de nióbio destinados a materiais de bateria	3.000 tpa	Não disponível	US\$ 52 M	US\$ 17,3 mil/tpa

Fonte: ⁷⁰

- O projeto Kanyika é o único benchmark recente consultado que combina simultaneamente escala, pureza, OPEX, CAPEX inicial e CAPEX de expansão para Nb₂O₅ de alta pureza. Já o Departamento de Defesa dos Estados Unidos concedeu US\$ 26,4 milhões à Global Advanced Metals para viabilizar produção doméstica de óxido de alta pureza, mas não divulgou capacidade nem investimento total. Os dados de Kanyika são os mesmos apresentados no *upstream* e não representam um investimento adicional de *midstream*.
- CBMM: a capacidade de 4,8 ktpa corresponde à referência histórica de produção de óxidos de nióbio. A nova unidade de 3.000 tpa possui fronteira específica para produtos grau bateria. As duas capacidades não deverão ser somadas sem confirmação de que representam linhas integralmente independentes.
- CBMM: a planta-piloto de 40 tpa e a unidade industrial de 3.000 tpa deverão ser transferidas do *Downstream* B para o *Midstream* B, pois seus produtos são óxidos ou precursores de nióbio e não material ativo de ânodo acabado.

70 Disponíveis em:

<https://www.globemm.com/wp-content/uploads/2026/05/Globe-Investor-Presentation-Final-1-MAY-2026.pdf>
<https://cbmm.com/en/about-cbmm/our-history>
<https://cbmm.com/-/media/cbmm/media-center/noticias-internas/cbmm-invest-tecnologia-niobio-segmento-siderurgico/cbmm-investe-para-impulsionar-diviso-de-materiais-para-baterias--release.pdf>
https://www.bcb.gov.br/rex/sml/UYU_taxas.asp?frame=1
<https://cbmm.com/assets/infographic/pt/index.html>

Tabela 59. Benchmarking para *Downstream* A (Aplicações em Aço)

Benchmark	Tipo	Escala	Contribuição do FeNb	CAPEX	Intensidade
Adição de 0,02% Nb	Cenário paramétrico de aço microligado com FeNb65	1 t de aço; 0,20 kg Nb, equivalente a 0,308 kg FeNb65	US\$ 7,91/t de aço de contribuição do FeNb	n/a	n/a
Adição de 0,05% Nb	Cenário paramétrico de aço microligado com FeNb65	1 t de aço; 0,50 kg Nb, equivalente a 0,769 kg FeNb65	US\$ 19,77/t de aço de contribuição do FeNb	n/a	n/a
Adição de 0,10% Nb	Cenário paramétrico de aço especial com FeNb65	1 t de aço; 1,00 kg Nb, equivalente a 1,538 kg FeNb65	US\$ 39,54/t de aço de contribuição do FeNb	n/a	n/a

Fonte: ⁷¹

- Para o principal *downstream* do nióbio, não é metodologicamente adequado atribuir todo o CAPEX ou OPEX de uma siderúrgica ao nióbio. O FeNb é um insumo de microliga adicionado em quantidade muito pequena; o custo relevante é sua contribuição por tonelada de aço.
- A CBMM informa que o ferronióbio possui aproximadamente dois terços de nióbio e que uma adição de apenas 0,02% Nb já pode modificar as propriedades do aço. A ANM reporta preço médio FOB de exportação do FeNb de US\$ 25,70/kg em 2024.

A fórmula recomendada para a contribuição do FeNb por tonelada de aço é: $\text{custo de FeNb por t de aço} = \frac{\text{dosagem de Nb em kg}}{\text{teor de Nb no FeNb}} \times \text{preço do FeNb}$, usando FeNb com 65% Nb e x preço FOB de 2024.

Tabela 60. Preço FOB de 2024

Cenário de adição	Nb por t de aço	FeNb65 necessário	Contribuição indicativa
0,02% Nb (exemplo técnico CBMM)	0,20 kg	0,308 kg/t aço	US\$ 7,91/t de aço
0,05% Nb (sensibilidade)	0,50 kg	0,769 kg/t aço	US\$ 19,77/t de aço
0,10% Nb (sensibilidade)	1,00 kg	1,538 kg/t aço	US\$ 39,54/t de aço

Fonte: CBMM, 2024.

⁷¹ <https://cbmm.com/relatorio-sustentabilidade/assets/files/cbmm-relatorio-completo.pdf>

Tabela 61. Benchmarking para *Downstream B* (AAM para baterias)

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
CBMM– Echion XNO, Brasil	Produção comercial de material ativo de ânodo à base de óxido de nióbio	2.000 tpa de XNO, equivalentes a 1 GWh de células	Não disponível	Não disponível em base segregada	n/a

Fonte: ⁷²

- CBMM: a unidade foi inaugurada em 2024. A capacidade de 2.000 tpa de XNO está associada ao programa industrial de óxidos grau bateria da CBMM e não deverá ser tratada como investimento independentemente da plataforma de 3.000 tpa apresentada no *Midstream B*.
- CBMM: a meta de 20 ktpa de óxidos de nióbio para baterias até 2030 deverá permanecer apenas como objetivo de expansão. Ela não deverá ser inserida na tabela de benchmarking enquanto o CAPEX, a divisão por produto e a capacidade específica de XNO não estiverem disponíveis.

A Economia Circular do nióbio⁷³ possui características diferentes das cadeias de metais comercializados em grandes proporções. Nos aços microligados, o teor de Nb é baixo e o elemento permanece incorporado à sucata ferrosa. A reciclagem ocorre pela coleta, classificação e refusão do aço, sem recuperação isolada do nióbio.

Em superligas, ligas grau vácuo, nióbio metálico e materiais supercondutores, a maior concentração e o maior valor do material permitem identificação da liga, segregação do retorno industrial, limpeza, preparação e refusão controlada. Resíduos, escórias, pós e correntes de processo com maior teor também podem seguir rotas químicas para recuperação de Nb₂O₅.

O fluxo industrial de referência compreende coleta de sucata industrial e pós-consumo; identificação da liga; segregação e preparação; refusão direta quando a composição puder ser preservada; ou lixiviação, separação, purificação e redução quando for necessária a recuperação específica do nióbio.

A taxa de entrada de nióbio reciclado pode ser elevada quando se considera sua permanência na sucata ferrosa, mas a recuperação funcional do elemento como produto isolado

72 Disponíveis em:

<https://assets.cbmm.com/-/media/CBMM/Imagens-REDESIGN/Relatorio-sustentabilidade/suistaibaility-reports-2024-en-v2.pdf>
https://cbmm.com/-/media/cbmm/media-center/noticias-internas/nova-planta-xno/press_release_eng_cbmm-facility-opening.pdf
https://cbmm.com/-/media/cbmm/media-center/noticias-internas/nova-planta-xno/press_release_eng_cbmm-facility-opening.pdf

73 https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCREEN2_factsheets_NIOBIUM-update.pdf

é muito baixa. Por isso, deverão ser mantidas separadas a reciclagem do aço contendo Nb e a recuperação específica de óxido, liga ou metal.

Tabela 62. Benchmarking para Economia Circular A: Mineração Urbana, coleta e preparação

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Aperam Recycling, rede global	Coleta, análise, identificação, mistura e preparação de sucatas de aço inoxidável, metais especiais e superligas	Mais de 50 unidades globais; capacidade específica de material contendo Nb não disponível	Não disponível por elemento	Não disponível por elemento	n/a
Quest Metals, EUA	Coleta, inspeção, amostragem, logística e comercialização de sucata de nióbio metálico, ligas e resíduos	Capacidade não disponível	Não disponível	Não disponível	n/a

Fonte:⁷⁴

- A Aperam Recycling processa sucatas de aço inoxidável, metais especiais e superligas, mas não divulga a massa de nióbio contida nem CAPEX e OPEX específicos para esse elemento. O benchmark deverá ser utilizado como referência de escala e estrutura logística de uma rede de reciclagem de ligas, não como operação dedicada de nióbio.
- A Quest Metals atua especificamente na aquisição e preparação de nióbio metálico e sucatas para superligas e refinarias, mas não publica capacidade, CAPEX ou OPEX. Deverá permanecer como referência operacional de mineração urbana especializada.
- Não foram identificados projetos independentes de coleta e preparação de sucata de nióbio com capacidade, OPEX e CAPEX simultaneamente disponíveis.

⁷⁴ Disponíveis em:

https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/AnnualReport_2024_compressed.pdf
<https://www.questmetals.com/metal-scrap-recycling/niobium>

Tabela 63. Benchmarking para Economia Circular B:
Recuperação, reciclagem metalúrgica e refino

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
CBMM, Araxá, Brasil	Recuperação de produto de nióbio a partir de material previamente disposto em aterro industrial	2.000 t de produto recuperadas em 2025	Não disponível	Não disponível	n/a
Global Advanced Metals, Boyertown, EUA	Recuperação de nióbio de corrente residual e produção de Nb ₂ O ₅ de alta pureza em instalações existentes	Até 272 tpa de material contendo nióbio desviadas de aterro; capacidade de Nb ₂ O ₅ não disponível	Não disponível	US\$ 26,4 M de aporte público; CAPEX total não disponível	US\$ 97,1 mil/tpa de material desviado de aterro, calculados sobre o aporte público

Fonte: ⁷⁵

- CBMM: as 2.000 t referem-se ao produto recuperado a partir de material de aterro e não necessariamente à massa de nióbio puro ou de Nb₂O₅. Como o CAPEX e o OPEX da iniciativa não foram divulgados separadamente, não deverá ser calculada intensidade de capital.
- Global Advanced Metals: o projeto deverá ser transferido do *Midstream B* para a Economia Circular porque recupera nióbio de uma corrente residual. O aporte público de US\$ 26,4 M não representa necessariamente o CAPEX integral. A empresa estima evitar a disposição anual de até 272 t de material, mas não divulga a capacidade de produção de Nb₂O₅.
- Além desse projeto específico, as unidades da Global Advanced Metals em Boyertown e Aizu recuperam peças sólidas de nióbio, aparas, perdas de forjamento, resíduos de usinagem e outros materiais gerados internamente. Como não há capacidade ou investimento segregados, essas operações não deverão formar linhas adicionais na tabela.

75 <https://cbmm.com/relatorio-sustentabilidade/assets/files/cbmm-relatorio-completo.pdf>
<https://globaladvancedmetals.com/wp-content/uploads/2025/06/GAM-ESG-Update-Refresh-May-2025.pdf>
<https://www.war.gov/News/Releases/Release/Article/3912485/departament-of-defense-awards-264-million-for-low-cost-domestic-production-of-hi/>
<https://globaladvancedmetals.com/tantalum-stewardship-internal-recovery-and-recycling/>
<https://globaladvancedmetals.com/recycling-tantalum-and-process-materials-use-less-by-recycling-more/>

Não foram identificados OPEX com dados públicos suficientemente segregados para os projetos selecionados. Para futuros empreendimentos, os custos deverão ser apresentados separadamente em:

- Custo de coleta e preparação: desmontagem, identificação da liga, análise química, segregação, limpeza, corte, britagem, moagem, transporte e preparação para refusão ou processamento químico.
- Custo de reciclagem metalúrgica: refusão, fusão a vácuo, tratamento de escórias, correção de composição, energia, eletrodos, mão de obra, manutenção e controle de gases.
- Custo de recuperação química: lixiviação, precipitação, extração por solventes, purificação, calcinação, redução, tratamento de efluentes e disposição dos rejeitos.
- Custo caixa total: aquisição e transporte da sucata ou resíduo; preparação; processamento metalúrgico ou químico; dedução dos créditos de níquel, cobalto, tântalo, titânio, estanho, aço e demais materiais recuperados.

Em aço microligado, deverão ser informados o teor médio de Nb da sucata e o grau de retenção do elemento após a refusão. Em superligas e materiais especiais, deverão ser informados composição da liga, contaminação, perdas metálicas, necessidade de diluição com matéria-prima virgem e especificação do produto secundário.

No contexto brasileiro, a referência principal permanece a cadeia integrada de pirocloro em Araxá e Catalão/Ouvidor. A CBMM produziu 100 kt de ferronióbio equivalente em 2025 e possui capacidade de 150 ktpa. O investimento de US\$ 588 M abrangeu a expansão integrada do complexo e não deverá ser atribuído isoladamente à mineração, à concentração ou à produção de ferronióbio. Kanyika e Elk Creek fornecem dados econômicos mais completos, mas apresentam produtos e configurações diferentes. Kanyika avança até Nb₂O₅ de alta pureza, com tântalo como coproduto. Elk Creek produz ferronióbio em um projeto polimetálico e deverá permanecer identificado pela base econômica de 2022 até a publicação do estudo atualizado.

No *Midstream B*, a planta-piloto e a unidade industrial de óxidos grau bateria da CBMM deverão ser transferidas do *downstream*. O produto dessas instalações é óxido ou precursor de nióbio. O *downstream* deverá considerar apenas o XNO, que constitui material ativo de ânodo. As capacidades de 4,8 ktpa de óxidos, 3.000 tpa de óxidos grau bateria e 2.000 tpa de XNO não deverão ser somadas sem confirmação das fronteiras e eventuais sobreposições entre as linhas industriais. Da mesma forma, o CAPEX da plataforma de óxidos não deverá ser atribuído novamente à unidade de XNO.

Na aplicação siderúrgica, os valores de US\$ 7,91/t, US\$ 19,77/t e US\$ 39,54/t representam a contribuição do ferronióbio por tonelada de aço, e não o OPEX da siderúrgica. O CAPEX de uma aciaria não deverá ser atribuído ao nióbio.

Na Economia Circular, deverão ser separadas a retenção do nióbio na reciclagem do aço e a recuperação específica do elemento. A primeira movimenta grandes volumes de sucata, mas não gera um produto de nióbio isolado. A segunda é aplicável a resíduos concentrados, superligas, sucata metálica de alta pureza, escórias e correntes de processo. A CBMM é a principal referência brasileira pública de recuperação a partir de material de aterro. A Global Advanced Metals é a referência internacional com investimento divulgado para recuperação de corrente residual e produção de Nb_2O_5 . Aperam Recycling e Quest Metals demonstram as etapas de coleta, identificação e preparação, mas não possuem CAPEX e OPEX específicos para nióbio.

Para futuros projetos brasileiros, os indicadores mínimos deverão incluir origem do material, massa anual de alimentação, teor de Nb, composição das ligas, capacidade do produto recuperado, recuperação por etapa, pureza, perdas em escórias e rejeitos, custo de coleta e preparação, custo de conversão, consumo de energia e reagentes, créditos de coprodutos, utilização efetiva da capacidade, capital de giro e fronteira exata do CAPEX.



2.2.8 Potássio

O potássio ocupa posição estratégica para o Brasil em razão de sua importância direta para a segurança alimentar e para o setor agrícola, um dos pilares da economia nacional. Por ser componente essencial na formulação de fertilizantes, esse mineral exerce papel fundamental na manutenção da produtividade agrícola. Entretanto, apesar de sua relevância, o país ainda apresenta elevada dependência externa, importando a maior parte do potássio consumido internamente. Essa condição torna o desenvolvimento de reservas e projetos nacionais uma prioridade estratégica, com o objetivo de reduzir a vulnerabilidade do Brasil em relação ao suprimento externo.

As reservas brasileiras de potássio são estimadas em aproximadamente 225 milhões de toneladas de K₂O contido, correspondendo a cerca de 3,2% das reservas mundiais, o que coloca o Brasil como detentor da sétima maior reserva global desse insumo (USGS, 2025; ANM, 2025). Em 2025, a produção nacional de potássio foi de aproximadamente 2,2 milhões de toneladas ROM, com produção beneficiada de 422 mil toneladas (Tabela 64). Esse volume correspondeu a cerca de 244,9 mil toneladas de K₂O contido, com teor médio de 58% de K₂O, segundo dados da ANM (2026).

Do ponto de vista geológico, as mineralizações de potássio no Brasil ocorrem principalmente em depósitos evaporíticos do Cretáceo Inferior e do Permo-Carbonífero. Esse contexto indica que o potencial nacional está fortemente associado a bacias sedimentares que reuniram condições favoráveis à concentração e precipitação de sais potássicos, como as bacias de Sergipe e do Amazonas. Na Bacia de Sergipe, além da mina de Taquari-Vassouras, destacam-se os depósitos de Rosário do Catete, associado à carnalita, e Santa Rosa de Lima, associado à silvita. Na Bacia do Amazonas, considerada a principal fronteira de expansão da produção nacional, destacam-se os projetos Autazes, Arari, Fazendinha e Itacoatiara (MOTTA, 2026) (Tabela 65; Figura 27).

Tabela 64. Produção de potássio no Brasil, reservas nacionais e posição mundial do Brasil na cadeia do potássio.

Reservas*	Minas em operação*	Produção (ROM; Mt)**	Produção beneficiada (Kt)**	Ranking mundial	
225 Mt K ₂ O contido	1	2,2	422	Reservas:	7º (3,2%)*
				Produção:	-

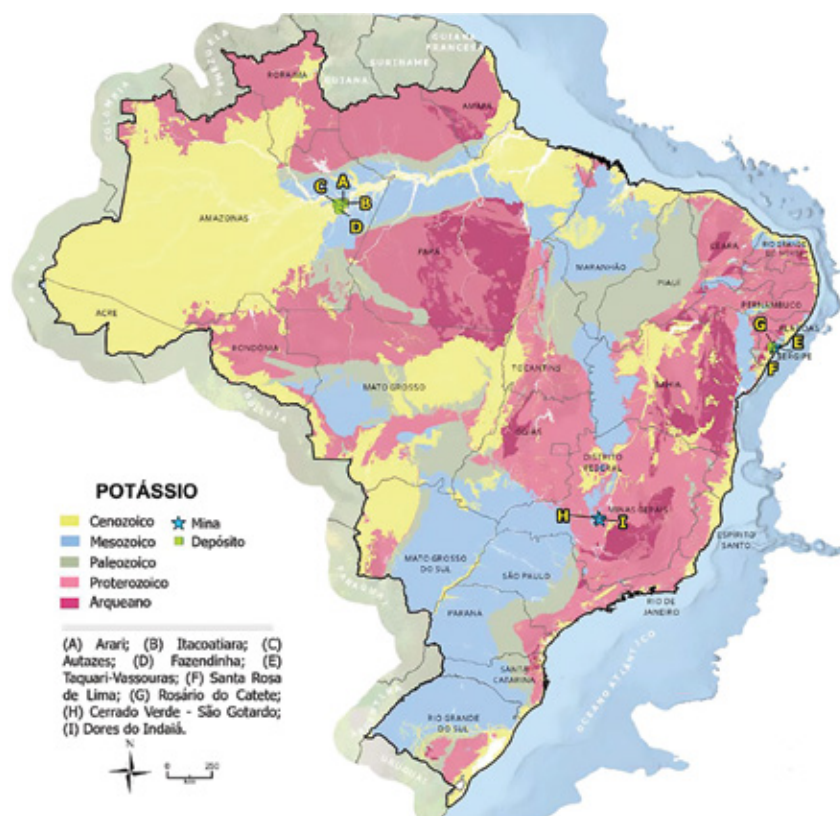
Fonte: *SGB (2026); ** ANM 2025 – Anuário Mineral Brasileiro Interativo *** USGS (2026)

Tabela 64. Principais depósitos e ocorrências selecionados de potássio no Brasil e seus respectivos recursos estimados.

Depósito	Empresas operado- ras	Recursos estimados (Mt)	Teor (% K ₂ O)	Status
Autazes	Potássio do Brasil	767	30.7	Licenças de Instalação
Arari	Petrobras	545	32.7	Viabilidade
Fazendinha	Petrobras	478	27.8	Viabilidade
Itacoatiara	Potássio do Brasil	263	19	Viabilidade
Dores do Indaiá	Kalium Mineração	220	10.6	Exploração
Cerrado Verde	Verde Agritech	253	92	Exploração
Santa Rosa de Lima	Petrobras	55.2	24.6	Exploração
Taquari-Vassouras	VL Mineração	25.5	15	Operação
Sub-bacia Taquari Vassouras Carnalita	Petrobras / VL Mineração	14.4	6.6	Exploração

Fonte: Motta, 2026.

Figura 27. Localização dos principais depósitos e ocorrências de potássio do Brasil



Fonte: Compilado de Motta, 2026.

A produção beneficiada brasileira em 2025 atingiu 422.300 toneladas de concentrado de potássio (Sumário Mineral – ANM, 2025), originada predominantemente no Complexo Mina/Usina de Taquari-Vassouras, em Sergipe, operada pela VL Mineração. Esta é a única mina de potássio em operação no Brasil, insumo essencial para a produção de fertilizantes e o aumento da produtividade agrícola, o qual o país ainda importa cerca de 85% do potássio consumido. Este fato confere à cadeia produtiva do potássio um caráter fortemente assimétrico, caracterizado por baixa produção de minério de potássio, mas com a presença importante de várias empresas produtoras de fertilizantes e insumos relacionados (Figura 28).

Figura 28. Panorama da atuação das empresas ao longo da cadeia de valor do potássio.

Empresa / instituição	P&D	Upstream Recurso/reserva	Upstream Extração	Midstream Rocha potássica, concentrados e sais	Downstream Fertilizantes	Recuperação Reciclagem
potássio do Brasil						
Petrobras						
Kalium Mineração						
Verde Agritech						
VL Mineração						
Mosaic						
Yara						
Yoorin Fertilizantes						
Fertipar						
Fertilizantes Heringer						
Klabin						

 Presença forte
 Presença relevante
 Ausência de atuação

Cobertura por etapa: P&D: **4** UPSTREAM: **4** UPSTREAM: **1** MIDSTREAM: **3** DOWNSTREAM: **5** RECUPERAÇÃO: **1**

Síntese da cobertura da cadeia:

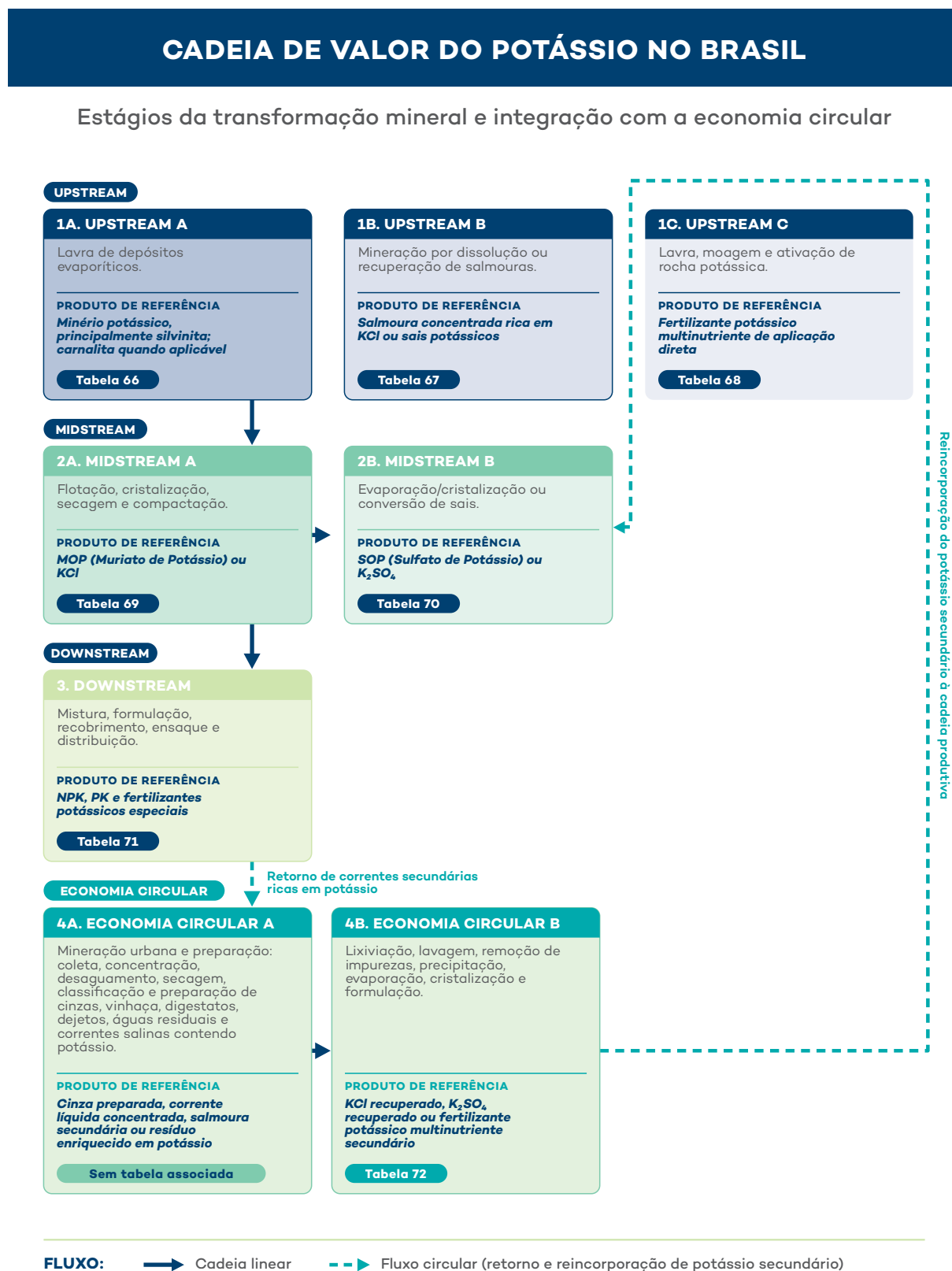
P&D - baixa; **Upstream (recursos)** - moderada; **Extração** - muito baixa;

Midstream - baixa; **Downstream** - alta; **Recuperação/Reciclagem** - muito baixa.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

A análise dos indicadores apresentados permite identificar os principais gargalos e oportunidades para o adensamento da cadeia de valor no contexto brasileiro.

Figura 29. Etapas da cadeia primária e da economia circular do Potássio



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

No contexto brasileiro, o mineral potássio representa a cadeia de fertilizantes potássicos, e não a produção de potássio metálico. A cadeia brasileira de referência parte principalmente de depósitos evaporíticos de silvinita e, localmente, carnalita, processados para produzir cloreto de potássio. Também existe uma rota nacional distinta baseada em siltito glauconítico, utilizado na fabricação de fertilizantes potássicos multinutrientes de aplicação direta.

As análises comparativas devem ser mantidas separadas:

- Evaporitos por lavra subterrânea para produzir MOP/KCl;
- Mineração por dissolução para produzir MOP/KCl;
- Salmouras naturais para produzir SOP/K₂SO₄;
- Rocha potássica brasileira na produção de fertilizante de aplicação direta;
- MOP/SOP e outros nutrientes para produzir blends NPK/PK e especialidades.

Unidades:

- **MOP/KCl:** normalmente comercializado com cerca de 60% a 62% de K₂O equivalente.
- **SOP/K₂SO₄:** normalmente comercializado com cerca de 50% a 52% de K₂O equivalente.
- **K₂O equivalente:** convenção para nutrientes; isso não significa que o produto contenha fisicamente K₂O livre.

A intensidade de capital foi calculada como:

$$\text{Intensidadedecapital} = \text{CAPEXinicial} / \text{capacidadenominalanualdeproduto}$$

Para expansões:

$$\text{Intensidadeincremental} = \text{CAPEXdaexpansão} / \text{capacidadeanualadicionada}$$

Na Economia Circular do potássio, a mineração urbana está relacionada principalmente à recuperação de correntes residuais municipais, industriais e agroindustriais, e não à desmontagem de bens duráveis. As principais fontes secundárias são cinzas de biomassa e incineração, vinhaça, digestatos, dejetos animais, águas residuais e salmouras industriais.

A capacidade de alimentação de cinzas, efluentes ou resíduos não equivale à capacidade de produção de KCl, K₂SO₄ ou fertilizante recuperado. As análises comparativas deverão indicar separadamente a massa da alimentação, o teor de K ou K₂O, a recuperação do elemento e a massa do produto comercial.

Projetos integrados que aparecem no *upstream* e no *midstream* representam os mesmos ativos. Seus CAPEX não deverão ser somados nem tratados como investimentos independentes em análises consolidadas.

Tabela 66. Benchmarking para *Upstream A: Evaporitos e Lavra Subterrânea*

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Taquari (referência histórica), Brasil	Operação evaporítica integrada; ativo vendido pela Mosaic em novembro de 2025	1,5 Mt de minério a 16,7% K ₂ O em 2025, até a data da venda	Não disponível por estágio	Não disponível	n/a
Autazes, AM, Brasil	Greenfield integrado para produção de MOP a partir de depósito evaporítico	2,4 Mtpa de produto	US\$ 78,7/t de MOP	US\$ 2,5 B	US\$ 1.042/tpa de MOP
Muga, Espanha (referência de projeto)	Greenfield faseado de lavra subterrânea, flotação, cristalização e produção de MOP; implantação e desembolsos de capital suspensos	Fase 1: 500 ktpa de MOP; Fase 2: capacidade total de 1,0 Mtpa	US\$ 121,90/t de MOPC1	Fase 1: US\$ 506,9 M; Fase 2: US\$ 322,9 M; total: US\$ 829,8 M	Fase 1: US\$ 1.014/tpa; expansão: US\$ 646/tpa adicionada; total: US\$ 830/tpa
Jansen, Canadá	Greenfield de grande escala em dois estágios; Estágio 1 em construção e Estágio 2 em desenvolvimento	Estágio 1: 4,15 Mtpa; Estágio 2: +4,36 Mtpa; Capacidade combinada de 8,5 Mtpa	US\$ 114–130/t na operação combinada, incluindo mina, ferrovia e porto	Estágio 1: US\$ 8,4 B; Estágio 2: US\$ 6,9 B; total: US\$ 15,3 B	Estágio 1: US\$ 2.024/tpa; Estágio 2: US\$ 1.583/tpa adicionada; Total: US\$ 1.800/tpa

Fonte: ⁷⁶

- Taquari: Form 10-K de 2025 da Mosaic reporta 1,5 Mt de minério a 16,7% K₂O em 2025, até a data da venda, comparado com 1,7 Mt a 16,4% em 2024 e 1,9 Mt a 14,7% em 2023. O documento informa que o ativo foi vendido em novembro de 2025. Taquari deverá permanecer como referência histórica brasileira de escala e teor. A operação deixou de integrar o portfólio da Mosaic em novembro de 2025. O valor da transação não representa CAPEX de implantação e não deverá ser utilizado para calcular intensidade de capital.
- Autazes: o projeto apresenta produção anual de 2,4 milhões de toneladas, OPEX aproximado de US\$ 79/t e CAPEX pré-operacional próximo de US\$ 2,5 bilhões. A intensidade de US\$ 1.042/tpa foi calculada a partir desses valores. A página utiliza “tons” para a capacidade e “tonne” para o OPEX; a unidade métrica exata deve ser confirmada antes da normalização definitiva.
- Muga: O projeto foi colocado em espera em todas as frentes operacionais, com suspensão da implantação e dos desembolsos de capital enquanto permanece pendente a decisão judicial relacionada à licença de Goyo. Muga deverá ser utilizado como referência econômica histórica e não como capacidade futura confirmada.
- Jansen: a primeira produção do Estágio 1 está prevista para meados de 2027. O estágio 2 prevê 4,36 Mtpa adicionais, totalizando 8,5 Mtpa, com OPEX de US\$ 105–120/t baseado na divulgação de 2023 e inclui mina, ferrovia e porto, mas exclui imposto sobre carbono.

76 Disponíveis em:

<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1285785/000128578526000017/mos-20251231.htm>
https://investors.mosaicco.com/files/doc_downloads/2026/04/MOS-2025-12-31-10K-Updated.pdf
<https://ir.brazilpotash.com/autazes-project>
https://www.highfieldresources.com.au/wp-content/uploads/sites/2/2026/05/HFR-Sustainability-Report-2025_FIN.pdf
<https://www.highfieldresources.com.au/wp-content/uploads/sites/2/2025/12/Market-Update-Presentation-2025.pdf>
<https://www.bhp.com/news/media-centre/releases/2023/10/bhp-approves-investment-in-stage-two-of-jansen-potash-project>

Os estudos publicados e as referências disponíveis divulgam custos integrados até o MOP comercializável, sem separar o custo da mina do custo de beneficiamento. Portanto, os valores de OPEX abaixo não devem ser interpretados como custo exclusivo de lavra.

Tabela 67. Benchmarking para *Upstream B*: Mineração por dissolução e salmouras

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Tugaske, Canadá	Greenfield modular de mineração por dissolução e produção de KCl de alta pureza; atualização prevista para 2026	Base econômica: 250,82 ktpa de KCl; atualização de 2026 considera capacidade mínima de 500 ktpa	US\$ 47,48/t de produto FCA mina; sustaining CAPEX de US\$ 15,73/t	US\$ 261,9 M	US\$ 1.044/tpa sobre a capacidade da base econômica de 250,92 ktpa de KCl
Belle Plaine, Canadá	Operação existente de grande escala por mineração em solução	3,0 Mtpa de MOP; equivalente a 11 Mt de minério a 19,3% K ₂ O em 2025	Não disponível por etapa	Não disponível	n/a
Mackay, Austrália	Projeto de salmoura natural, lagoas de evaporação e produção de SOP; retirada do projeto e reabilitação em andamento	3,0 Mtpa de sais brutos para produção de 450 ktpa de SOP a 52% K ₂ O	US\$ 159/t de SOP FOB Wyndham	US\$ 415 M	US\$ 922/tpa de SOP

Fonte:⁷⁷

- Tugaske: capacidade de 250.820 t/ano de KCl acima de 99% de pureza, CAPEX de US\$ 280,9 milhões, OPEX de US\$ 51,1/t e sustaining CAPEX de US\$ 16,7/t. A estimativa é FCA mina, sem o custo de transporte assumido pelo comprador.
- Belle Plaine: capacidade operacional de 3 Mtpa de produto acabado. A operação utiliza mineração em solução e uma planta composta por refinaria e lagoa de resfriamento. Não há OPEX ou CAPEX recente segregado para a unidade.
- Mackay: extração de salmoura por trincheiras, produção de 3 Mtpa de sais brutos nas lagoas e processamento para 450 ktpa de SOP a 52% K₂O. O custo total de US\$ 159/t é FOB no porto de Wyndham e inclui mina, planta, logística rodoviária e instalação portuária. A Agrimin concluiu sua revisão estratégica do projeto, decidiu retirar-se do empreendimento e iniciou a devolução parcial das áreas e as atividades de reabilitação. CAPEX e OPEX devem ser usados como referência do DFS
- Análise comparativa: Tugaske e Belle Plaine produzem MOP/KCl; Mackay produz SOP/K₂SO₄. Os três casos devem ser analisados separadamente.

77 Disponíveis em:

<https://gensourcepotash.ca/wp-content/uploads/2024/01/GSP-Technical-Report-14Oct2021.pdf>
<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1285785/000128578526000017/mos-20251231.htm>
<https://agrimin.com.au/mackay-potash-project/>
<https://company-announcements.afr.com/asx/amn/425b0e6e-8941-11f1-892d-de2c6f1afc36.pdf>

Na mineração por dissolução, água ou salmoura é injetada no depósito subterrâneo para dissolver os minerais potássicos. A salmoura enriquecida é recuperada por poços e encaminhada para evaporação e cristalização. Em lagos salinos, a concentração ocorre predominantemente em lagoas de evaporação.

Tabela 68. Benchmarking para *Upstream C*: Rocha Potássica

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Cerrado Verde, Operação atual, Brasil	Operação integrada de rocha glauconítica e fertilizante multinutriente	Capacidade instalada de 3,0 Mtpa; vendas de 258,4 kt em 2025	US\$ 12,9/t vendida	Não disponível	n/a)
Cerrado Verde, Cenário 10 Mtpa	Cenário de expansão do PFS de 2022	10 Mtpa de produto, a 10,01% K ₂ O	US\$ 12,83/t de produto; Sustaining CAPEX de US\$ 0,50/t	US\$ 52,77 M	US\$ 5,28/tpa
Cerrado Verde, Cenário 23 Mtpa	Cenário de expansão do PFS de 2022	23 Mtpa de produto, a 10,01% K ₂ O	US\$ 11,18/t de produto; Sustaining CAPEX de US\$ 0,50/t	US\$ 129,84 M	US\$ 5,65/tpa
Cerrado Verde, Cenário 50 Mtpa	Cenário de expansão do PFS de 2022	50 Mtpa de produto, a 9,19% K ₂ O	US\$ 8,06/t de produto, mais US\$ 2,01/t de G&A e US\$ 0,50/t de sustaining CAPEX	US\$ 553,99 M	US\$ 11,08/tpa

Fonte:⁷⁸

- Cerrado Verde reportou vendas de 258.432 t em 2025 e custo médio de produção de US\$ 12,9/t vendida. O custo inclui mineração, processamento, adição de nutrientes, logística entre mina e planta e salários, mas não inclui o frete de entrega ao cliente.
- A apresentação corporativa informa capacidade instalada de 3 Mtpa, composta por 0,6 Mtpa na Planta 1 e 2,4 Mtpa na Planta 2, sem CAPEX adicional para utilização dessa capacidade. A mesma apresentação reproduz os cenários de 10, 23 e 50 Mtpa do PFS, com CAPEX, OPEX e teor de K₂O nas páginas 35–37.
- Os cenários de 10, 23 e 50 Mtpa pertencem ao mesmo projeto e estudo, não sendo três observações independentes. Eles servem para avaliar o comportamento do custo e do capital em diferentes escalas. Comparação com MOP:
- A rocha potássica produzida a partir do silito glauconítico contém 9%–10% K₂O, enquanto o MOP possui 60%–62% de K₂O equivalente. Portanto, a comparação deve considerar o $\text{custoportdeK2Oequivalente} = \text{custoportdeprodutofrac} \cdot \text{aodeK2O}$
- Mesmo após esse ajuste, ainda devem ser considerados disponibilidade agrônômica, velocidade de liberação, dose aplicada, nutrientes adicionais e custo de transporte por unidade efetiva de nutriente.

78 Disponíveis em:

<https://investor.verde.ag/wp-content/uploads/2026/03/1.-Q4-FY-2025-MDA-Verde-AgriTech-March-2026.pdf>
<https://investor.verde.ag/wp-content/uploads/2021/05/Corporate-presentation-Verde-AgriTech-January-26.pdf>

Essa rota utiliza silito glauconítico submetido principalmente a lavra, britagem, moagem e ativação mecânica. O produto é aplicado diretamente ou formulado com enxofre, boro e outros nutrientes, sem ser convertido em KCl.

Tabela 69. 2a. Benchmarking para *Midstream A*: Produção de MOP

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Autazes, Brasil	Mina subterrânea e planta integradas para produção de MOP; engenharia FEED concluída	2,4 Mtpa de MOP	US\$ 78,70/t	US\$ 2,50 B	US\$ 1.042/tpa
Tugaske, Canadá	Mineração por dissolução, cristalização, secagem e compactação de KCl	250,82 ktpa; atualização técnica de 2026 considera capacidade mínima de 500 ktpa	US\$ 47,48/t FCA mina; sustaining CAPEX de US\$ 15,73/t	US\$ 261,9 M	US\$ 1.044/tpa sobre a configuração de 2021
Muga, Espanha (referência de projeto suspenso)	Lavra subterrânea, flotação, cristalização, secagem e produção de MOP	Fase 1: 500 ktpa; total: 1,0 Mtpa	US\$ 121,90/t — C1	Fase 1: US\$ 506,9 M; Fase 2: US\$ 322,9 M; total: US\$ 829,8 M	Fase 1: US\$ 1.014/tpa; expansão: US\$ 646/tpa; total: US\$ 830/tpa
Jansen, Canadá	Mina, beneficiamento, ferrovia e estrutura portuária integrados	Estágio 1: 4,15 Mtpa; Estágio 2: +4,36 Mtpa; total: 8,5 Mtpa	US\$ 114 – 130/t na operação combinada	Estágio 1: US\$ 8,4 B; Estágio 2: US\$ 6,9 B; total: US\$ 15,3 B	Estágio 1: US\$ 2.024/tpa; Estágio 2: US\$ 1.583/tpa; total: US\$ 1.800/tpa

Fonte:⁷⁹

79 Disponíveis em:

<https://ir.brazilpotash.com/autazes-project>

<https://ir.brazilpotash.com/financials/sec-filings/content/0001193125-25-067248/d905263d20f.htm>

<https://www.gensourcepotash.ca/wp-content/uploads/2021/03/GSP-NR-Tugaske-NI43-101-22Mar2021-Final.pdf>

<https://www.gensourcepotash.ca/wp-content/uploads/2026/07/GSP-News-Release-Project-Update-13July2026.pdf>

<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1285785/000128578526000017/mos-20251231.htm>

<https://www.highfieldresources.com.au/wp-content/uploads/sites/2/2025/12/Market-Update-Presentation-2025.pdf>

<https://www.bhp.com/news/media-centre/releases/2023/10/bhp-approves-investment-in-stage-two-of-jansen-potash-project>

<https://www.bhp.com/news/media-centre/releases/2026/06/update---jansen-stage-2-potash-project>

Como os projetos divulgam os indicadores econômicos de forma integrada, alguns benchmarks aparecem mais de uma vez. Nesses casos, o CAPEX não deve ser considerado individualmente, mas sim de forma integrada. Autazes, Tugaske, Muga e Jansen aparecem no *upstream* e no *Midstream* A porque integram extração mineral e produção de MOP. As linhas das duas seções representam os mesmos empreendimentos e os mesmos investimentos. Seus CAPEX deverão ser considerados uma única vez nas análises comparativas consolidadas.

Tabela 70. Benchmarking para *Midstream* B: Produção de SOP e coprodutos

Benchmark	Projeto	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Mackay, Austrália	Salmoura natural, evaporação, conversão de sais e cristalização de SOP; projeto em retirada	450 ktpa de SOP a 52% K ₂ O	US\$ 159/t FOB Wyndham	US\$ 415 M	US\$ 922/tpa de SOP
Compass, Ogden e Wynyard, EUA e Canadá	Operações existentes de salmoura e evaporação solar para SOP	Capacidade combinada de aproximadamente 326,6 ktpa métricas; vendas de aproximadamente 295,7 kt métricas em 2025	US\$ 556/t de custo de produto; US\$ 660/t, com frete	US\$ 12,2 M de CAPEX do segmento em 2025; não representa CAPEX de construção	N/A
International Minerals Carlsbad (antiga Mosaic), EUA	Operação de langbeinita para sulfato de potássio e magnésio; produto adjacente, não SOP puro	Capacidade histórica de 0,7 Mtpa de K-Mag	Não disponível	Não disponível	n/a

Fonte: 80

- Mackay. 450 ktpa de SOP a 52% K₂O e custo total de US\$ 159/t FOB Wyndham. Como o projeto inclui mina, lagoas, planta, estrada e porto, esse OPEX não representa somente a cristalização. A repetição de Mackay no *Upstream* B e no *Midstream* B representa o mesmo projeto integrado. O CAPEX não deverá ser contabilizado duas vezes.
- Compass Minerals. Form 10-K com capacidade de 290,3 ktpa em Ogden e 36,3 ktpa em Wynyard. Em 2025, o segmento Plant Nutrition registrou US\$ 164,4 milhões de custo de produto, US\$ 30,7 milhões de frete e US\$

80 Disponíveis em:

<https://agrimin.com.au/mackay-potash-project/>
https://s22.q4cdn.com/834578860/files/doc_financials/2025/ar/Fiscal-2025-Form-10-K.pdf
<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1285785/000128578526000017/mos-20251231.htm>
<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1285785/000128578526000063/pressrelease12026-ex991.htm>
<https://www.kmag.com/>

12,2 milhões de CAPEX. Compass combina Ogden e Wynyard inclui diferentes especificações comerciais, e é um indicador contábil de segmento, mas não corresponde a um OPEX técnico isolado de planta, além de não fornecer CAPEX inicial de construção.

- Carlsbad. A Mosaic informa capacidade operacional de 0,7 Mtpa de K-Mag e 1,7 Mt de minério processado a 6,8% K₂O em 2025. O ativo de Carlsbad foi vendido pela Mosaic e passou ao controle da International Minerals Carlsbad em 2026. A capacidade deverá permanecer identificada como referência histórica divulgada pela antiga proprietária. O valor da aquisição não representa CAPEX de construção.

Tabela 71. Benchmarking para *Downstream*: NPK, PK, fertilizantes formulados

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Mosaic Fertilizantes, Brasil	Rede integrada de produção, mistura, ensaque, armazenagem e distribuição	10 plantas de blending; capacidade corporativa de 4,5 Mtpa de nutrientes e ingredientes; vendas de 8,96 Mt em 2025	US\$ 486/t vendida; indicador do segmento completo e não custo isolado de blending	Não disponível	n/a
Mosaic China	Duas plantas de mistura de fertilizantes	600 ktpa de capacidade total; 383 kt de blends vendidas em 2025	Não disponível	Não disponível	n/a
Verde/K Forte e BAKS, Brasil	Operação integrada de fertilizante mineral multinutriente e formulações especiais	Capacidade instalada de 3,0 Mtpa; vendas de 258,4 kt em 2025	US\$ 12,90/t vendida; inclui mineração, processamento e nutrientes adicionados	Não disponível para a implantação original; sem CAPEX incremental para a capacidade instalada	n/a
Rwanda Fertiliser Company, Ruanda	Planta de blending de fertilizantes NPK	100 ktpa	Não disponível	US\$ 19,2 M	US\$ 192/tpa

Fonte:⁸¹

- Mosaic: O indicador de US\$ 486/t da Mosaic Fertilizantes resulta dos custos do segmento divididos pelas toneladas vendidas. Ele incorpora nutrientes adquiridos, mineração, produção química, mistura, logística e

81 Disponível em:

https://investors.mosaicco.com/files/doc_downloads/2026/04/MOS-2025-12-31-10K-Updated.pdf

<https://www.minicom.gov.rw/news-detail/rwanda-launches-a-fertilizer-blending-factory-with-an-annual-capacity-to-blend-100000-tonnes>

distribuição e não deverá ser utilizado como custo de conversão de uma planta de blending. A capacidade corporativa de 4,5 Mtpa da Mosaic não corresponde às vendas totais de 8,96 Mt porque o segmento também comercializa nutrientes e ingredientes adquiridos de terceiros.

- A Verde não é uma planta convencional que compra MOP e apenas realiza mistura. Seu OPEX não deverá ser utilizado como custo de formulação de NPK ou PK.
- A Rwanda Fertiliser Company deverá ser adicionada como referência de planta dedicada de blending, com capacidade e CAPEX divulgados para a mesma fronteira industrial.

No *downstream*, MOP ou SOP é misturado com fontes de nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes. Para comparar plantas de formulação, o indicador ideal é o custo de conversão, excluindo o valor das matérias-primas adquiridas. No entanto, as referências em geral combinam a compra de nutrientes com mistura, ensaque, armazenagem e distribuição.

Economia Circular do potássio utiliza principalmente fluxos municipais, industriais e agroindustriais. As fontes secundárias incluem cinzas de incineração e biomassa, vinhaça, digestatos, dejetos animais, águas residuais e salmouras industriais.

O fluxo industrial compreende coleta e caracterização da corrente; concentração, desaguamento, secagem ou preparação da cinza; lixiviação ou lavagem; separação de metais e outras impurezas; evaporação, precipitação ou cristalização; e produção de KCl, K_2SO_4 ou fertilizante multinutriente.

A aplicação direta de vinhaça, digestato ou cinza deverá permanecer separada da recuperação de sais purificados. Esses produtos possuem diferenças de teor de K_2O , disponibilidade agrônômica, umidade, contaminantes, dosagem e custo logístico.

4a. Benchmarking para Economia Circular A: Mineração urbana e preparação de correntes secundárias

Não há referências para criar uma tabela econômica específica para coleta e preparação das correntes secundárias. Nos projetos públicos identificados, recebimento, concentração, secagem, manuseio de cinzas e recuperação química estão integrados, sem CAPEX ou OPEX segregados para o estágio 4a.

Repetir o investimento integral no estágio de preparação e novamente na recuperação dos sais produziria dupla contabilização. Cada empreendimento deverá aparecer apenas uma vez no estágio 4b, com indicação da capacidade de alimentação e da capacidade do produto, quando ambas estiverem disponíveis.

Para futuros projetos, a mineração urbana deverá informar massa e umidade da alimentação, teor de K ou K_2O , contaminantes, distância de transporte, custos de concentração ou secagem e percentual da infraestrutura existente aproveitado.

Tabela 72. Benchmarking para Economia Circular B: Recuperação e produção de potássio secundário

Benchmark	Tipo	Escala	OPEX	CAPEX	Intensidade
Ash2Salt Högbyp, Suécia	Lavagem e tratamento de cinzas volantes de incineração, com recuperação de KCl, NaCl e CaCl ₂	130 ktpa de cinza alimentada; 3,5 ktpa de KCl seco; 7 ktpa de NaCl; 32 ktpa de solução de CaCl ₂	Não disponível	Superior a US\$ 55 M	Superior a US\$ 423/tpa de alimentação; superior a US\$ 15,7 mil/tpa de KCl
Sustainable Potassium, Suécia	Planta-piloto para recuperação de potássio de cinza de cama de frango e produção de K ₂ SO ₄ e KCl	Escala-piloto; capacidade comercial não disponível	Não disponível	Não disponível	n/a
UFSCar: rota para vinhaça e cinza de bagaço, Brasil	Rota de pesquisa para recuperação de nutrientes da vinhaça utilizando cinza de bagaço de cana	Escala de pesquisa; capacidade industrial não disponível	Não disponível	Não disponível	n/a

Fonte:⁸²

- Ash2Salt: a instalação opera desde 2023 e utiliza cinza volante como alimentação. O KCl recuperado possui pureza reportada de 99,1%. O investimento também produz NaCl e CaCl₂ e trata resíduos que, de outra forma, exigiriam disposição. A intensidade por KCl atribui todo o investimento ao produto potássico e deverá ser apresentada junto com a intensidade por capacidade de alimentação.
- Sustainable Potassium: o projeto-piloto avalia a extração de potássio de cinzas de cama de frango para produção de K₂SO₄ e KCl com pureza superior a 99%. Enquanto capacidade comercial, CAPEX e OPEX não estiverem disponíveis, deverá permanecer como referência tecnológica.
- UFSCar: a pesquisa brasileira combina cinza de bagaço de cana e vinhaça para recuperar nutrientes e produzir fertilizante rico em potássio e nitrogênio. O desenvolvimento deverá permanecer como referência tecnológica nacional, sem indicador de intensidade de capital.

82 Disponíveis em:

<https://newsroom.ragnsells.com/posts/pressreleases/ragn-sells-invests-50-million-eur-on-resource>
<https://www.easymining.com/about/news/articles-inspiration/ragn-sells-invests-in-ash2salt-plant/>
<https://www.phosphorusplatform.eu/activities/p-recovery-technology-inventory?id=2265&view=article>
https://www.easymining.com/globalassets/easymining.com/documents/positions-papers/easymining-on-eu-taxonomy_final.pdf
<https://newsroom.easymining.com/posts/pressreleases/new-process-enables-sustainable-potassium-sal>
<https://agencia.fapesp.br/scientists-use-ash-generated-by-burning-of-sugarcane-bagasse-to-recover-nutrients-from-vinasse/53839>

No *downstream*, MOP ou SOP é misturado com fontes de nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes. Para comparar plantas de formulação, o indicador ideal é o custo de conversão, excluindo o valor das matérias-primas adquiridas. No entanto, as referências em geral combinam a compra de nutrientes com mistura, ensaque, armazenagem e distribuição.

Não foram identificados OPEX públicos suficientemente segregados e comparáveis para os projetos selecionados. Para futuros empreendimentos, os custos deverão ser apresentados separadamente em:

- Custo de preparação da alimentação: coleta, transporte, bombeamento, concentração, desaguamento, secagem, incineração, moagem e manuseio de cinzas ou resíduos.
- Custo de conversão: lavagem, lixiviação, reagentes, remoção de metais e impurezas, evaporação, cristalização, filtração, secagem, energia, mão de obra, manutenção e tratamento de efluentes.
- Custo caixa total: aquisição ou recebimento da alimentação; preparação; conversão; dedução de tarifas de recebimento, custos evitados de disposição e créditos de NaCl, CaCl₂, fósforo, nitrogênio e outros produtos recuperados.

As tarifas recebidas pelo tratamento dos resíduos, os incentivos públicos e os custos evitados de disposição deverão ser apresentados separadamente. Não deverão ser incorporados ao CAPEX ou apresentados como redução do OPEX sem reconciliação. O balanço de massa deverá informar a quantidade de potássio contida na alimentação, a recuperação do elemento, a massa do produto, o teor de K₂O equivalente, a pureza, a presença de contaminantes e a disponibilidade agronômica.

A cadeia brasileira de referência deverá continuar separando depósitos evaporíticos, mineração por dissolução, salmouras naturais, rocha potássica e formulação de fertilizantes. Os produtos MOP, SOP e fertilizantes de aplicação direta possuem diferentes teores de K₂O equivalente, processos, mercados e estruturas de custos. Usualmente, os fertilizantes industrializados químicos são destinados às grandes propriedades, enquanto os remineralizadores são aplicados em propriedades menores e com restrição de cobertura de longas distâncias em razão do custo de transporte.

Taquari deverá permanecer como referência histórica brasileira, pois o ativo foi vendido em novembro de 2025. Autazes permanece como principal projeto nacional de MOP em desenvolvimento e concluiu sua engenharia FEED em 2026, mas ainda não apresentou uma nova base econômica completa. Muga deverá ser apresentado como projeto suspenso, sem capacidade futura confirmada. Jansen deverá utilizar os investimentos atualizados de US\$ 8,4 B no Estágio 1 e US\$ 6,9 B no Estágio 2, com capacidade combinada de 8,5 Mtpa. Tugaskes deverá manter a base econômica de 250,82 ktpa separada da atualização técnica de 2026, que considera pelo menos 500 ktpa e ainda não possui CAPEX ou OPEX revisados. Mackay deverá permanecer apenas como referência histórica de SOP, pois a retirada do projeto e a reabilitação das áreas estão em andamento. A rota brasileira de silito glauconítico deverá permanecer independente das análises de MOP e SOP. Seu menor CAPEX por tonelada de

produto está associado a um fertilizante com menor teor de K_2O , liberação agronômica distinta e maior massa transportada por unidade de nutriente.

No *downstream*, o custo do segmento Mosaic Fertilizantes não representa custo isolado de blending. A Rwanda Fertiliser Company deverá ser incluída como referência de planta dedicada de mistura com capacidade e CAPEX divulgados.

Na Economia Circular, Ash2Salt é a principal referência industrial identificada com capacidade e investimento divulgados. Sustainable Potassium e a pesquisa da UFSCar permanecem como referências tecnológicas. A aplicação direta de resíduos deverá permanecer separada da produção de KCl ou K_2SO_4 purificados.

Para futuros projetos brasileiros de potássio secundário, os indicadores mínimos deverão incluir origem da corrente, massa anual de alimentação, umidade, teor de K ou K_2O , recuperação por etapa, composição e pureza do produto, contaminantes, disponibilidade agronômica, consumo de água, reagentes e energia, custo de preparação, custo de conversão, tarifas de recebimento, custos evitados, créditos de coprodutos, utilização efetiva da capacidade, capital de giro e fronteira exata do CAPEX.

A análise dos indicadores apresentados permite identificar os principais gargalos e oportunidades para o adensamento da cadeia de valor no contexto brasileiro.





3. CADEIA DE VALOR DOS MCE

A cadeia de valor dos minerais críticos e estratégicos organiza-se em quatro elos. O *upstream* compreende a lavra e o beneficiamento, que entregam concentrados minerais. O *midstream* abrange a transformação mineral, incluindo o refino, metalurgia, produção de óxidos, sais e demais compostos intermediários. O *downstream* reúne a manufatura avançada de, por exemplo, ímãs, células de bateria, ânodos, cátodos e componentes. O último estágio é a recuperação (recovery), a partir do qual a mineração urbana ganha espaço, permitindo a recuperação e reinserção de materiais secundários em cadeias produtivas, fechando o ciclo de materiais (XAVIER e LINS, 2018; XAVIER *et al.*, 2023).

O valor agregado e a intensidade tecnológica crescem ao longo da cadeia, e com eles a geração de emprego qualificado: a transformação mineral costuma gerar de dez a vinte vezes mais empregos por unidade de produção do que a lavra-beneficiamento (IBRAM, 2024a). A exportação de concentrados transfere ao importador as atividades de maior valor, as relações comerciais e as oportunidades de inovação. O principal gargalo brasileiro localiza-se no *midstream*: a ausência de capacidade instalada de refino e de separação obriga o país a exportar concentrado e reimportar produtos transformados, o que define o foco do adensamento de cadeias.

Figura 30. Cadeia de valor dos minerais críticos e estratégicos (U/M/D/R) e a progressão de valor agregado.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

O grau de integração dos elos da cadeia de valor define o nível de maturidade da cadeia. A título de exemplo, a cadeia de valor de terras raras apresenta importantes especificidades. Mindreau (2025) sustenta que as terras raras podem operar como alavanca de política industrial, desde que o país avance da extração para a separação, a metalurgia e a fabricação de ímãs, exatamente o elo em que se concentra o domínio chinês e, por isso, o de maior valor estratégico.

As empresas de capital australiano Viridis Mining & Minerals (Projeto Colossus) e Meteoric (Projeto Caldeira) operam com capacidade produtiva anual de 2.920 kg⁸³ e 455 kg⁸⁴ de carbonato misto de terras raras (MREC), respectivamente. Ambas operam atualmente com plantas piloto e possuem previsão de início das atividades de produção comercial de óxidos em 2028.

A única empresa com produção de ETRs magnéticos fora da Ásia é a mineradora Serra Verde, localizada em Goiás e recentemente adquirida pela empresa americana USA Rare Earth⁸⁵. Com capacidade atual de 100 toneladas anuais de óxidos de terras raras, a empresa iniciou a produção comercial em 2024 e tem a meta de produção ampliada para 6.400 toneladas anuais de óxidos de terras raras até o final de 2027⁸⁶, prioritariamente Nd, Pr, Tb e Dy.

Estas empresas atuam na cadeia de valor de terras raras e buscam avançar no curto prazo para atingir produtos de maior valor agregado, como os óxidos de terras raras com o adensamento da cadeia produtiva no elo *midstream*. No entanto, a especialização da cadeia produtiva para avançar do *midstream* para o *downstream* parece ainda não fazer parte da estratégia para esta cadeia de valor. Padrão semelhante se observa para a estrutura produtiva de outros minerais críticos e estratégicos.

Compreender o potencial de oferta e as demandas que se apresentam pode indicar as cadeias minerais prioritárias para o direcionamento de investimentos, direcionamento de ações e melhor estruturação de regulamentações. Regulamentações amplas e genéricas podem cumprir requisitos-chave para a governança no setor mineral, mas dificilmente atenderiam às especificidades geoeconômicas e aos requisitos técnicos dos diferentes minerais críticos e estratégicos.

Desta forma, o presente estudo propõe a análise das cadeias prioritárias para a gestão dos MCE à luz das estratégias nacionais, segundo os planos governamentais que contemplam a transição energética, reindustrialização, infraestrutura, crescimento econômico, adaptação às mudanças climáticas e economia circular, bem como os requisitos para a segurança alimentar, segurança e soberania nacional e transformação digital.

⁸³ <https://revistamineracao.com.br/2026/05/26/viridis-produz-primeiro-carbonato-misto-de-terras-raras-em-mg/>

⁸⁴ <https://revistaminerios.com.br/projeto-caldeira-de-terras-raras-da-meteoric-deve-comecar-obras-esse-ano/>

⁸⁵ <https://www.cnnbrasil.com.br/infra/serra-verde-vira-peca-central-da-ofensiva-ocidental-contra-dominio-chines/>

⁸⁶ <https://svpm.com.br/br/operacao/>

3.1 Cadeias prioritárias para a gestão dos MCE

O processo decisório com vistas a integrar a cadeia de valor mineral exige conhecimento sobre o potencial mineral (recursos, reservas e teores), capacidade produtiva (capacidade instalada, capacidade produtiva e custo de produção), infraestrutura dedicada (água, energia, vias de acesso para circulação de insumos e escoamento da produção), e disponibilidade de mão de obra especializada.

Cada cadeia produtiva mineral possui especificidades que podem ou não favorecer os investimentos e a formação de demanda, bem como ser influenciada por movimentações geopolíticas. Desta forma, compreender as especificidades das cadeias produtivas possibilita o melhor direcionamento de estratégias, investimentos e políticas públicas.

A reindustrialização brasileira, estruturada a partir do Plano Nova Indústria Brasil (NIB), situa a transição energética e a gestão dos recursos minerais estratégicos entre suas prioridades (BRASIL, 2024a). A descarbonização, exemplificada pelo Plano Clima (2024-2035), propõe eixos de ação focados na mitigação e na adaptação para a eliminação dos gases de efeito estufa (GEE) até 2050. Em geral, os sistemas de energia e de mobilidade transferem a pressão da demanda por combustíveis fósseis para um conjunto de minerais que viabilizam a produção de baterias, ímãs permanentes, células fotovoltaicas e redes elétricas. O plano NIB representa a principal iniciativa para o desenvolvimento do parque industrial nacional e, em suas seis missões, são delineadas as ações que priorizam os minerais estratégicos e a circularidade para o setor.

A produção mineral brasileira (por exemplo: minério de ferro, nióbio, alumínio e grafita) ocupa posição de destaque na América Latina e no mundo, mas ainda há espaço para a especialização do processamento de MCE de importância econômica e tecnológica, como lítio, níquel e terras raras. A esse potencial somam-se as lógicas do *friendshoring*, do *nearshoring* e, especialmente, do *powershoring*⁸⁷ e a oferta secundária da mineração urbana, tratada na seção 1.4. A conversão dessa dotação em vocação industrial, contudo, depende de políticas públicas adequadas, investimento coordenado e continuidade institucional.

A lista brasileira de minerais estratégicos, todavia, deriva de critérios qualitativos e o impacto na balança comercial, e não de uma avaliação quantitativa de criticidade calibrada à realidade nacional, representando uma importante lacuna metodológica que abre espaço para a aplicação das abordagens consolidadas internacionalmente (GRAEDEL *et al.*, 2015; SCHRIJVERS *et al.*, 2020) à priorização de cadeias, objeto da análise de criticidade prevista neste estudo.

Desta forma, o estabelecimento de uma estratégia que priorize os minerais críticos e estratégicos com o direcionamento de investimentos, consolidação de parcerias e fortalecimento de políticas públicas pode consolidar o protagonismo do país nas próximas décadas.

87 *Powershoring*: atração de plantas eletrointensivas para regiões com energia limpa, abundante e competitiva (IBRAM, 2025).

A partir de evidências do risco de suprimento de minerais considerados estratégicos para processos produtivos, diferentes nações passaram a estruturar não apenas as listas com a categorização de minerais e materiais críticos, mas também desenvolver metodologias para definir a importância econômica e o grau de criticidade. Um primeiro estudo realizado pela Comissão Europeia em 2008⁸⁸ trouxe os elementos-chave que norteariam as discussões sobre o uso sustentável dos recursos que seguem sendo pauta de vários governos quase duas décadas depois. Nesse documento são estabelecidos três pilares como base para a gestão dos recursos, promovendo o crescimento econômico e a geração de empregos (Tabela 73).

Figura 31. Pilares para a definição da primeira lista europeia de matérias-primas (EC, 2008).

POLÍTICA DE MATÉRIAS-PRIMAS

Os três pilares da estratégia de matérias-primas

PILAR 1 Acesso a matérias-primas nos mercados mundiais em condições não distorcidas	PILAR 2 Promover o fornecimento sustentável de matérias-primas provenientes de fontes europeias	PILAR 3 Reduzir o consumo de matérias-primas virgens na União Europeia
● Promover uma diplomacia para a gestão das matérias-primas como forma de garantir acesso aos recursos considerando as políticas externas. ● Coordenação da gestão de parcerias estratégicas, cooperação internacional e dos diálogos políticos com outros países e economias emergentes com base no interesse mútuo. ● Acesso a materiais primários e secundários como prioridade para a política de comércio. ● Definição de mecanismos de governança estratégica promovendo o fortalecimento dos países membros. ● Promover um ambiente de investimento sólido que ajude a aumentar a oferta. ● Promover a gestão sustentável de matérias-primas.	● Definir as condições-chave para viabilizar o suprimento sustentável de materiais a partir de depósitos europeus, considerando acesso à terra. ● Viabilizar processos de licenciamento para reduzir o tempo entre a descoberta de depósitos, a extração e a efetiva produção (estimado entre 8 e 10 anos). ● Estabelecimento de base de dados de depósitos minerais a partir da atuação do serviço geológico como subsídio à indústria extrativa. ● Estabelecer procedimentos para a extração respeitando áreas classificadas como Natura 2000. ● Promover projetos de pesquisa com foco na extração e transformação mineral para recursos onshore e offshore (incluindo mineração em águas profundas), incluindo o desenvolvimento de novas tecnologias. ● Definição de fundo para política de coesão para apoiar pesquisas, inovação e negócios. ● Estabelecimento de programas de formação para suprir a escassez de mão de obra qualificada, por exemplo, a partir do programa Erasmus Mundus Minerals and Environmental Programme (2009–2013), com foco na formação de mestres e doutores.	● Incentivar a eficiência na gestão de recursos e processos produtivos eco-inovadores. ● Reduzir a dependência de matérias-primas e incentivar o uso otimizado e a reciclagem. ● Fomentar soluções de design para produtos eficientes em aplicação de recursos. ● Ampliar o uso de materiais secundários para garantir a segurança do fornecimento e eficiência energética. ● Estabelecer condições justas e sustentáveis na relação com outros países em relação ao tratamento de resíduos. ● Implementação e elaboração de legislação relevante sobre reciclagem, considerando o não-resíduo (material secundário a ser reinserido na cadeia produtiva). ● Incentivar o reuso e reciclagem de produtos e materiais por meio de mecanismos de mercado, regulamentação, rotulagem, financiamento, certificação, transferência de tecnologia e cooperações internacionais.

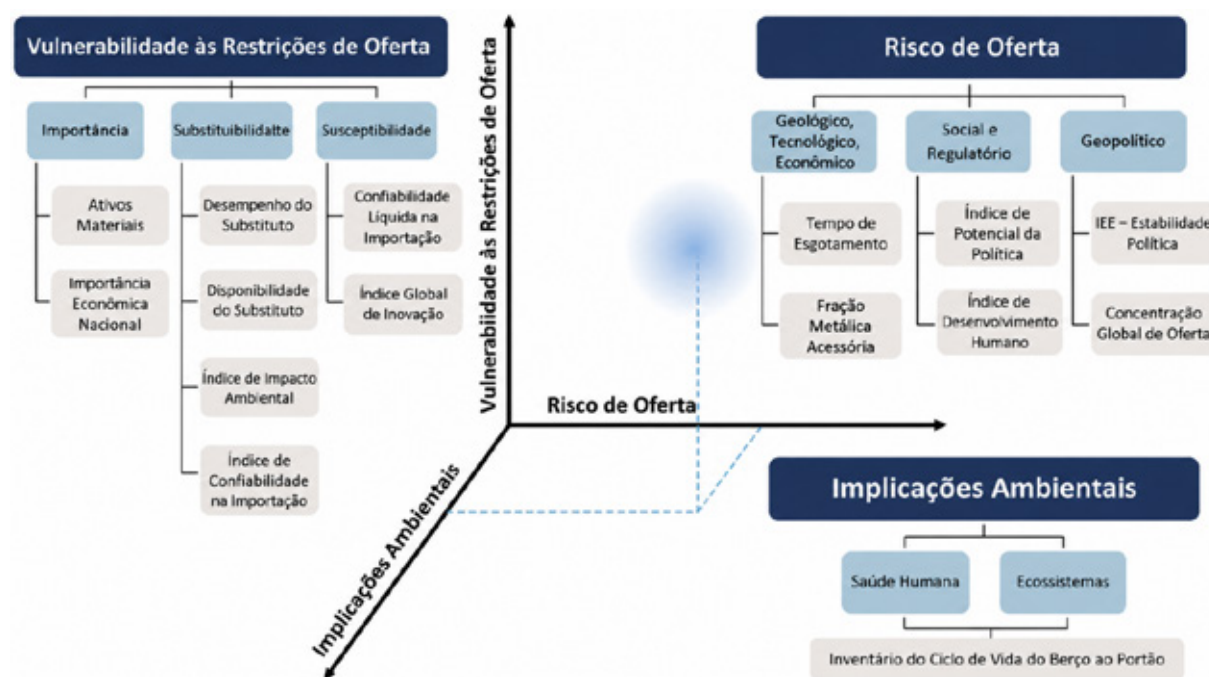
Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

⁸⁸ <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:en:PDF>

Em seguida, foi formado o grupo de trabalho ad hoc para a definição da primeira lista europeia de materiais críticos em 2010⁸⁹, com a definição de 14 minerais. Como critérios foram estabelecidos o risco de suprimento e a importância econômica, avaliando como indicadores a concentração da produção, baixa substituíbilidade e baixas taxas de reciclagem em relação à demanda atual e projeção para 2030. Nessa análise, a China produz 10 minerais classificados como críticos para a Europa e a África do Sul produz 6 desses minerais. As listas seguiram sendo publicadas pela Europa e a quinta e mais recente listagem foi publicada em 2023 com 34 minerais críticos e estratégicos listados⁹⁰.

O estudo de Graedel, Nassar e Reck (2015⁹¹) serviu como referência para a determinação da criticidade de materiais a partir de três aspectos: a impossibilidade de substituição do material; a disponibilidade em maior parte ou exclusivamente como subprodutos; e aqueles que são utilizados em pequenas quantidades para aplicações altamente especializadas. A análise desses aspectos resultou na definição de três critérios para a determinação da criticidade: (i) vulnerabilidade à restrição de oferta; (ii) risco de suprimento; (iii) implicações ambientais (Figura 32).

Figura 32. Metodologia de análise de criticidade (Graedel, Nassar e Reck (2015).



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

⁸⁹ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/memo_10_263

⁹⁰ https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en

⁹¹ <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1500415112>

Este estudo americano trouxe um novo horizonte à determinação do nível de criticidade e o conceito avançou na última década, sendo incorporado aos estudos realizados pelo Joint Research Center (JRC) europeu a partir de 2017. Mais recentemente, o serviço geológico Britânico (British Geological Survey – BGS) publicou uma metodologia diferenciada (Mudd *et al.*, 2024⁹²) para a definição de criticidade para um amplo conjunto de materiais.

Figura 33. Análise de criticidade de matérias-primas candidatas (círculos com preenchimento preto indicam dados confiáveis; círculos com preenchimento azul indicam minerais industriais com dados confiáveis; círculos com preenchimento branco indicam baixa confiabilidade)



Fonte: Mudd *et al.*, 2024.

92 Mudd, G.;Josso, P.;Shaw, R.;Luce, A.;Singh, N.;Horn, S.;Bide, T.;Currie, D.;Elliott, H.;Grant, H.;Halkes, R.;Idoine, N.;Mitchell, C.;Watkins, I.;Price, F.;Petavratzi, E.. 2024UK 2024 criticality assessment.Nottingham, UK, British Geological Survey, 313pp. (OR/24/O59). <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/539735/1/OR24O59.pdf>

Conforme apresentado na Figura 33, os minerais foram categorizados conforme o grau de criticidade para uma lista prévia de materiais candidatos separados em elementos individuais, terras raras (17 elementos) e minerais industriais. A análise foi realizada a partir de quatro grupo de indicadores: (i) indicadores de concentração da produção (PCI); complementariedade (C); concentração do comércio global (GTC), e taxas de reciclagem.

A concentração da produção levou em conta os três países maiores produtores e os respectivos market shares e foi ponderada a partir do indicador de ESG, calculado a partir de índices como IDH, índice de desempenho ambiental (EPI) e o índice de governança ambiental do Banco Mundial (WGI), bem como considerou o índice HHI⁹³ modificado.

O fator complementariedade considera a Fração Metálica Associada (CMF⁹⁴), métrica usualmente empregada em economia mineral e avaliação de risco em cadeias de suprimento, considerando a presença de coprodutos ou subprodutos no processamento de um metal primário. Por exemplo, o cobalto pode resultar da mineração de níquel e cobre, enquanto o telúrio pode ser subproduto do refino de ouro ou cobre (Mudd *et al.*, 2024).

A concentração do comércio global foi mensurada a partir dos dados de comércio internacional de bases de dados oficiais como Comtrade, e UK Trade Information (UKTI), identificando-se os respectivos códigos do sistema harmonizado (HS).

Por fim, as taxas de reciclagem foram consideradas como fontes secundárias de suprimento com potencial forma de redução do risco de suprimento, reduzindo a vulnerabilidade da dependência de importação. Os resultados foram normalizados em uma escala de 1 a 10, na qual os minerais com índice superior a 4 foram considerados críticos (Figura 33).

Em razão da ausência de uma metodologia consolidada para a definição dos minerais críticos e estratégicos, listados a partir da Resolução nº2 de 2021 do MME, verifica-se uma importante lacuna nos instrumentos regulamentadores que pode comprometer os processos decisórios para o setor. Desta forma, este estudo apresenta uma proposta metodológica baseada na metodologia aplicada pelo BGS para a análise e identificação dos minerais críticos e estratégicos brasileiros, conforme apresentado a seguir.

⁹³ <https://vcde.cade.gov.br/cadethes/pt-BR/page/indiceherfindahlhirschman?clang=pt-br>

⁹⁴ Mammadli *et al.*, 2026. Global evolution and methodologies of critical minerals assessment: A comprehensive multidimensional analysis of impact factors. Resources Policy. V. 119, 10.1016/j.resourpol.2026.105982



4. METODOLOGIA

A proposta metodológica teve como base a análise descritiva de um conjunto de minerais críticos e estratégicos. É importante considerar que os argumentos que motivaram a estruturação de índices e indicadores para a definição de criticidade para o Reino Unido (BGS, 2014) incorporaram os requisitos e estratégias próprios para a gestão dos minerais críticos e estratégicos. A consolidação da metodologia deste estudo teve como fundamento os aspectos analisados em estudos anteriores (IBRAM, 2024; IBRAM, 2025; CEBRI, 2025), bem como os projetos de lei referentes aos minerais críticos e estratégicos.

4.1 Perfil das empresas brasileiras na produção mineral

A análise das empresas benchmark que atuam no Brasil, permite concluir que a liderança na exportação de commodities pode dar lugar à exportação de produtos de maior valor agregado a partir da especialização da produção. Atualmente, alguns minerais já ocupam esse espaço, como é o caso do ferronióbio e do óxido de nióbio, que são exportados com maior valor agregado para países europeus, asiáticos e Estados Unidos. Dados recentes apontam que o Brasil exportou em 2025 mais de US\$ 11 bilhões em minerais críticos e quase 38% tiveram como destino a União Europeia⁹⁵. O cobre foi o mineral de maior destaque nas exportações, com 52,3% do total destinado à Europa.

O Brasil domina a produção mundial de nióbio e os maiores volumes comercializados são da empresa multinacional brasileira CBMM, empresa familiar de capital fechado que possui participação de 15% a partir de um consórcio asiático com investidores de empresas públicas e privadas do Japão e da Coreia do Sul. Localizada em Minas Gerais, mantém escritórios regionais na China, Holanda, Singapura, Suíça e Estados Unidos, com capacidade logística para atender clientes em diferentes continentes em menos de 72 horas⁹⁶. Com 70

⁹⁵ <https://forbes.com.br/forbes-money/2026/07/brasil-uniao-europeia-minerais-criticos/>

⁹⁶ <https://valor.globo.com/conteudo-de-marca/cbmm/noticia/2026/04/30/cbmm-aposta-em-inovacao-para-ampliar-uso-de-niobio-na-transicao-energetica.ghtml>

anos de atuação, a empresa reconhece a importância da inovação para o setor e, reflexo desta cultura, são os investimentos destinados pela empresa. Em 2024 a CBMM investiu R\$ 270 milhões em PD&I.

A empresa RHI Magnesita, também uma multinacional brasileira que atua no país há 87 anos, desde 2017 passou pela fusão com a empresa austríaca RHI, alcançou a segunda posição na produção mundial de magnesita, minério de importância na fabricação de produtos refratários que se destacam quanto à aplicação em processos que exigem altas temperaturas (acima de 1.200°C), como processos siderúrgicos, indústria de aço, cimento, vidro, etc.

Tanto a CBMM quanto a RHI Magnesita são exemplos de empresas brasileiras que iniciaram suas operações no período de industrialização nacional e enfrentaram desafios econômicos nas décadas de 1980 e 1990, como também passaram por processo de adequação às normas e legislações ambientais que foram estruturadas ao longo da década de 1990 e dos anos 2000. Esse processo resultou em uma curva de aprendizado que contribuiu para o fortalecimento da economia e a industrialização do setor mineral.

Setores como o alumínio e o lítio, por exemplo, representam nichos de produção bastante distintos e característicos. Apesar de também serem fundadas por grupos brasileiros, hoje se encontram gerenciadas por grupos estrangeiros em parceria ou em sua totalidade.

O alumínio, assim como o minério de ferro e o cobre, possui infraestrutura de grande escala para o processamento de grandes volumes de bauxita e com alto consumo energético e alta demanda por recursos hídricos, mas tem alto potencial de circularidade com a recuperação de valor a partir da prática da reciclagem. A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), localizada em São Paulo, iniciou suas atividades na década de 1950 pelo grupo Votorantim, hoje atua em joint venture entre a empresa chinesa Chinalco e Rio Tinto (anglo-australiana), com capital aberto e listada na bolsa brasileira. A CBA atua com empresas subsidiárias especializadas em reciclagem do alumínio, a Metalex e a Alux. Essas empresas processam sucatas industriais como esquadrias e peças automotivas, providenciando a logística e fundição do material, visando alcançar 50% dos insumos produtivos como material reciclado. A exemplo da empresa Latasa, que configura hoje como a maior empresa de reciclagem do país, processando mais de 300 kt de alumínio reciclado (alumínio verde) anualmente⁹⁷.

A Companhia Brasileira do Lítio (CBL), localizada em Minas Gerais, é uma empresa brasileira de capital fechado, fundada no final da década de 1980 como sociedade anônima. Iniciou suas atividades em 1991 atendendo os setores de vidros, cerâmicas, medicamentos e o setor automotivo com a fabricação de graxas. Atualmente, dois terços de sua produção são exportados para a produção de baterias de lítio, com uma produção anual de 1,5 mil toneladas de carbonato de lítio equivalente (LCE). Entre os anos de 2020 e 2022, o lucro líquido da empresa aumentou de R\$ 30,7 milhões para R\$ 357,9 milhões⁹⁸, alcançando um faturamento de R\$ 668 milhões em 2022. Atuando prioritariamente no *upstream* com a oferta

⁹⁷ <https://gruporeciclabr.com.br/latasa-reciclagem/>

⁹⁸ <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/companhia-brasileira-de-litio-multiplica-faturamento-por-cinco>

de concentrado de lítio, a empresa tem avançado também na produção de carbonato de lítio e hidróxido de lítio no estágio *midstream* da cadeia de valor.

Em fevereiro de 2026 a CBL anunciou a venda de um terço (33%) de sua planta de refino em Divisa Alegre (MG) para a empresa indiana Altmin, que fabrica precursores para as baterias de lítio. A parceria pretende possibilitar a expansão da capacidade produtiva de 2 kt/ano para 6 kt/ano e aumentar a possibilidade de especialização da produção no médio prazo.

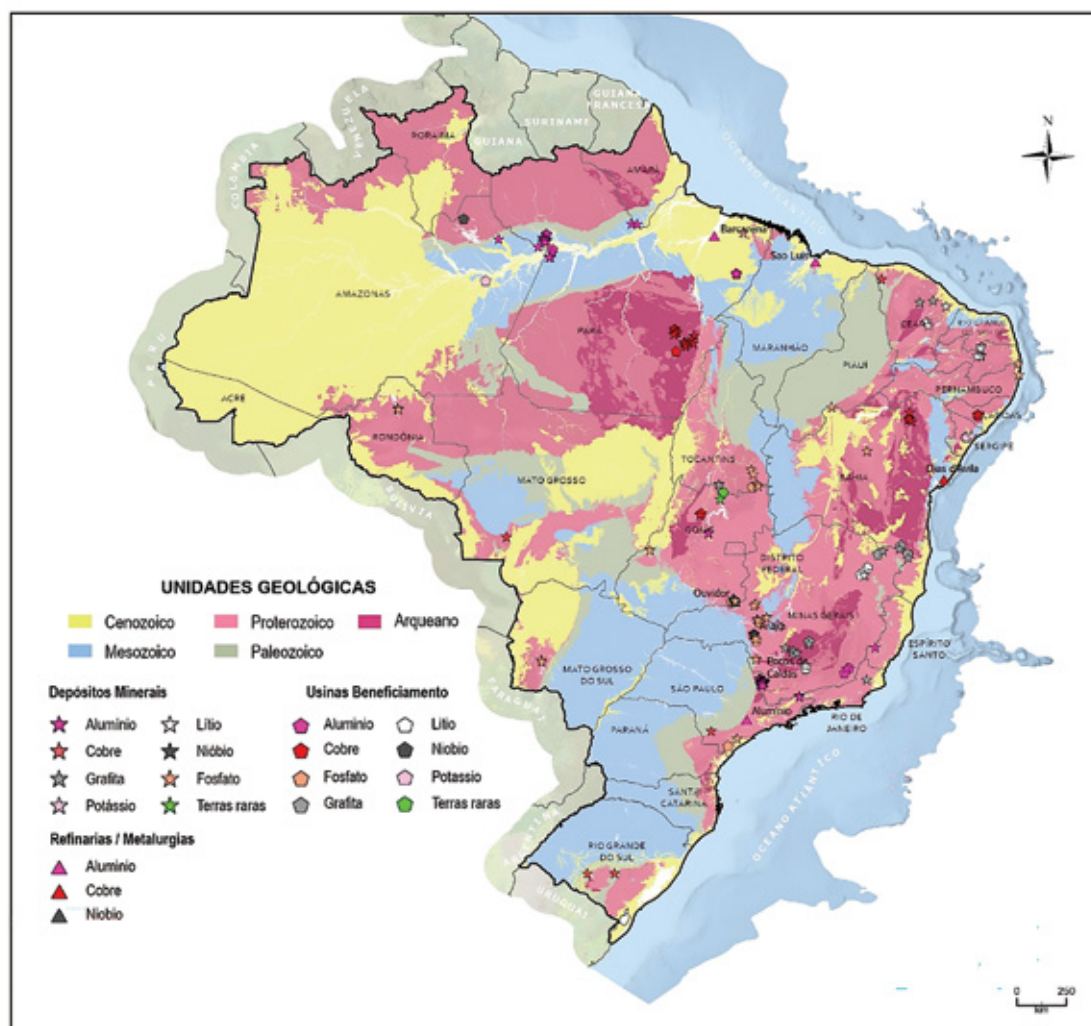
4.2 Mapeamento da cadeia de valor

A distribuição dos depósitos minerais brasileiros relacionados às oito commodities analisadas neste estudo reflete a ampla diversidade geológica do território nacional e a concentração das mineralizações em províncias Minerais e distritos minerais específicos consagrados na literatura (Figura 1). Os depósitos de alumínio apresentam maior expressão na região amazônica, especialmente no estado do Pará, além de ocorrências e operações importantes no Sudeste. Os depósitos de cobre e nióbio destacam-se principalmente no Pará, em Goiás e em Minas Gerais, onde se encontram alguns dos principais empreendimentos minerais do país. O lítio e a grafita possuem forte concentração no leste de Minas Gerais e em áreas do Nordeste, embora novas ocorrências e projetos estejam sendo avaliados em outras regiões. Fosfato, potássio e terras raras apresentam distribuição mais ampla e estão associados a diferentes contextos geológicos nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste. Esse padrão evidencia que as etapas iniciais das cadeias produtivas — pesquisa mineral, avaliação de recursos, lavra e produção de minério — são diretamente condicionadas pela dotação geológica de cada região.

As usinas de beneficiamento mantêm, de modo geral, estreita relação espacial com os depósitos e as áreas de lavra. Essa proximidade reduz o transporte de grandes volumes de minério bruto e permite a produção de concentrados com características adequadas às etapas seguintes de processamento. As refinarias e unidades metalúrgicas, por outro lado, apresentam distribuição mais seletiva, pois sua localização depende não apenas da proximidade das fontes minerais, mas também da disponibilidade e do custo da energia, da infraestrutura de transporte, do acesso a portos, da oferta de insumos, da proximidade dos mercados consumidores e da existência de complexos industriais consolidados.

A configuração espacial apresentada mostra que as cadeias minerais brasileiras se encontram em diferentes níveis de maturidade. Cadeias como as de bauxita–alumínio, cobre, fosfato e nióbio possuem operações consolidadas de mineração e beneficiamento e, em determinados casos, também contam com etapas relevantes de transformação metalúrgica. Em contraste, as cadeias de lítio, grafita, potássio e terras raras, embora sustentadas por recursos geológicos expressivos e por projetos em expansão, ainda apresentam limitações produtivas ou lacunas nas etapas industriais de maior complexidade. Assim, a integração entre mineração, beneficiamento, processamento químico, metalurgia e fabricação de produtos de maior valor agregado ocorre de forma desigual entre as commodities e entre as diferentes regiões do país.

Figura 34. Distribuição espacial dos principais depósitos minerais e das unidades de beneficiamento, refino e transformação associadas a oito cadeias produtivas minerais no Brasil.



Fonte:

Nesse estudo são analisadas, de forma transversal, 20 tipologias minerais que compõem a lista brasileira de MCE, conforme apresentado na Tabela 75. A seguir, é detalhada a metodologia para as oito cadeias de valor minerais priorizadas nesse estudo.

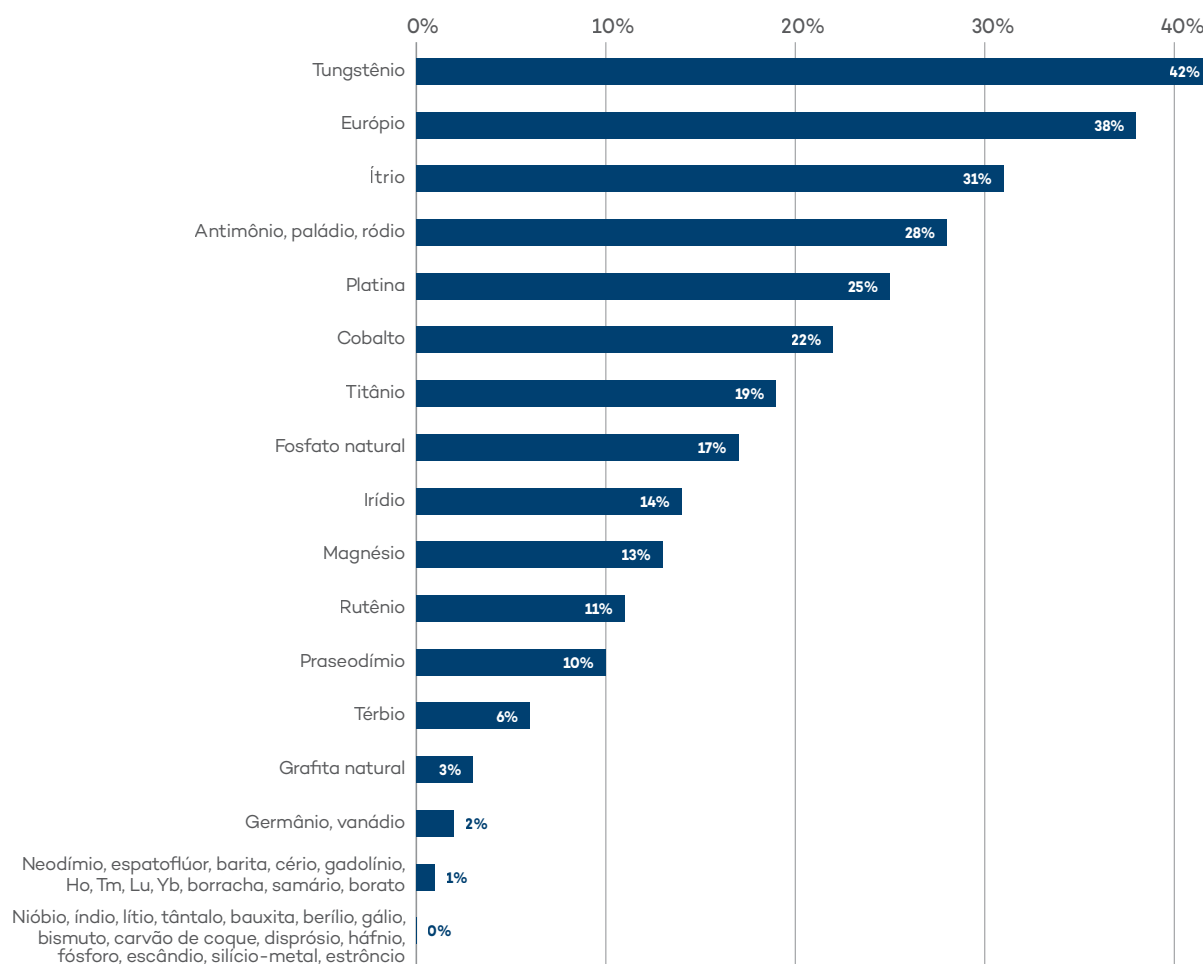
4.2.1 Classificação dos MCE

Mais de 20 países e o bloco europeu possuem regulamentações para a definição da lista oficial de minerais críticos e estratégicos (MCE) (IBRAM, 2025). No entanto, os critérios para a definição desses minerais variam entre os países e os critérios que são referenciados com mais frequência são a importância econômica e o risco de suprimento.

Os Estados Unidos e os países europeus, de modo geral, direcionam esforços para reduzir o risco da quebra do suprimento de minerais críticos e estratégicos por meio de instrumentos regulatórios. A estratégia posiciona-se prioritariamente no elo *upstream* da cadeia de valor. Da mesma forma, a mitigação do impacto decorrente da criticidade pode se dar a partir da consolidação de boas relações políticas e comerciais (*friendshoring*) ou da proximidade geográfica que viabilize rotas comerciais eficientes e sustentáveis (*nearshoring*).

Uma das alternativas priorizadas pela Europa para a garantia do suprimento é a diversificação do suprimento a partir de novas relações comerciais ou a busca de fontes de materiais secundários. A taxa de reciclagem tem sido avaliada para diferentes materiais e produtos. No entanto, a maior parte dos minerais possui limitações técnicas ou operacionais e as taxas de reciclagem não ultrapassam 42%, conforme estudo da Comunidade Europeia (Figura 35).

Figura 35. Contribuição da recuperação de minerais para atender a demanda de materiais na Europa (taxa de reciclagem de produtos)⁹⁹



Fonte: (EC, 2020).

⁹⁹ (EC, 2020) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>

Por outro lado, os países que possuem dotação mineral, em sua maioria países emergentes ou em desenvolvimento (BRICS, Indonésia, Chile, Argentina, Congo), posicionam a criticidade nos elos *midstream* e *downstream* da cadeia de valor, em razão da baixa capacidade produtiva. Países como Indonésia, Zimbábue, Gabão e Malásia buscam estabelecer planos governamentais para desencorajar a exportação dos concentrados minerais e estimular a indústria nacional.

Desta forma, torna-se evidente que os aspectos motivadores para a classificação dos MCE estão fortemente vinculados a indicadores como dotação mineral, capacidade produtiva, nível de integração da cadeia produtiva, bem como foco das estratégias econômicas. Para tanto, o presente estudo busca adequação metodológica para contribuir tanto com a listagem dos MCE brasileiros, como identificar o direcionamento de estratégias específicas para cada tipologia mineral a partir do IEDM.

4.2.2 Índice para Estratégia e Densidade Mineral (IEDM)

O IEDM avalia o posicionamento estratégico de cada mineral crítico e estratégico no Brasil, cruzando duas dimensões: **Densidade Produtiva (DP)** - o quanto o país já construiu uma base produtiva real para aquele mineral - e **Relevância Estratégica (RE)** - o quanto o fortalecimento desse mineral reduz vulnerabilidades nacionais.

$$\text{IEDM} = \sqrt{(\text{DP} \times \text{RE})}$$

A média geométrica garante que nenhum mineral atinja pontuação alta sendo forte em apenas um dos eixos. A opção pela média geométrica implica que um desempenho muito baixo em um dos eixos não pode ser totalmente compensado por desempenho elevado no outro, reforçando a necessidade de desenvolvimento simultâneo da capacidade produtiva e da relevância estratégica.

As principais referências internacionais de criticidade, como o estudo do British Geological Survey (BGS, 2024), a lista de matérias-primas críticas da União Europeia e a List of Critical Minerals do USGS, compartilham uma mesma arquitetura conceitual: correlacionam o risco de suprimento (concentração da produção global, governança dos países produtores, substituíbilidade, taxa de reciclagem) com a importância econômica ou a vulnerabilidade do país à disrupção desse suprimento. Todas essas metodologias partem de uma premissa comum que é a avaliação a partir do risco de suprimento, uma vez que o país que faz a avaliação não produz o mineral, ou o produz de forma marginal. O objetivo é medir a exposição a um choque de importação; não existe, nesses *frameworks*, um eixo dedicado à hipótese de dotação nacional já estabelecida, uma vez que, para a maioria desses países, essa hipótese, por definição, não se aplica.

O Brasil não se encaixa nessa premissa. Para muitos dos minerais listados (nióbio, ferro, grafita), o país não figura como importador vulnerável, mas como produtor dominante; para outros (potássio, fosfato, terras-raras em maior escala), a situação de dependência se aproxima

da de qualquer país consumidor. Aplicar diretamente um *framework* de vulnerabilidade de importação ao caso brasileiro produziria um erro sistemático: um mineral em que o Brasil já lidera a produção mundial seria classificado como baixo risco, uma vez que o país não estaria exposto a si mesmo, o que ocultaria justamente o ativo estratégico que mereceria ser protegido e expandido.

É nesse ponto que o IEDM se afasta da tradição dos levantamentos geológicos internacionais: em vez de aferir apenas o grau de risco associado a um determinado mineral, introduz a Densidade Produtiva como segundo eixo independente, avaliando a capacidade produtiva já instalada no país. Essa é a inovação central da metodologia: converte uma ferramenta de avaliação de risco, desenhada para países importadores, em uma ferramenta de priorização de política industrial, desenhada para países produtores.

A consequência prática se manifesta na leitura dos quadrantes: dois minerais podem apresentar a mesma Relevância Estratégica e ainda assim exigir políticas completamente distintas, a depender da Densidade Produtiva. Um caso demanda política de fomento à entrada e à construção de capacidade (Estratégico Emergente); o outro demanda política de consolidação e internacionalização de uma posição já forte (Dotação Nacional Consolidada). Nenhum *framework* de importador distingue essas duas situações, uma vez que, para os países que os desenvolveram, tal distinção não se coloca: o país tem o mineral ou não tem, e não há alavanca de política voltada à construção de capacidade própria a considerar.

Essa mesma lógica motiva a separação, dentro do Eixo Y, entre criticidade global e dependência nacional (ver avaliação do indicador na seção 3), separação que a maioria dos *frameworks* internacionais não precisa fazer, uma vez que, para um país importador típico, as duas dimensões tendem a se sobrepor. O perfil misto do Brasil, líder em alguns minerais e dependente em outros, é justamente o que exige desmembrar dimensões que, em Londres ou Bruxelas, podem continuar sendo tratadas conjuntamente.

Essa originalidade tem um custo. Ao contrário do BGS ou do USGS, refinados e validados ao longo de mais de uma década de aplicação institucional, o IEDM é uma metodologia nova, sem histórico de validação externa. Isso reforça a importância dos pontos levantados nas seções 2 e 3: a régua de normalização e a definição precisa de cada indicador carregam, neste contexto, mais peso do que carregariam em um *framework* já testado.

Cabe destacar que a detenção de reservas relevantes e o desenvolvimento interno da cadeia produtiva não são faces do mesmo fenômeno, e um mesmo mineral pode se apresentar em situações opostas em cada uma dessas dimensões simultaneamente. As terras-raras constituem o caso mais ilustrativo: o Brasil detém uma das maiores reservas mundiais, o que por si só já romperia a premissa de um *framework* de importador puro; ao mesmo tempo, a exploração e o beneficiamento desse mineral no país ainda são incipientes, e o Brasil permanece dependente de produtos refinados de terras-raras importados para uso industrial. O mesmo mineral figura, simultaneamente, como ativo estratégico (pela reserva), como cadeia ainda prospectiva (pela maturidade) e como dependência externa (pelo produto refinado). São esses três atributos combinados que tornam o caso brasileiro difícil de reduzir a um único eixo e que motivam a heterogeneidade discutida a seguir.

Há ainda um segundo desafio, interno ao próprio Brasil, que se soma ao primeiro: dentro do mesmo país, e por vezes dentro do mesmo grupo de minerais estratégicos, convivem cadeias já consolidadas, com exploração, beneficiamento e comercialização estabelecidos em escala (nióbio, ferro, grafita), e cadeias ainda prospectivas, nas quais o país detém reservas conhecidas e relevantes, mas o processo segue de baixa escala e baixa intensidade, muitas vezes limitado à fase de exploração (lítio, terras-raras, tântalo, vanádio). Nenhuma das duas dimensões do IEDM resolve essa heterogeneidade isoladamente: a Densidade Produtiva mede exatamente essa maturidade desigual entre minerais, ao passo que a Relevância Estratégica assegura que um mineral ainda prospectivo não seja descartado apenas por não ter escala corrente.

Eixo X – Densidade Produtiva

O Eixo X do IEDM mensura a Densidade Produtiva de cada mineral no território nacional. Essa dimensão avalia o estágio de consolidação da base produtiva brasileira por meio de quatro indicadores complementares, ponderados segundo sua contribuição relativa para a caracterização da maturidade industrial. A Tabela a seguir detalha a composição do eixo e os pesos atribuídos a cada indicador.

Tabela 73. Eixo X — Densidade Produtiva (DP)

PERGUNTA-GUIA: O Brasil já tem uma base produtiva real e escalável para este mineral?

$$\begin{aligned} DP &= 0,30 \times \text{Escala Produtiva} \\ &+ 0,25 \times \text{Estrutura Concorrencial} \\ &+ 0,25 \times \text{Integração de Cadeia} \\ &+ 0,20 \times \text{Robustez Operacional} \end{aligned}$$

Indicador	Peso	Definição
Escala Produtiva	30%	Produção física nacional agregada, valor de produção e capacidade instalada, somando todos os produtores brasileiros daquele mineral
Estrutura Concorrencial	25%	Número de empresas/projetos ativos por elo da cadeia + HHI setorial daquele mineral no Brasil
Integração de Cadeia	25%	Quantos dos 4 elos U/M/D/R (<i>upstream/midstream/downstream/reciclagem</i>) estão presentes e ativos no Brasil para aquele mineral
Robustez Operacional	20%	TRL predominante do setor, infraestrutura logística disponível na região produtora, diversificação territorial e volatilidade de preço da commodity

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Avaliação dos indicadores do Eixo X

A avaliação dos indicadores que compõem a Densidade Produtiva requer a definição de critérios objetivos e escalas de pontuação que permitam a comparação entre minerais com perfis produtivos distintos. Os quadros a seguir detalham os critérios de avaliação para cada indicador do Eixo X, incluindo observações sobre a adequação de cada métrica ao contexto mineral brasileiro.

Quadro 1. Densidade produtiva – Eixo X

Relevância: alta, é o componente mais direto de densidade produtiva: quanto maior a produção física e a capacidade instalada, mais consolidada é a base nacional daquele mineral.	Capta a dimensão proposta? Parcialmente. Mede o tamanho atual da base, mas não sua trajetória, um mineral com produção grande e estagnada aparece tão “denso” quanto um em expansão rápida. Além disso, volume físico e valor de produção são altamente correlacionados entre si, o que pode gerar dupla contagem do mesmo fenômeno dentro de um único indicador.	Sugestões de outros indicadores: separar “escala atual” (volume + valor) de “dinamismo”, usando o CAGR de produção dos últimos 3–5 anos, ou seja, a Taxa de Crescimento Anual Composta: um único número que resume o crescimento médio ao ano ao longo do período, calculado como $(\text{valor final} \div \text{valor inicial})^{1/n^{\circ} \text{de anos}} - 1$. Isso diferencia um mineral com produção grande mas estagnada de um com produção menor mas em expansão rápida — informação que a Escala Produtiva sozinha não capta.¹⁰⁰ Como proxy adicional de potencial de expansão, usar a proporção de projetos em estágio pré-operacional (exploração) sobre o total de projetos daquele mineral — dado já mapeado no levantamento de projetos por mineral do estudo.
---	--	--

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

100 Cogitou-se também usar a taxa de utilização da capacidade instalada (capacidade ociosa como sinal de espaço para expansão rápida), mas esse dado só existe de forma consistente para minerais já em operação com plantas construídas (nióbio, ferro, níquel). Para os minerais ainda em fase de exploração — que, pelo próprio levantamento do estudo, são boa parte da amostra (lítio, terras-raras, tântalo, vanádio, cobalto) — não há capacidade instalada para medir, porque a planta ainda não existe. Um indicador que só se aplica a metade dos casos comparados não é uma boa escolha; por isso a proporção de projetos pré-operacionais foi preferida, já que essa informação existe para todos os minerais da amostra.

Quadro 2. Estrutura concorrencial – Eixo X

Relevância: alta, concentração de mercado indica se a base produtiva é resiliente (diversificada) ou vulnerável a um único ator.	Capta a dimensão proposta? Só parcialmente. “Mais empresas” nem sempre significa “mais densidade” — pode haver fragmentação sem nenhuma empresa capaz de escalar. Na direção oposta, uma cadeia com poucas empresas, mas verticalmente integradas e eficientes (nióbio, dominado quase inteiramente por um único produtor) seria penalizada por esse indicador, mesmo sendo o caso mais denso e consolidado do país.	Sugestões de outros indicadores: o ideal seria complementar com um indicador de competitividade de custo (custo de produção relativo a benchmarks internacionais). A ideia: comparar o custo de produção de cada mineral no Brasil com a “curva de custo” global daquele mineral — um conceito padrão da indústria de mineração, em que cada operação do mundo é posicionada num ranking de custo (normalmente em quartis: Q1 = produtores mais baratos do mundo, Q4 = mais caros). Se o Brasil está no Q1 do lítio, por exemplo, isso significa que mesmo numa queda de preço internacional, a produção brasileira continua viável — um sinal de solidez que a Escala Produtiva sozinha não mostra (produção grande com custo alto é uma base frágil).
--	---	---

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Não obstante, a pergunta é: temos esse dado? Só parcialmente, e de forma bem desigual entre os minerais:

- Para minerais com grandes produtoras listadas em bolsa — ferro e níquel (Vale), por exemplo — o “cash cost” por tonelada costuma aparecer em relatórios trimestrais para investidores. Dá para reconstruir isso com pesquisa dirigida, sem custo adicional.
- Para a maioria dos outros minerais do estudo — grafita, tântalo, vanádio, terras-raras, potássio, fósforo — os produtores no Brasil são majoritariamente privados ou de capital fechado, sem obrigação de divulgar custo. A dificuldade aqui não é apenas de acesso, mas estrutural: mesmo tentando aproximar o custo por outras vias — cruzando dados fiscais como CFEM e ICMS com o volume de produção declarado, por exemplo — o resultado seria uma estimativa indireta, sujeita a distorções contábeis e sem comparabilidade garantida entre empresas ou entre minerais. Não há hoje um caminho de baixo custo que produza um número confiável e auditável; forçar uma estimativa apenas para preencher a lacuna correria o risco de introduzir

um dado de baixa qualidade disfarçado de indicador quantitativo, quando talvez a opção mais honesta seja aplicá-lo apenas onde o dado existe de fato e sinalizar a ausência nos demais casos.

Quanto a ponderar o HHI pela capacidade técnica das empresas: o HHI já pondera por participação de mercado, o que falta é sofisticação técnica, já que duas empresas com a mesma fatia recebem hoje o mesmo peso, mesmo que uma opere só a lavra e outra tenha refino e manufatura integrados. A correção seria multiplicar a participação de cada empresa por um peso técnico antes de elevar ao quadrado, mas construir esse peso do zero é onde mora a dificuldade real: seria preciso definir, para cada empresa e cada mineral, um critério verificável de sofisticação técnica (presença de refino próprio, patentes, certificações, etapas da cadeia efetivamente operadas), e hoje esse dado não existe de forma padronizada para o universo de empresas do estudo. Sem essa padronização, o peso técnico vira um julgamento caso a caso — reintroduzindo o risco de subjetividade, só que agora escondido dentro de uma fórmula que parece objetiva.

Quadro 3. Integração de cadeia – Eixo X

Relevância: muito alta — é o que distingue “densidade produtiva” de simples extração: ter <i>midstream/downstream</i> no país é o que gera valor agregado e emprego qualificado.	Capta a dimensão proposta? Sim, diretamente — mas a escala de contagem (0 a 4 elos presentes) é grosseira: trata “ter uma planta piloto de refino” da mesma forma que “ter capacidade industrial plena de refino”, quando são situações muito diferentes.	Sugestões de outros indicadores: substituir a contagem binária por um índice de maturidade por elo (ex.: 0 = ausente, 1 = piloto/emergente, 2 = operação parcial, 3 = operação plena); ponderar cada elo pelo valor agregado que ele representa, já que <i>downstream</i> tipicamente agrega mais valor que <i>midstream</i>.
--	---	---

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Quadro 4. Robustez operacional – Eixo X

Relevância: moderada a alta, mede se a densidade produtiva é sustentável no tempo, não só instantânea.	Capta a dimensão proposta? Sim, diretamente, mas a escala de contagem (0 a 4 elos presentes) é grosseira: trata “ter uma planta piloto de refino” da mesma forma que “ter capacidade industrial plena de refino”, quando são situações muito diferentes.	Sugestões de outros indicadores: desmembrar em “Maturidade Tecnológica e Infraestrutura” (TRL + logística) e “Diversificação Territorial” (nº de estados/bacias com projetos) como indicadores separados; mover a volatilidade de preço para o Eixo Y, como proxy adicional de risco/criticidade de mercado.
--	--	--

Ao contrário da Densidade Produtiva, cuja mensuração pode ser baseada predominantemente em indicadores observáveis, parte da Relevância Estratégica envolve dimensões prospectivas e prioridades nacionais, tornando inevitável um componente maior de julgamento técnico.

Eixo Y – Relevância Estratégica (RE)

O Eixo Y do IEDM avalia a Relevância Estratégica de cada mineral para o Brasil, considerando as vulnerabilidades nacionais e o potencial de contribuição para as metas governamentais de desenvolvimento industrial e transição energética. A Tabela a seguir apresenta a composição do eixo e os pesos atribuídos a cada indicador.

Tabela 74. Eixo Y — Relevância Estratégica (RE)

Pergunta-guia: Reduzir a vulnerabilidade brasileira neste mineral muda o jogo para o país?

$$\begin{aligned} \text{RE} &= 0,30 \times \text{Críticidade do Mineral} \\ &+ 0,25 \times \text{Potencial Estratégico Nacional} \\ &+ 0,25 \times \text{Transição Energética} \\ &+ 0,20 \times \text{Potencial Tecnológico} \end{aligned}$$

Indicador	Peso	Definição
Críticidade do Mineral	30%	Classificações consolidadas de criticidade mineral (BGS, EU, USGS) combinadas com dependência de importação brasileira
Potencial Estratégico Nacional	25%	Contribuição do mineral para as prioridades setoriais nacionais (Nova Indústria Brasil, segurança e transição energética)
Transição Energética	25%	Importância do mineral para energia limpa e descarbonização
Potencial Tecnológico	20%	Uso como insumo em baterias, semicondutores, defesa, ímãs e motores elétricos

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Avaliação dos indicadores do Eixo Y

A avaliação dos indicadores de Relevância Estratégica reflete a importância de cada mineral para a redução de vulnerabilidades nacionais e para o atendimento das metas de política industrial. Os quadros a seguir apresentam os critérios de pontuação e as considerações metodológicas para cada indicador do Eixo Y.

Quadro 5. Criticidade do mineral – Eixo Y

Relevância: altíssima, é o núcleo do conceito de relevância estratégica: mede o quanto o país precisa desse mineral e não tem alternativa fácil de suprimento.	Capta a dimensão proposta? Parcialmente. Fundir “classificação internacional de criticidade” com “dependência de importação brasileira” em um único número esconde uma diferença conceitual importante: a criticidade global de um mineral reflete a estrutura do mercado mundial, enquanto a dependência brasileira reflete a situação específica do país — e os dois podem divergir bastante. Um único score sem pesos internos explícitos mascara exatamente essa diferença, que é um dos pontos mais interessantes que o IEDM poderia capturar.	Sugestões de outros indicadores: manter dois subcomponentes internos com pesos explícitos e sinal consistente entre si (ex.: dependência brasileira e criticidade global, ambos crescentes com a relevância), documentando com clareza qual pesa mais e por quê.
--	---	--

Quadro 6. Potencial estratégico nacional – Eixo Y

Relevância: alta — é a dimensão que deveria diferenciar o IEDM de qualquer índice de criticidade genérico, capturando prioridades nacionais específicas.	Capta a dimensão proposta? Risco alto de subjetividade. “Contribuição estratégica para as ações prioritárias do setor mineral e industrial nacional” é um julgamento qualitativo sem uma métrica objetiva declarada, diferente dos demais indicadores, que têm alguma base em dado observável. Sem uma régua explícita, esse indicador pode virar uma justificativa retroativa para qualquer classificação desejada.	Sugestões de outros indicadores: o ideal seria ancorar objetivamente em contagem de menções/prioridades explícitas do mineral em documentos oficiais (PNMCE, Nova Indústria Brasil, planos setoriais), ou presença em carteiras de investimento público direcionadas ao setor (BNDES, Finep), caso esses dados existam.
--	--	---

Quadro 7. Transição energética

Relevância: alta, dado que o estudo inteiro está enquadrado em torno da transição energética e descarbonização.	Capta a dimensão proposta? Razoavelmente. É um dado factualmente verificável (papel do lítio em baterias, por exemplo), mas a escala qualitativa declarada parece arbitrária sem fonte primária explícita — quando o próprio estudo já tem uma fonte quantitativa pronta (a projeção de demanda do Banco Mundial até 2050, citada em outro ponto da apresentação).	Sugestões de outros indicadores: substituir o score qualitativo pelo percentual de crescimento de demanda projetada até 2050 para aquele mineral, normalizado, usando a mesma fonte já citada no estudo.
---	--	--

Quadro 8. Potencial tecnológico

Relevância: moderada — mede aplicações tecnológicas em baterias, semicondutores, defesa, ímãs e motores elétricos.	Capta a dimensão proposta? Há sobreposição conceitual significativa com Transição Energética: baterias e motores elétricos aparecem nos dois indicadores, o que pode gerar dupla contagem do mesmo fenômeno para minerais como o lítio.	Sugestões de outros indicadores: redefinir o escopo para cobrir exclusivamente aplicações não capturadas pelo indicador de transição energética — defesa, semicondutores, telecomunicações — evitando sobreposição entre os dois indicadores.
--	---	---

A combinação dos indicadores dos eixos X e Y por meio da média geométrica resulta no índice final que posiciona cada mineral no plano bidimensional do IEDM. Essa formulação assegura que a priorização reflita simultaneamente a capacidade produtiva e a importância estratégica.

Cálculo do IEDM

O cálculo do IEDM final segue a fórmula $IEDM = \sqrt{DP \times RE}$, onde DP representa a Densidade Produtiva e RE a Relevância Estratégica, ambas normalizadas na escala de 0 a 10. A normalização é realizada por meio da conversão dos valores brutos de cada indicador para a escala padronizada, utilizando os critérios definidos nos quadros precedentes.

$$IEDM = \sqrt{DP \times RE}$$

Cada eixo é normalizado numa escala comum antes da combinação, de forma que nenhum mineral atinja IEDM alto sendo forte em apenas uma das duas dimensões.

QUADRANTES

Os quadrantes não representam apenas diferentes níveis de desempenho, mas diferentes tipos de intervenção pública desejável.

Os quadrantes do IEDM constituem o instrumento de classificação que traduz os resultados quantitativos em categorias de ação política. Cada quadrante corresponde a um perfil distinto de combinação entre Densidade Produtiva e Relevância Estratégica, demandando intervenções específicas. O Quadro a seguir apresenta a caracterização de cada quadrante.

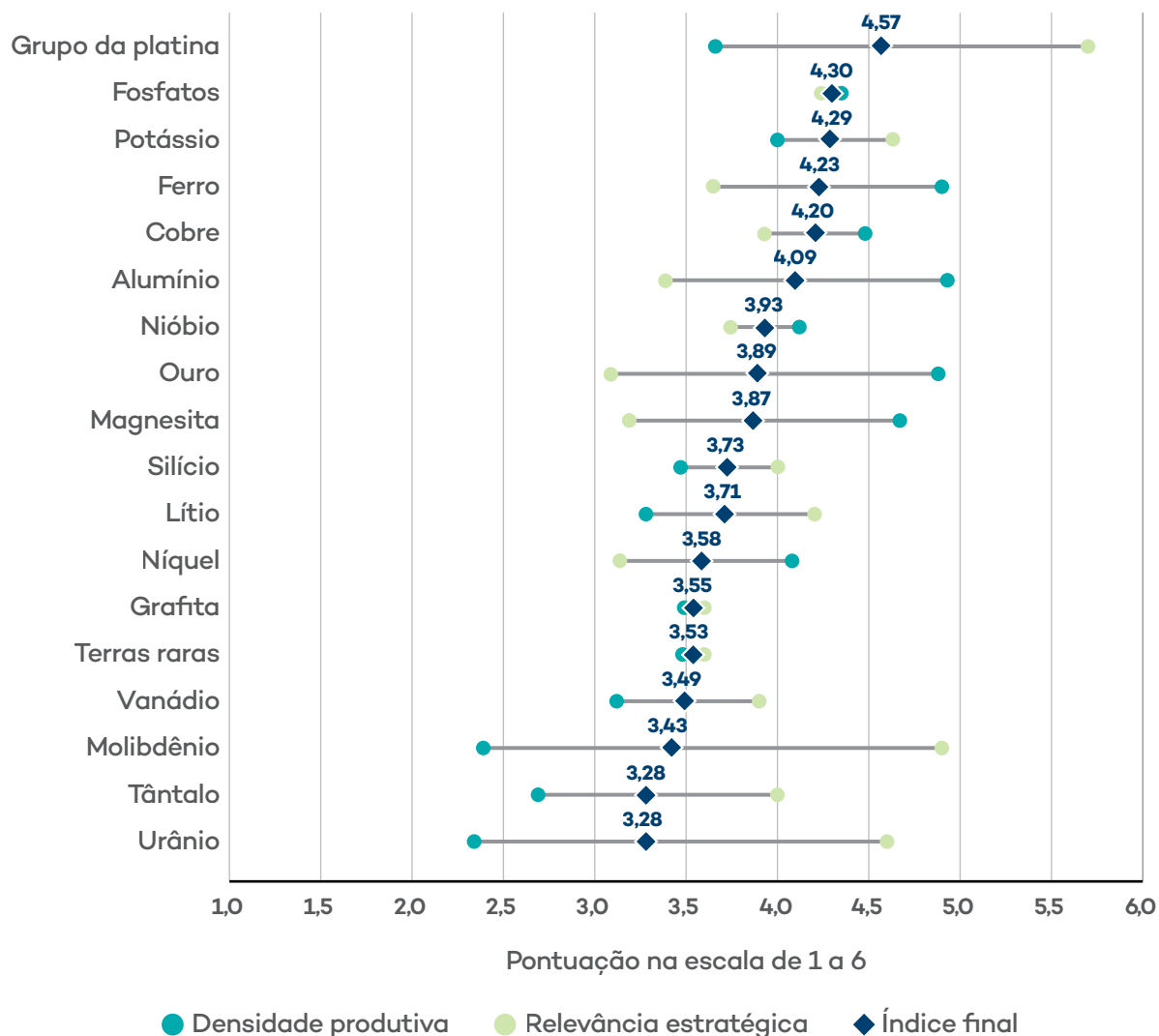
Quadro 9. Quadrantes

Quadrante	Critério
Críticos Prioritários	Alto DP / Alto RE
Estratégico Emergente	Baixo DP / Alto RE
Dotação Nacional Consolidada	Alto DP / Baixo RE
Monitoramento	Baixo DP / Baixo RE

A classificação e análise dos minerais conforme os quadrantes propostos pelo Quadro 9, permite visualizar a colocação dos minerais analisados, conforme os requisitos considerados como indicadores. Um aprimoramento da metodologia pode auxiliar a revisão e atualização a lista periódica de minerais críticos e estratégicos, bem como contribuir para políticas públicas direcionadas e efetivas por cadeia de valor.

Figura 36. Densidade Produtiva, Relevância Estratégica e índice final

O índice final é a média geométrica dos dois eixos: $\sqrt{(\text{Densidade Produtiva} \times \text{Relevância Estratégica})}$.



Fonte: elaboração própria a partir de INDICADORES_cadeia_v7.xlsx, cenário de materialidade de 10% · Elaboração: IBRAM

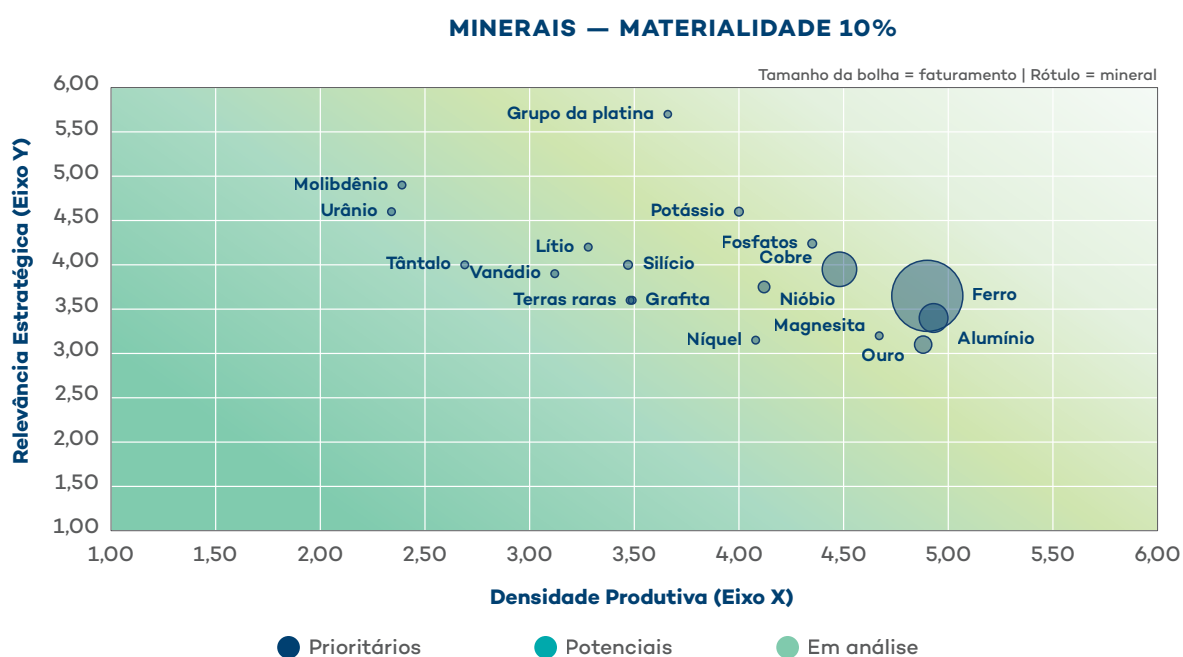
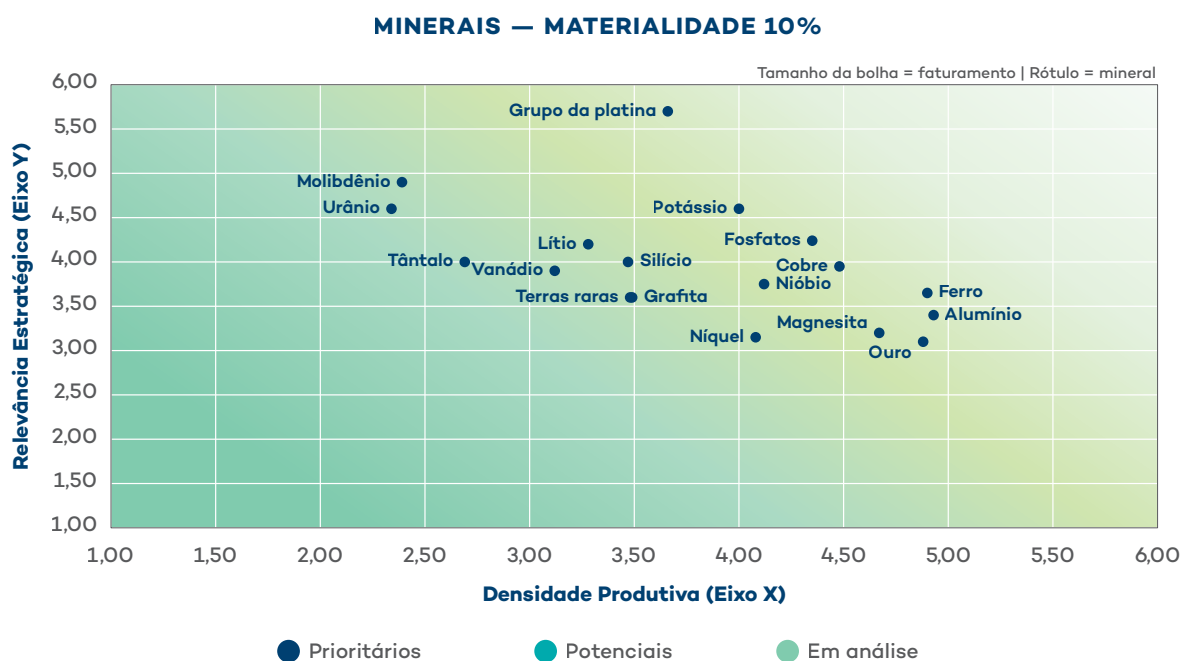
O grupo da platina apresenta o maior índice final (4,57), com Densidade Produtiva de 3,66 e Relevância Estratégica de 5,70. A distância entre os dois eixos mostra que a posição é sustentada principalmente pela relevância estratégica, e não por uma densidade produtiva doméstica equivalente.

Os seis maiores resultados são Grupo da platina (4,57), Fosfatos (4,30), Potássio (4,29), Ferro (4,23), Cobre (4,20), Alumínio (4,09). O conjunto reúne perfis diferentes: ferro e alumínio se destacam no Eixo X, enquanto fosfatos e potássio ganham força relativa no Eixo Y.

O molibdênio ilustra o movimento inverso: índice final de 3,43, com Densidade Produtiva de 2,39 e Relevância Estratégica de 4,90. Portanto, o índice final deve ser lido junto com os dois eixos, pois valores próximos podem resultar de estruturas produtivas e estratégicas distintas.

A Figura 36 a seguir apresenta os resultados da análise, permitindo a visualização comparativa dos indicadores relevantes para a cadeia de valor analisada.

Figura 37. (a) Análise do potencial de criticidade dos minerais candidatos materialidade (10%). (b) Análise do potencial de criticidade dos minerais candidatos materialidade (10%) com indicação de faturamento.



A análise teve como objetivo identificar os minerais de importância econômica em razão do valor de mercado, da dotação mineral nacional, do processo de produção nos estágios *midstream* e/ou *downstream*, da capacidade produtiva superior à demanda atual e da previsão de aumento de demanda. A partir da definição dos 18 minerais candidatos, foi aplicada a metodologia considerando-se dados prioritariamente qualitativos para a densidade produtiva (DP) e dados exclusivamente quantitativos para a relevância estratégica (RE). A ausência ou inconsistência de dados sobre a densidade produtiva das principais empresas do setor impactou a atribuição exclusiva de dados quantitativos para os indicadores da DP.

Neste sentido, busca-se priorizar neste estudo os aspectos motivadores para uma estratégia nacional voltada para a reindustrialização do setor mineral por meio da classificação dos MCE.

Conforme apresentado na Figura 37, um conjunto inicial de 18 MCE foi considerado como grupo de minerais candidatos para a aplicação metodológica proposta neste estudo. À exceção do zinco, todos os minerais listados fazem parte dos 28 bens minerais (considerando o grupo da platina e o conjunto de elementos de terras raras) listados na Resolução nº2 de 2021 do MME.

A aplicação do IEDM ao conjunto de oito minerais prioritários resulta nos valores apresentados a seguir. Para cada mineral, são indicados os escores parciais dos indicadores de Densidade Produtiva (DP) e Relevância Estratégica (RE), bem como o índice final calculado pela média geométrica. Os valores foram atribuídos com base nos dados de produção, reservas, capacidade instalada e demanda projetada compilados, utilizando as escalas definidas.

Os resultados confirmam a distribuição esperada conforme as categorias a seguir.

- **CRÍTICOS PRIORITÁRIOS:** Potássio, fosfato e grupo da platina.
- **ESTRATÉGICOS PRIORITÁRIOS:** Cobre, nióbio, níquel e magnésita.
- **ESTRATÉGICOS EMERGENTES:** Lítio, silício, terras raras, grafita.
- **DENSIDADE PRODUTIVA CONSOLIDADA:** Ferro, alumínio, ouro.
- **MONITORAMENTO:** Urânio, molibdênio, tântalo, vanádio.

Nióbio poderia apresentar uma DP e RE mais acentuadas. No entanto, os dados quantitativos delimitam o posicionamento em razão dos volumes processados e aplicados no produto final, exigindo um possível ajuste metodológico. Ainda assim, é classificado como mineral estratégico prioritário.

Os minerais potássio, fosfato e o grupo da platina caracterizam minerais críticos, em razão do risco de fornecimento. No entanto, o risco para o grupo da platina se caracteriza pelo potencial de aplicação e valor de mercado, elevando significativamente a RE, mas mantendo uma DP intermediária. Lítio e terras raras, em razão de valores de DP mais baixos, encontram-se como estratégicos emergentes, mas com grande potencial para avançarem para os estratégicos prioritários, especialmente por consolidação da demanda nacional.

Cadeias produtivas como ferro, alumínio e ouro encontram-se consolidadas, mas com potencial de aplicação em demanda interna e, desta forma, podendo ampliar os valores de RE no médio e longo prazos.

Os minerais caracterizados como monitoramento requerem mais recursos e diversificação de aplicações na produção nacional ou ainda demanda e valor de mercado internacional para migrar para o posicionamento de minerais estratégicos ou críticos.

Figura 38. Classificação dos minerais críticos e estratégicos para o estudo

Potenciais			
Mce	Principais produtores (exportadores)	Principais importadores (mercados)	Potencial de circularidade
magnésio (Magnesita)	China, Rússia, Turquia, Brasil	EUA, Japão, Canadá, Israel	Médio
Níquel	Indonésia, Filipinas, Rússia, Nova Caledônia, Canadá	China, EUA, Noruega, Japão	Médio-alto
Silício	China, Rússia, Brasil, Noruega	EUA, Canadá, Malásia, Alemanha	Alto
Tântalo	RD Congo, Brasil, Ruanda, Nigéria, Austrália	China, EUA, Alemanha, Cazaquistão, Tailândia	Médio
Urânio	Cazaquistão, Canadá, Namíbia, Austrália	EUA, França, China, Rússia	Baixo
Vanádio	China, Rússia, África do Sul, Brasil	EUA, Canadá, Áustria, Rússia	Baixo
Em análise			
Mce	Principais produtores (exportadores)	Principais importadores / mercados	Potencial de circularidade
cobalto	RD Congo, Indonésia, Rússia, Austrália, Canadá	China, EUA, Japão, Noruega, Finlândia	Alto
Grupo da Platina	África do Sul, Rússia, Zimbábue, Canadá	EUA, Japão, Alemanha, Itália, Bélgica	Muito alto
Minério de Ferro	Austrália, Brasil, China, Índia, Rússia	China, Japão, Coreia do Sul, Alemanha, Índia	Muito alto
Molibdênio	China, Chile, EUA, Peru, México	EUA, Chile, Peru, Coreia do Sul	Médio
Ouro	China, Austrália, Rússia, Canadá, EUA, Gana	Índia, EUA, Reino Unido, Suíça (Comércio Global)	Alto
Zinco	China, Peru, Austrália, Índia, EUA, Bolívia	EUA, Canadá, México, Coreia do Sul, Peru	Alto

Fonte: Classificação, documento original.

4.3 Análise dos MCE prioritários

A partir do posicionamento dos minerais nos quadrantes do IEDM, procede-se à análise individualizada dos oito minerais classificados como prioritários. Para cada mineral, são apresentados os indicadores de produção, reservas, perfil de exportação e importação, bem como a análise do posicionamento na cadeia de valor e as perspectivas de adensamento tecnológico.

4.3.1 Alumínio

A cadeia de valor do alumínio no Brasil apresenta uma estrutura altamente integrada e estratégica e concentrada principalmente nos estados do Pará, Minas Gerais, Goiás e São Paulo. Em 2025 o setor de alumínio primário alcançou volume recorde desde 2013, com a produção de 1,18 milhão de toneladas e faturamento de R\$ 168 bilhões e cerca de 508 mil empregos diretos e indiretos¹⁰¹. No entanto, o aumento das importações deixa o setor em alerta. O mercado consumidor equivale a 1,88 milhão de toneladas anuais, que tem se mantido estável. Mas as importações de bens acabados cresceram cerca de 6% no último ano, impulsionadas pelo setor de eletricidade com investimentos em transmissão e distribuição de energia.

A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) atua em todos os elos da cadeia de valor, desde a extração mineral até a reciclagem de materiais pós-consumo. A totalidade da energia gerada provém de hidrelétricas próprias, evitando, desta forma, a intermitência no fornecimento. Os processos de extração, concentração e refino contam com baixas taxas de emissão de carbono em relação à processos semelhantes no mundo. A partir da empresa Metalatex, a CBA realiza a recuperação de sucatas de alumínio e fabricação de produtos, aplicando os princípios da economia circular. Há mais de cinco anos a empresa opera em parceria com a empresa ComBio o fornecimento de energia térmica gerada a partir de biomassa e energia elétrica renovável, alcançando mais de 1 milhão de toneladas de CO₂eq evitados no período.

No segmento de extração mineral, a Mineração Rio do Norte (MRN) destaca-se como a líder nacional na produção de bauxita, operando desde a década de 1970, nos municípios de Oriximiná e Terra Santa, no Pará. A empresa Novelis, subsidiária do grupo indiano Aditya Birla, lidera as etapas de laminação e reciclagem de alumínio no Brasil.

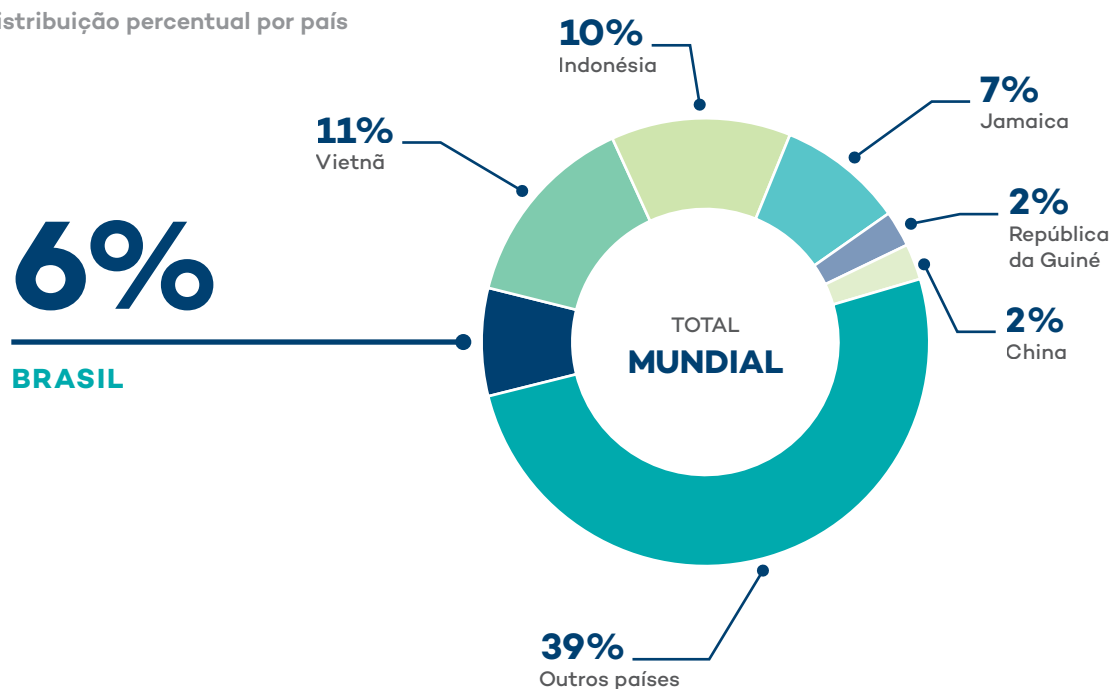
A empresa Albras (Alumínio Brasileiro S/A), fundada em 1985, é a maior produtora de alumínio primário do Brasil e opera em Barcarena (PA). A empresa atua na transformação da alumina em metal líquido por meio de processos eletrolíticos, abastecendo mercados exigentes dentro e fora do país. A Alunorte, que iniciou suas atividades produtivas em 1995, é considerada a maior refinaria de alumina do mundo fora da China, também instalada em Barcarena (PA). A atuação da companhia foca no refino de bauxita através do processo

101 <https://www.revistaaluminio.com.br/industria-do-aluminio-cresce-em-2025-mas-avanco-das-importacoes-preocupa-setor>

Bayer para a produção em larga escala de alumina que é destinada tanto à exportação quanto ao fornecimento direto para a unidade da Albras, consolidando a cadeia produtiva integrada na região amazônica.

Gráfico 1. Reservas Globais de Alumínio (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da ANM e USGS, 2026.

4.3.2 Cobre

O cobre está presente na maioria dos equipamentos eletroeletrônicos, compondo frações para eletrificação, baterias, painéis solares e bobinas, por exemplo. O Chile detém cerca de 20% das reservas globais de cobre com cerca de 180 milhões de toneladas. Por isso, a projeção de uma grande demanda global por esse mineral o posiciona como um mineral crítico. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2026)) projeta que, caso novos projetos não sejam iniciados, pode ocorrer um déficit de até 30% na produção global até 2035. As principais empresas mineradoras e exportadoras no Chile são Codelco, BHP, Anglo American, Minerais de Antofagasta, Recursos Teck e Rio Tinto.

No Brasil, a produção de cobre é liderada pela Vale S.A., com as minas de Salobo e Sossego no Pará. A Ero Copper (Mineração Caraíba) na Bahia e a Lundin Mining em Goiás também participam da cadeia de valor da extração do cobre. A produção ocorre de forma concentrada no Pará, onde se localizam 90% das reservas e são realizadas 70% da produção de concentrado de cobre.

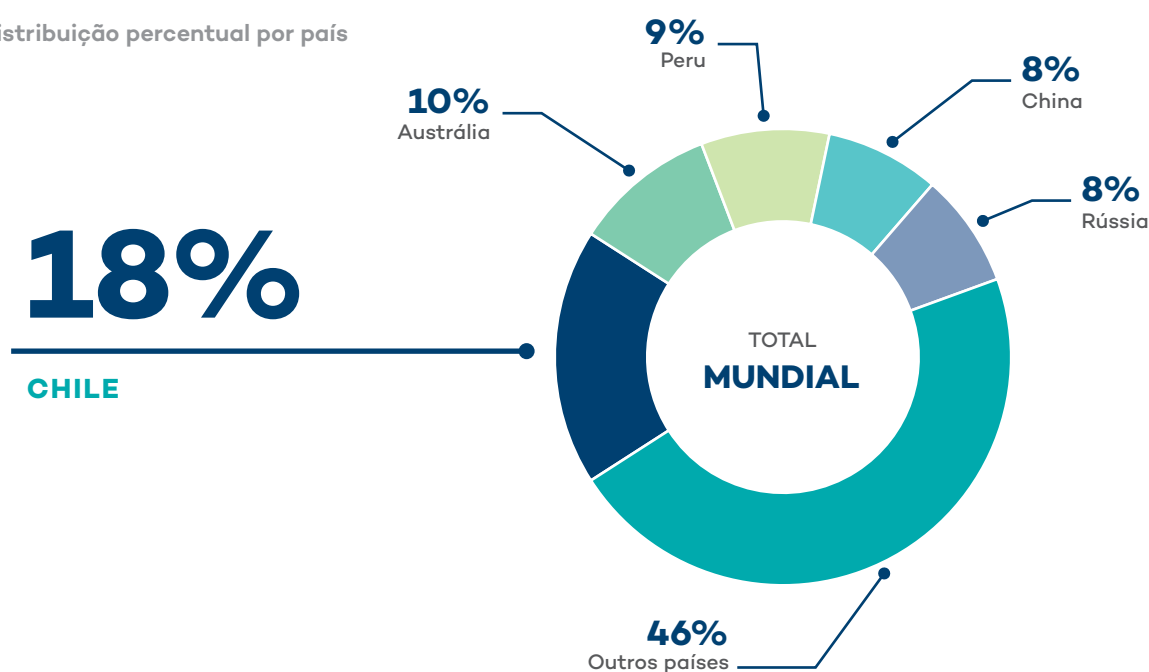
A Vale S.A., fundada em 1943, é a principal empresa do setor, atua na extração e produção de concentrado de cobre por meio da Vale Base Metals (VBM). A empresa tem planos de expansão para alcançar o mercado de precursores para a transição energética, com estimativa de finalizar o ano de 2026 com a produção de mais de 360 mil toneladas¹⁰² e ainda alcançar 700 mil toneladas até 2035 <https://valebasemetals.com/pt/nossos-produtos/cobre>¹⁰³.

Ainda no elo *upstream* (extração), mas com forte presença na Metalurgia e Transformação Mineral (produção de cobre refinado), a empresa Ero Copper atua por meio da Mineração Caraíba S.A. no Complexo Caraíba (BA) e no Projeto Tucumã (PA), este último em operação desde 2025. A empresa é um player versátil na cadeia, comercializando tanto o concentrado de cobre quanto o catodo de cobre que é produzido via processos de lixiviação e eletrólise atendendo o mercado nacional e internacional.

A Lundin Mining também integra o setor de Extração através da mina de Chapada (GO), onde produz concentrado de cobre e ouro em larga escala. A multinacional canadense destaca-se pela inovação no elo de reciclagem e economia circular, ao processar e comercializar os rejeitos de sua mineração como agrominerais silicáticos (remineralizadores de solo) para o setor agrícola, integrando mineração à cadeia produtiva de fertilizantes, transformando passivos ambientais em insumos sustentáveis para o mercado.

Gráfico 2. Reservas Globais de Cobre (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da ANM e USGS, 2026.

¹⁰² <https://www.ativovirtual.com.br/avnews/artigos/vale-eleva-custos-do-minerio-de-ferro-e-reduz-projecoes-para-cobre-e-niquel-em-2026>

¹⁰³ <https://valebasemetals.com/pt/nossos-produtos/cobre/>

4.3.3 Elementos Terras Raras

A extração de terras raras no Brasil atingiu um marco operacional com o início da produção comercial da empresa Serra Verde Pesquisa e Mineração no depósito de Pela Ema, em Minaçu (GO), no início de 2024. Esta é a primeira operação de larga escala de argilas iônicas fora da Ásia, utilizando processos de lixiviação simples com sulfato de amônio que eliminam a necessidade de barragens de rejeitos líquidos e reduzem drasticamente o impacto ambiental. Paralelamente, a CBMM desenvolve operações no complexo alcalino-carbonatítico de Araxá (MG), onde investe na recuperação de terras raras a partir de subprodutos da mineração de nióbio, aproveitando a infraestrutura de uma das províncias minerais mais significativas do país.

O ecossistema de inovação brasileiro conta com polos de inovação e tecnologia como, por exemplo, o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), o Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), e o CIT SENAI, além de parcerias estratégicas entre empresas e universidades, como a colaboração entre a Aclara Resources e a UFG para o uso de inteligência artificial no processamento mineral. Plantas-piloto são essenciais para validar rotas tecnológicas: a Aclara opera unidades em Santiago e na Virginia Tech para desenvolver carbonatos de alta pureza (99%), enquanto a *Meteoric Resources* utiliza uma planta-piloto com a ANSTO para o projeto Caldeira.

Em termos corporativos, a Serra Verde recebeu investimentos superiores a US 2,8 bilhões. A empresa projeta uma capacidade de 6.400 toneladas anuais de óxidos até o fim de 2027, com 100% da produção da Fase 1 garantida por um contrato de venda (offtake) de 15 anos.

Um aspecto que merece destaque é o fato de que, embora a produção de terras raras esteja iniciando no país, o setor tem exportado cerca de 2 mil toneladas anuais a partir de estoques históricos da INB.

O método de colheita mineral circular da Aclara Resources é um processo patenteado, desenvolvido para o beneficiamento de argilas iônicas, que se destaca por eliminar a necessidade de barragens de rejeitos líquidos.

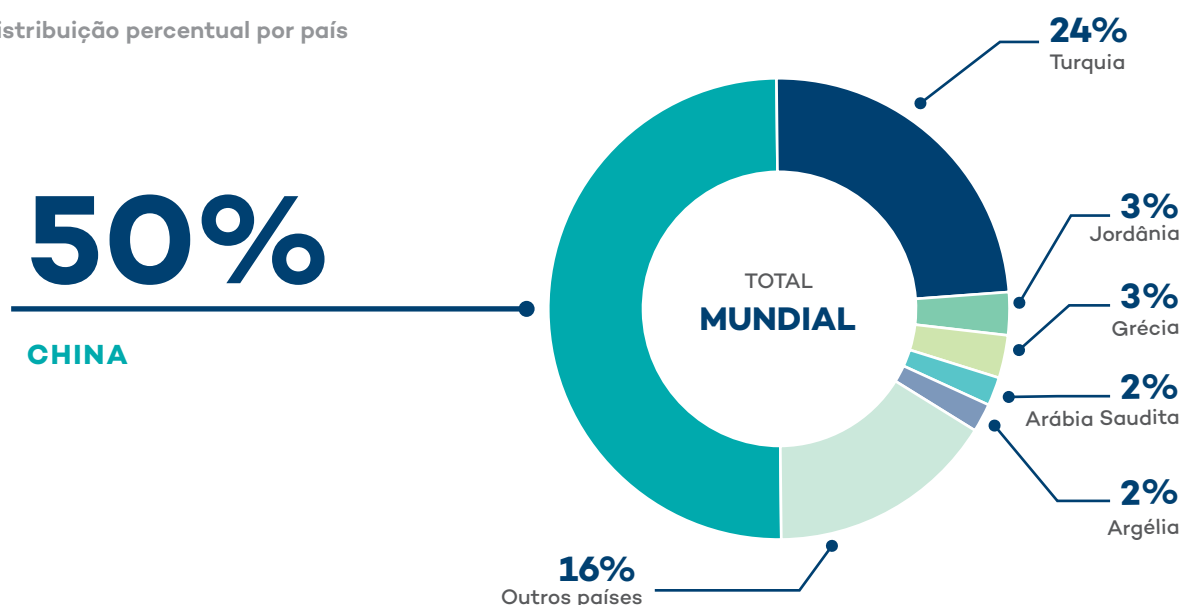
O funcionamento do sistema baseia-se nos seguintes pilares tecnológicos:

- **Lixiviação Suave e Recirculação:** Diferente do refino em rocha dura, que exige britagem e altas temperaturas, este método utiliza uma lixiviação simples onde o minério é lavado com uma solução salina diluída de sulfato de amônio em temperatura ambiente e pH levemente ácido.
- **Eficiência de Recursos:** O processo é projetado para operar em circuito fechado, permitindo a recirculação e o reaproveitamento de até 95% de toda a água utilizada na planta industrial.
- **Recuperação de Reagentes:** A tecnologia consegue recuperar 99% do sulfato de amônio adicionado, minimizando o descarte de produtos químicos e reduzindo custos operacionais.
- **Reabilitação Geológica:** Após a extração das terras raras, a argila exaurida é lavada e neutralizada. Esse material é então devolvido às cavas de mineração originais, servindo de base para uma revegetação sistemática e imediata do local.

Este método permite que o projeto produza um carbonato de terras raras mistas de alta pureza (SPREC), com teor superior a 99%, facilitando a separação posterior dos elementos individuais. Além disso, a Aclara utiliza inteligência artificial e gêmeos digitais para otimizar esses circuitos de extração, aumentando a estabilidade e a pureza do produto final.

Gráfico 3. Reservas Globais de Elementos de Terras Raras 2025 (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da ANM e USGS, 2026.

4.3.4 Fosfato

A dependência da importação de insumos minerais como fósforo, potássio e enxofre para a produção de fertilizantes consiste em um critério de alta importância quanto ao risco de suprimento, podendo comprometer o desempenho da produção agrícola – que representa um setor com significativa contribuição para o PIB nacional. Entretanto, avanços tecnológicos e investimentos na produção mineral podem contribuir para a redução da dependência da importação. A título de exemplo, a empresa Morro Verde anunciou, a partir da fusão com a empresa Massari, um investimento de R\$ 20 milhões para dobrar o faturamento da empresa com a produção de fosfato na mina de Pratápolis (MG) até 2029. Desta forma, a empresa passaria da produção de 400 mil para 1,2 milhão de toneladas de fosfato por ano e chegaria a um faturamento de R\$ 1 bilhão¹⁰⁴.

Da mesma forma, a empresa Água Fertilizantes S.A., localizada no estado do Rio Grande do Sul, recebeu licença de operação em maio de 2026¹⁰⁵ e tem como estratégia de investimento a produção de até 150 mil toneladas de fertilizantes por ano, sendo que 70 mil toneladas já devem ser produzidas ainda em 2026.

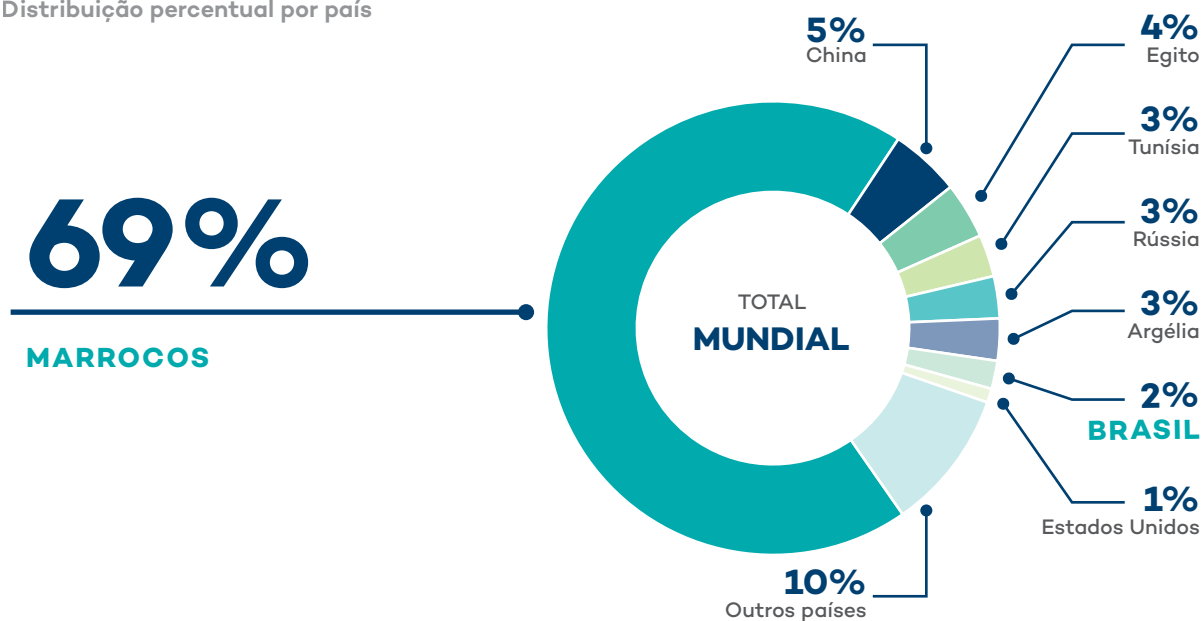
¹⁰⁴ <https://www.theagribiz.com/fertilizantes/morro-verde-triplica-producao-de-fosfato-apos-fusao-com-massari/>

¹⁰⁵ <https://globalfert.com.br/noticias/producao/producao-de-fertilizantes-fosfatados-avanca-no-rio-grande-do-sul-e-estima-inicialmente-150-mil-toneladas/>

Apesar de possuir uma produção significativa de fosfato, o país depende da importação. A produção nacional não é compatível com a demanda interna, especialmente do setor agropecuário, que demanda o insumo para a produção de fertilizantes e ração animal.

Gráfico 4. Reservas Globais de Fosfato 2025 (%)

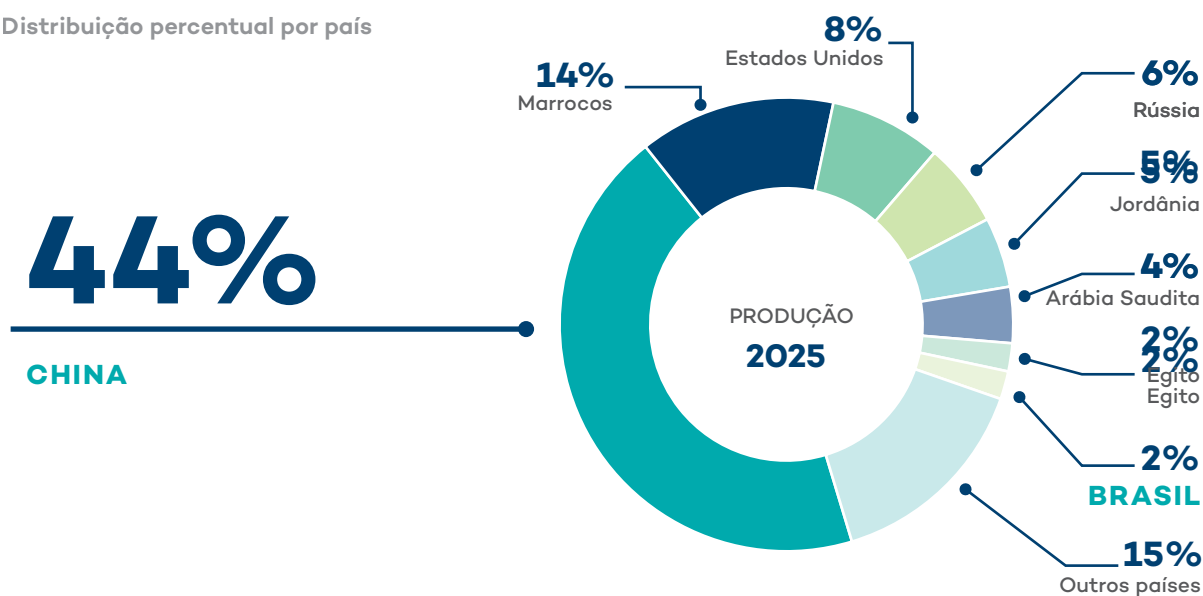
Distribuição percentual por país



Fonte: USG, 2026

Gráfico 5. Produção Global de Fosfato 2025 (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: USG, 2026

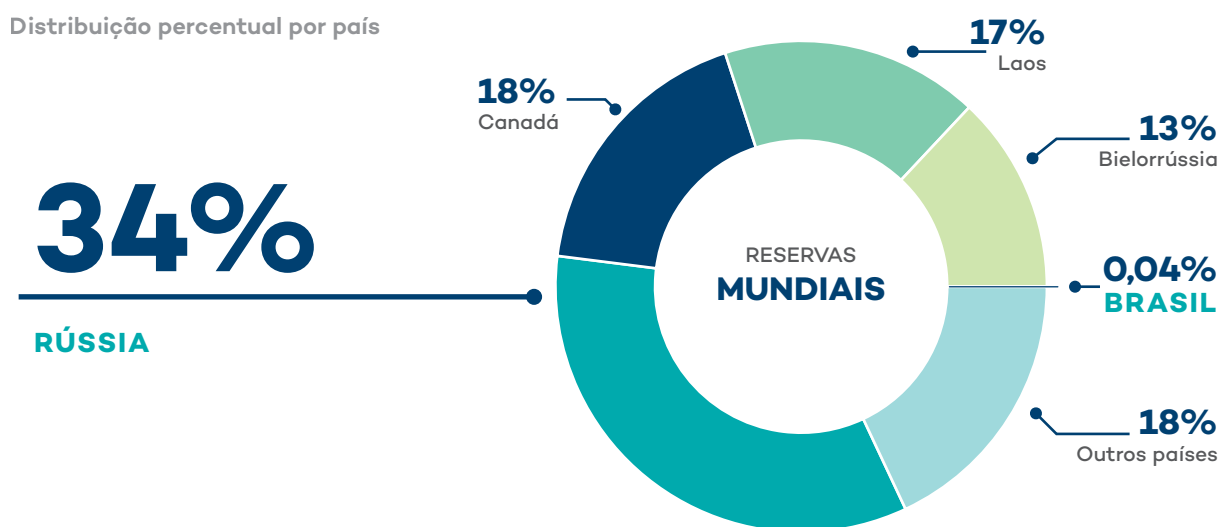
A análise dos indicadores apresentados permite identificar os principais gargalos e oportunidades para o adensamento da cadeia de valor no contexto brasileiro.

4.3.5 Potássio

Os indicadores de produção e comércio exterior do potássio evidenciam a assimetria entre a demanda nacional e a capacidade produtiva instalada. Os gráficos a seguir apresentam a evolução da produção e das importações.

Gráfico 6. Reservas globais de potássio (%)

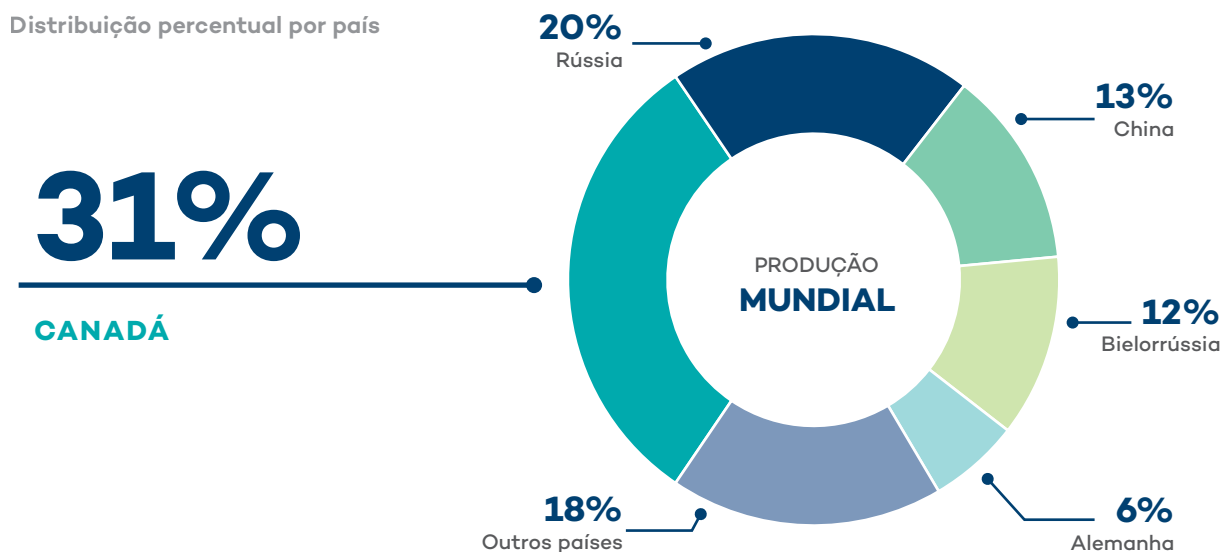
Distribuição percentual por país



Fonte: USG, 2026

Gráfico 7. Produção global de potássio 2025 (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: USG, 2026

A análise dos dados apresentados permite identificar muito pouca representatividade da dotação mineral do potássio no Brasil.

4.3.6 Grafita

O Brasil consolida-se como o 4º maior produtor mundial de grafita, detendo o segundo lugar global em reservas com 25,5% do total mundial (SGB, 2026¹⁰⁶).

A produção beneficiada é amplamente dominada pela Nacional de Grafite Ltda., que opera minas em Itapequerica, Pedra Azul e Salto da Divisa (MG), sendo responsável por 99,2% da arrecadação de CFEM do setor. Outras empresas com atuação relevante incluem a Graphcoa e projetos em desenvolvimento pela *Graph+* (*New Mining*), *South Star Mining* e *Gratomic Inc.*

Os polos de pesquisa e inovação estão concentrados em Minas Gerais, Bahia e Ceará, com foco estratégico na verticalização da produção para o mercado de baterias, incluindo processos de purificação e esferonização. Um marco importante é a planta piloto da Graphcoa no depósito União Baiana (Itagimirim, BA), que iniciou operações experimentais em 2020 com capacidade de 5,5 mil toneladas anuais, visando expansão para 25,5 mil t/ano.

Em termos de volumes, a produção nacional beneficiada atingiu 60kt em 2025, movimentando R\$ 42,3 milhões em produtos de grafita em 2024, tendo como principais destinos os Estados Unidos e a Alemanha, embora ainda mantenha um saldo comercial deficitário devido à importação de produtos de alta tecnologia como a grafita artificial.

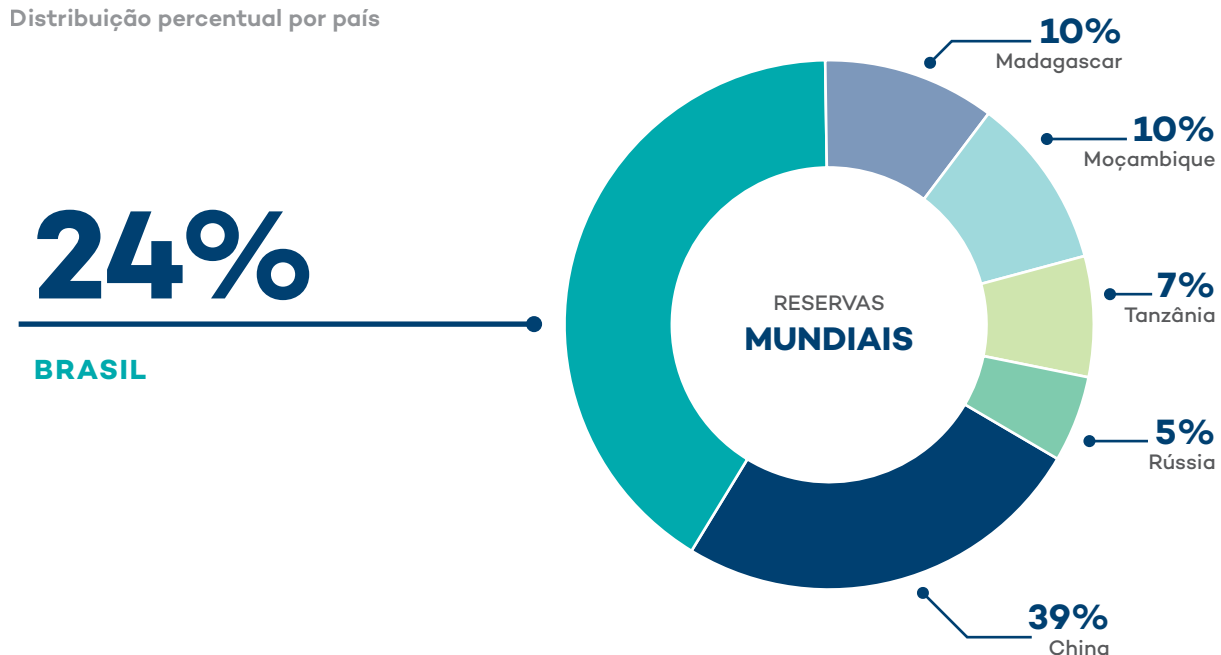
O processo de esferonização é uma intermediária (segmento *midstream*) na cadeia de valor da grafita natural voltada para a fabricação de baterias de íon-lítio. Ele transforma a grafita em flocos (*flakes*) em partículas esféricas para que possam ser utilizadas como material anódico ativo (AAM). O minério bruto (com 3% a 15% de carbono grafítico total - TGC) passa por processos de moagem e flotação para atingir teores de 80% a 95%. Antes ou durante a transformação em esferas, o material deve passar por uma purificação rigorosa para atingir pelo menos 99,95% de pureza, requisito essencial para o desempenho das baterias.

Embora o Brasil possua uma das maiores reservas mundiais de grafita, o processamento avançado, como a esferonização, ainda é considerado embrionário no país. Relatórios estratégicos indicam que o desenvolvimento dessa capacidade em polos como Minas Gerais, Bahia e Ceará é fundamental para que o Brasil deixe de ser apenas um exportador de matéria-prima bruta e passe a integrar a cadeia global de baterias com produtos de maior valor agregado.

106 <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstreams/df8fd3c7-0417-412f-9c72-5a8fe087a2c6/download>

Gráfico 8. Reservas globais de grafita 2025 (%)

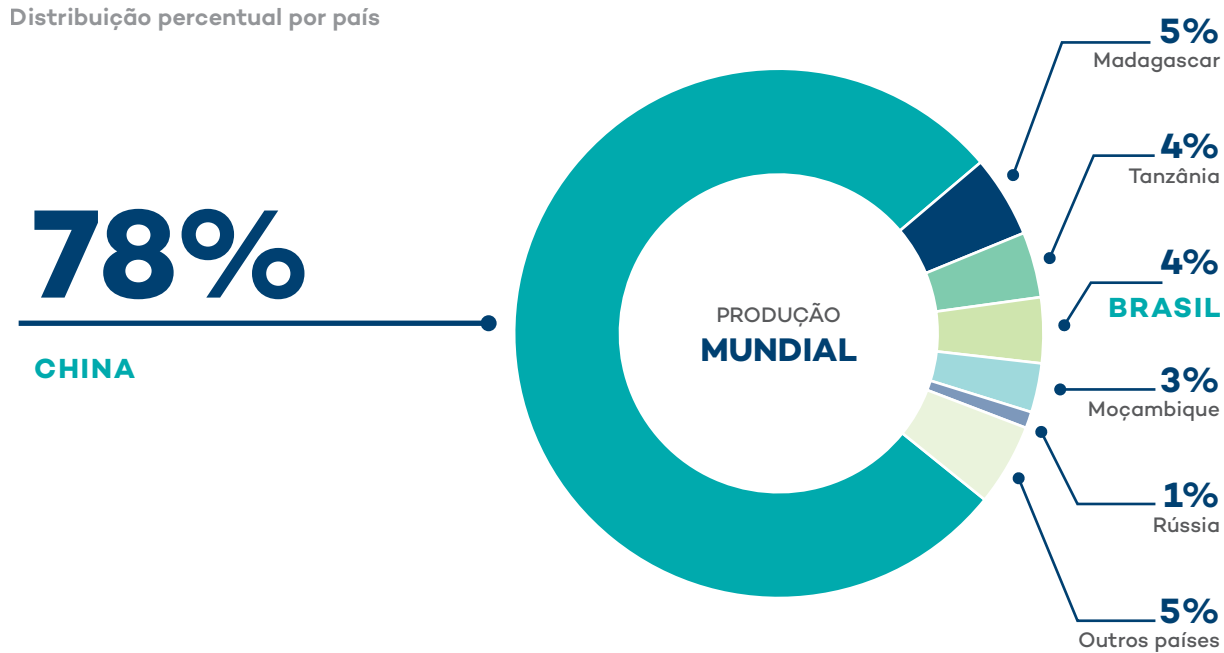
Distribuição percentual por país



Fonte: USG, 2026

Gráfico 9. Produção global de grafita (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: USG, 2026

4.3.7 Lítio

O lítio constitui o mineral com maior projeção de crescimento de demanda no horizonte da transição energética, com estimativas de aumento de até cinco vezes até 2040 (IEA, 2025). O Brasil apresenta expansão acelerada da produção, mas concentra atividades no *upstream*.

O desenvolvimento de baterias nacionais no Brasil está avançando através da integração entre centros de pesquisa, universidades e a indústria, com foco especial na reciclagem e na criação de uma cadeia produtiva completa. Um marco importante é a instalação de uma planta piloto de reciclagem de baterias de íons de lítio no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em São Paulo, fruto de uma parceria entre o laboratório Larex da USP e a empresa Tupy. Essa unidade utiliza uma técnica inédita de hidrometalurgia flexível, capaz de recuperar substâncias químicas de diversos tipos de baterias disponíveis no mercado com um nível de pureza de cerca de 90%.

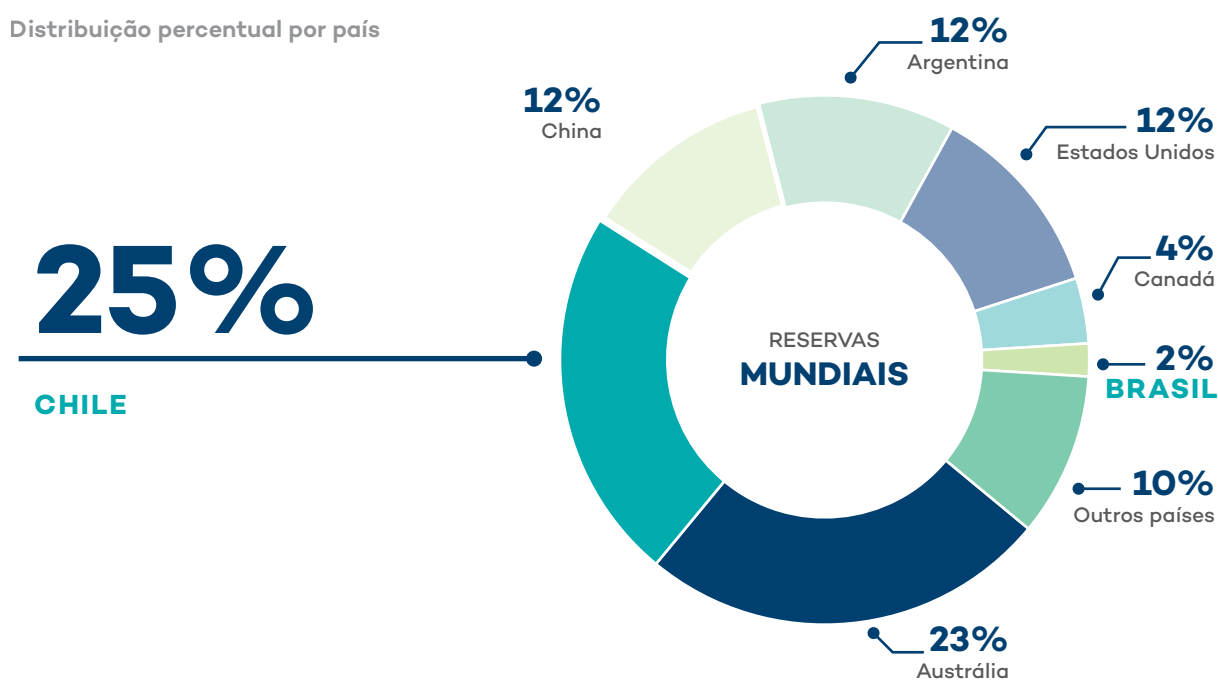
Este esforço de reciclagem está diretamente ligado à produção de células novas: os materiais recuperados na unidade do IPT serão destinados à primeira planta piloto nacional de produção de baterias de íons de lítio, que está atualmente em fase de construção. Além da USP, o *Center for Advanced and Sustainable Technologies* (Cast) da Unesp também desenvolve rotas tecnológicas inovadoras, como o uso de reagentes orgânicos e água em condição supercrítica para minimizar o impacto ambiental na recuperação de metais como lítio e cobalto. Essas pesquisas contam com a colaboração de diversas universidades federais, como a UFMG, UFG e a Unicamp.

A criação dessas infraestruturas é considerada essencial para que o Brasil deixe de ser apenas um exportador de concentrado mineral e passe a verticalizar a produção nacional. Do ponto de vista da sustentabilidade, baterias que utilizam insumos reciclados por hidrometalurgia apresentam uma pegada de carbono cerca de 30% menor do que aquelas fabricadas com minerais virgens. Embora empresas como a AMG Brasil já operem uma cadeia de valor que inclui baterias de lítio em estado sólido, essa etapa de refino e fabricação final ocorre atualmente em sua estrutura na Alemanha. Assim, o fortalecimento de polos experimentais de reciclagem e produção local é visto como a pré-condição para consolidar a soberania brasileira na geopolítica dos minerais críticos.

No Brasil, o apoio técnico e científico é fundamental para o setor. O principal nome é o CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, que desenvolve rotas tecnológicas para extração e beneficiamento, bem como realiza estudos sobre economia mineral, economia circular e mineração urbana. Instituições relevantes no cenário científico são: o CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear): Atua em parcerias para análise e purificação de minerais; Universidades Federais (UFMG, UFV e USP): Frequentemente colaboram em projetos de inovação e sustentabilidade no “Vale do Lítio”, o SENAI Cimatec: Conhecido pelo suporte em plantas piloto e escala industrial.

Gráfico 10. Reservas globais de lítio (%)

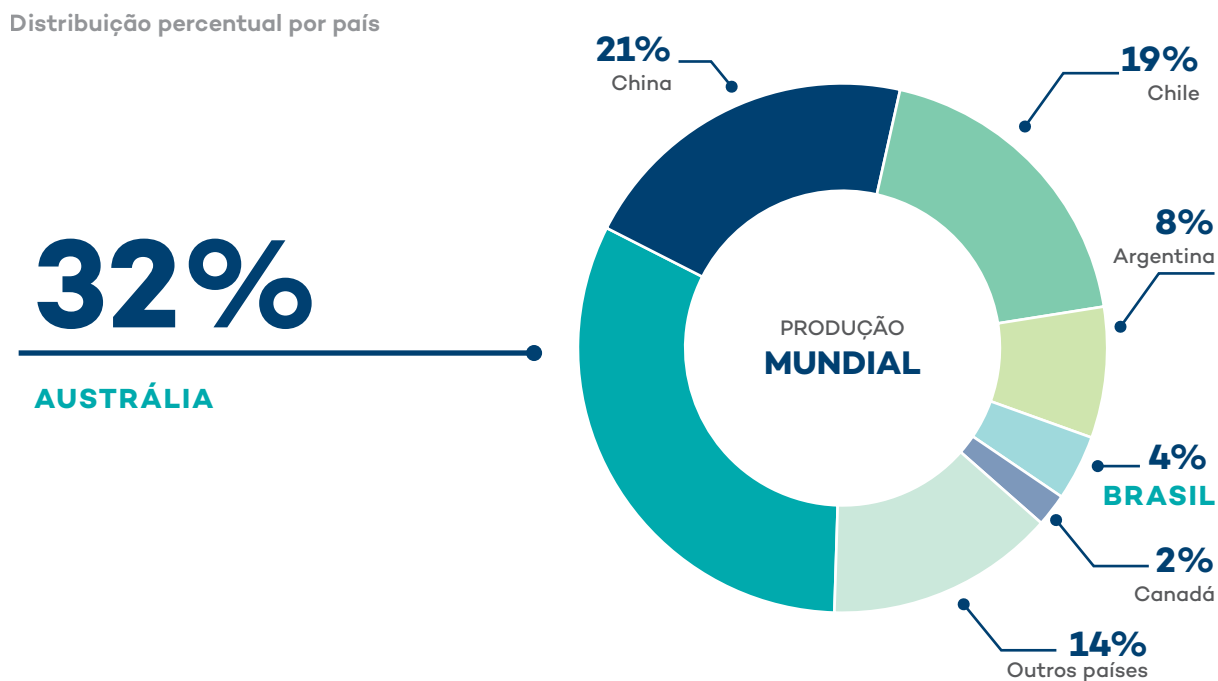
Distribuição percentual por país



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da ANM e USGS, 2026.

Gráfico 11. Produção global de lítio (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da ANM e USGS, 2026.

4.3.8 Nióbio

Embora o Brasil domine amplamente o setor, sendo responsável por mais de 90% da produção mundial, outros países também participam ou possuem potencial para competir no mercado de nióbio:

- Canadá: É o segundo maior player do mercado global, detendo aproximadamente 8% da produção mundial. A principal empresa atuante é a Niobec, localizada na província de Quebec.
- Austrália: É o terceiro país que participa ativamente do mercado global hoje. Possui reservas importantes na província da Austrália Ocidental.
- Países com produção menor (dados de 2022):
- República Democrática do Congo: Produziu cerca de 600 toneladas.
- Rússia: Produziu 450 toneladas, com jazidas situadas na Sibéria e na República da Yakútia.
- Ruanda: Registrou uma produção de 210 toneladas.

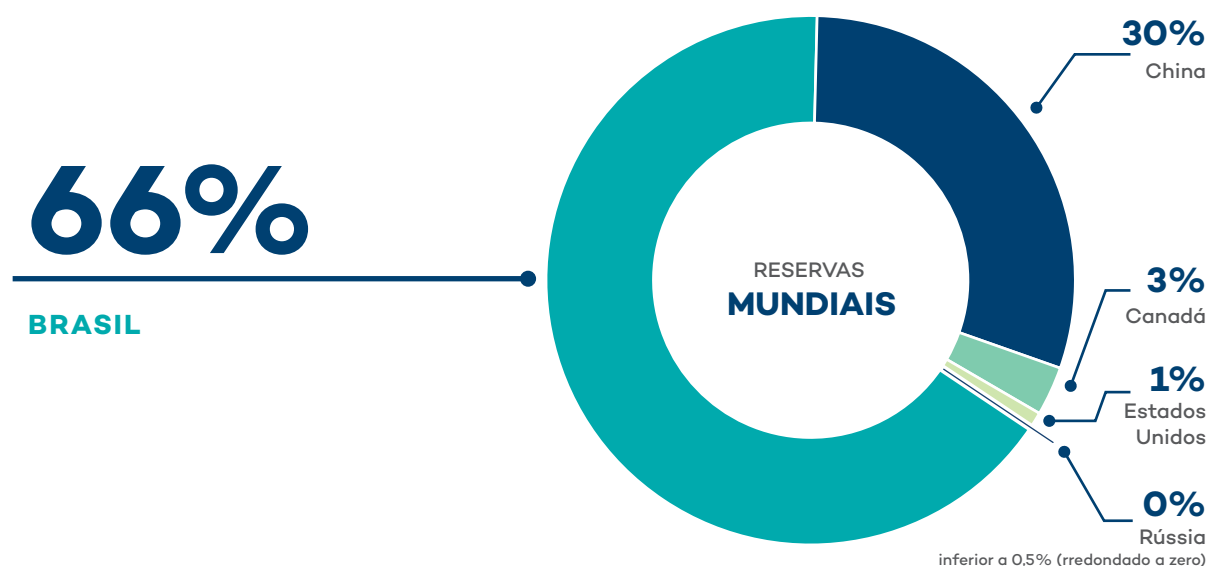
Diferentemente das edições anteriores do Sumário Mineral americano (USGS, 2026), a China foi listada pela primeira vez no documento e apresenta-se como detentora de 30% das reservas globais de nióbio e com uma pequena produção. Trata-se do depósito de Bayan Obo, sendo classificado como um potencial entrante ou produtor em menor escala.

Além dos produtores atuais, existem 85 jazidas quantificadas no mundo e diversos países com potencial de exploração ou projetos em diferentes estágios de desenvolvimento. Os Estados Unidos possuem reservas identificadas, mas sem produção significativa registrada recentemente. Outras regiões com potencial produtivo são: Angola, Arábia Saudita, Gabão, Tanzânia, Nigéria, Malawi, Etiópia, Finlândia e o território da Groenlândia (Dinamarca).

Atualmente, o mercado é altamente concentrado, com três empresas controlando mais de 95% da oferta: a brasileira CBMM, a chinesa CMOC (que opera em Goiás) e a canadense Niobec.

Gráfico 12. Reservas globais de nióbio (2025) (%)

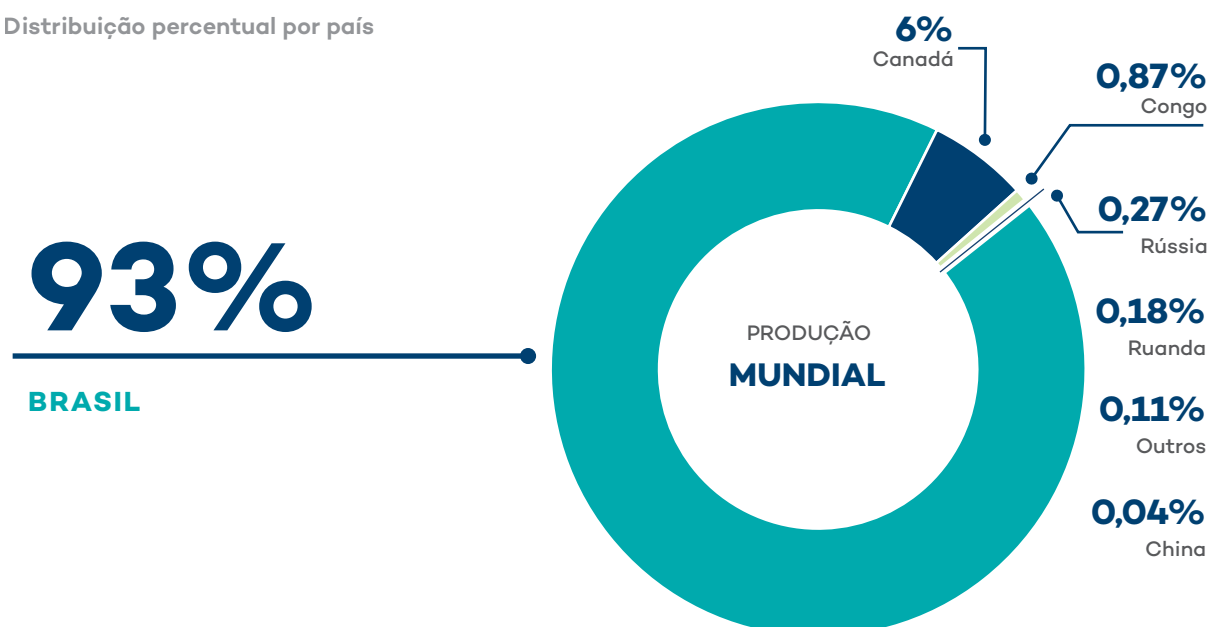
Distribuição percentual por país



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da ANM e USGS, 2026.

Gráfico 13. Produção global de nióbio (2025) (%)

Distribuição percentual por país



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da ANM e USGS, 2026.

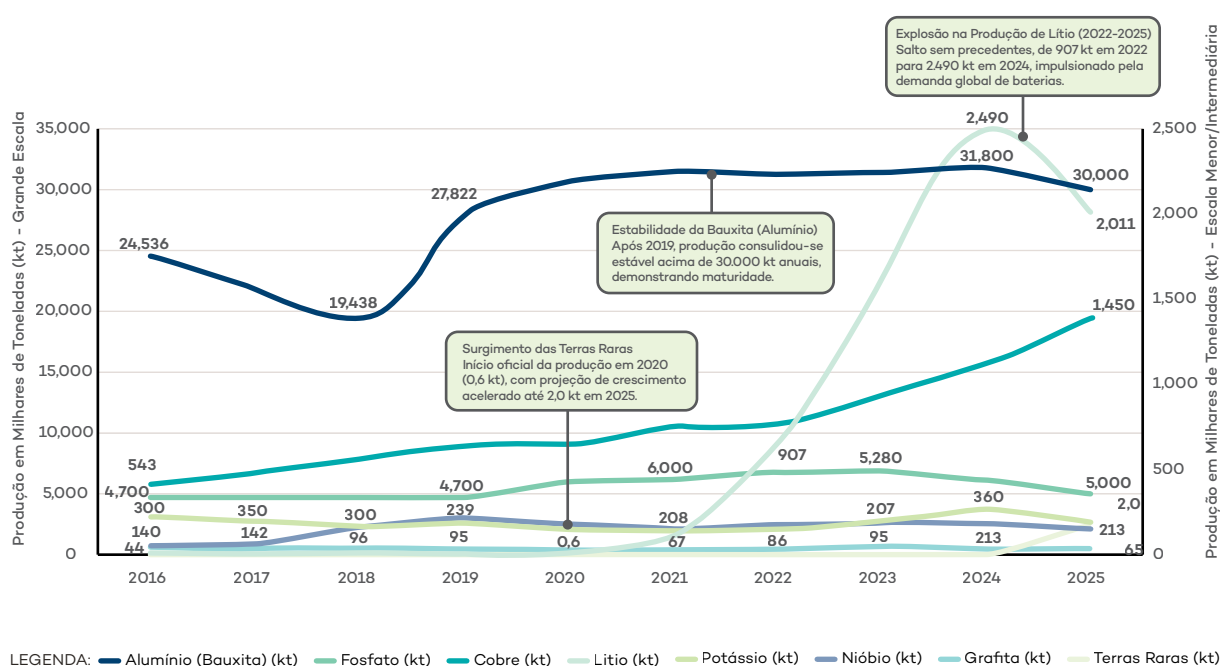
4.4 Aspectos da produção mineral nacional

Foi avaliada a produção dos minerais prioritários identificados nas bases oficiais da Agência Nacional de Mineração (ANM) e do Serviço Geológico Americano (USGS). A Figura 41 evidencia o panorama da produção mineral na última década e algumas observações importantes podem ser destacadas. A série temporal permite avaliar reflexos da pandemia de Covid-19, com possíveis efeitos na cadeia do alumínio que apresentou importante queda entre os anos de 2020 e 2021, após uma sequência de aumentos entre 2018 e 2020. Os materiais com potencial de recuperação de valor a partir de fontes secundárias tiveram um grande impacto com a crise global de suprimento neste período. O potássio também apresentou tendência de queda, estabilizando apenas em 2024. Possível reflexo da dependência da importação.

Diferente de indústrias especializadas na extração, concentração e exportação apenas de matéria-prima, o modelo integrado foca em transformar recursos em produtos industrializados e tecnologia com maior valor agregado. A relevância da integração também reside em sua capacidade de resistir a desafios globais, como o avanço das importações e as tensões comerciais decorrentes de conflitos geopolíticos.

A análise da produção mineral nacional para os minerais prioritários revela padrões distintos de crescimento, estabilidade e declínio ao longo da última década motivados por efeitos de mercado, especificidades técnicas ou inovações tecnológicas, reforçando a importância de se direcionar estratégias diferenciadas para as tipologias minerais.

Figura 38. Panorama da produção mineral no Brasil (2016-2025).



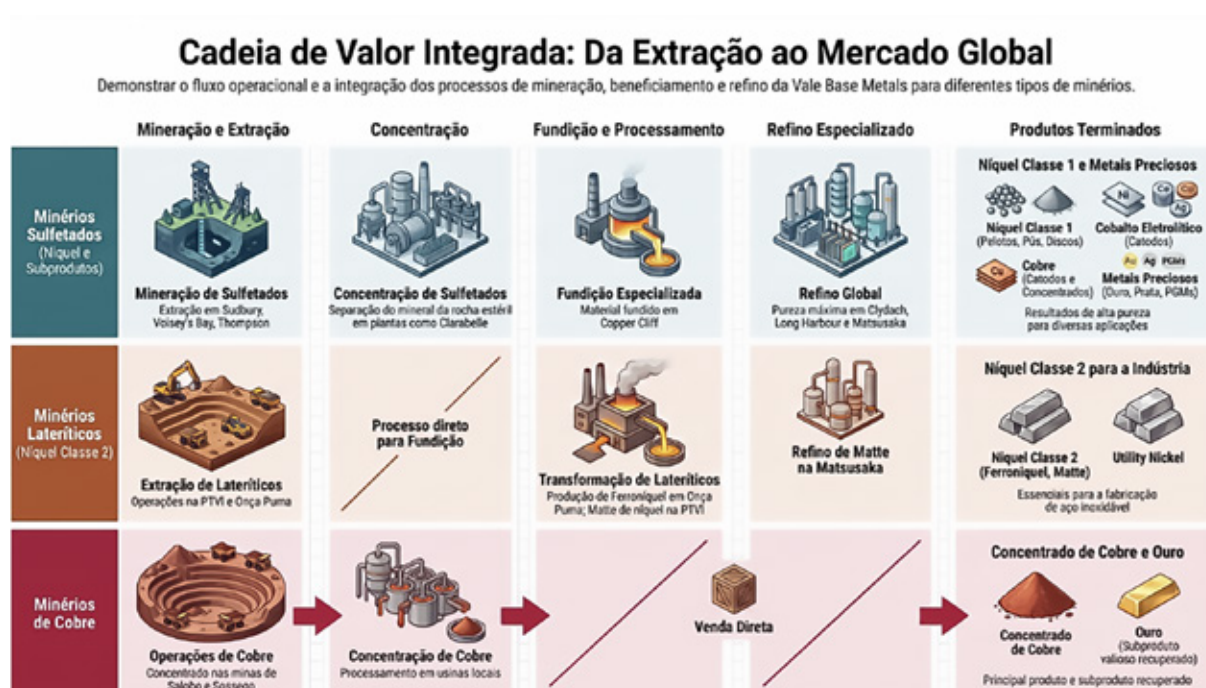
Fontes: Elaborado a partir de dados da ANM e USGS para a série decenal analisada.

A série histórica permite identificar os efeitos de eventos macroeconômicos e geopolíticos sobre as cadeias produtivas, bem como avaliar a resiliência de cada cadeia frente a choques de demanda e suprimento (Figura 38).

Minerais como cobre e lítio representam um potencial significativo para a cadeia nacional, não refletido em dotação mineral expressiva em comparação com outros países. Por outro lado, grafita, nióbio, terras raras e alumínio conseguem unir dotação e potencial produtivo. O lítio, por sua vez, apresentou acentuado crescimento refletindo o aumento do lucro líquido experimentado pela empresa CBL no período.

A Figura 39, a seguir, apresenta exemplos de integração da cadeia de valor e o panorama da produção decenal dos minerais analisados.

Figura 39. Cadeia de valor integrada



Fonte: Elaborado a partir de <https://valebasemetals.com/pt/nossos-produtos/cobre/>





5. POLÍTICAS PÚBLICAS E A GESTÃO DOS MCE NO BRASIL

A transição do posicionamento do Brasil, de exportador de matérias-primas para fornecedor global competitivo de bens semimanufaturados e manufaturados, requer a estruturação de políticas públicas com ações coordenadas de curto, médio e longo prazo. Diferentes requisitos se apresentam nas esferas global, regional e local. Estabelecer o eixo comum a essas esferas de abrangência e os requisitos específicos nacionais pode tornar as estratégias públicas e privadas mais efetivas e harmônicas, desta forma, possibilitando ganhos de longo prazo para a extração e transformação mineral sustentáveis.

Com rica e diversificada dotação geológica e potencial vocação industrial fundamentada em matriz elétrica verde, o país deve priorizar estratégias adaptadas aos requisitos nacionais. Enquanto a maior parte dos países industrializados foca em arcabouço legal e normativo pautado na garantia do fornecimento de insumos minerais, na estruturação de redes de estocagem e na realização de parcerias comerciais no elo *upstream*, os países detentores de reservas minerais precisam investir em processo de industrialização, fortalecendo os estágios *midstream* e *downstream* na cadeia de valor.

Neste sentido, outras empresas, para além do setor mineral, passam a integrar a visão estratégica e precisam ser mapeadas para o estabelecimento de ações e responsabilidades, com melhor alinhamento do planejamento estratégico, tático e operacional. Cabendo ao poder público estabelecer e discutir com o setor privado os requisitos estratégicos e alinhamento de eixos táticos.

5.1 Eixos estratégicos

Os eixos estratégicos para a consolidação das políticas públicas na gestão dos minerais críticos e estratégicos consistem em um conjunto de medidas de curto, médio e longo prazo. Os eixos propõem a compatibilização entre as diretrizes estabelecidas no âmbito das políticas de Estado

e os requisitos geopolíticos, geoeconômicos, tecnológicos, sociais e ambientais que orbitam o processo decisório. A seguir, apresenta-se a estrutura dos eixos e exemplos de tópicos.

EIXO 1 – Estratégico

Estruturante: planejamento de longo prazo com efeitos amplos e profundos e base consistente

- Elaboração da Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (Projetos de Lei nº2.780/2024 e 4.443/2025);
- Direcionamento da política mineral para as metas do Nova Indústria Brasil (NIB), que foca em digitalização, automação e transição ecológica, induz o desenvolvimento de tecnologias locais para transformar minérios em ligas avançadas e insumos para baterias;
- Estruturação de planos de industrialização do setor com incentivos para orientação de incentivos e investimentos para as cadeias de minerais críticos e estratégicos prioritários;
- Estruturação de planos de desenvolvimento sustentável do setor mineral considerando a demanda mineral, a gestão ambiental e a segurança social de territórios e saberes;
- Estruturação de planos de Zoneamento Territorial para prevenção e mitigação de conflitos;
- Fortalecer os programas de transição energética, consolidando o protagonismo da matriz elétrica sustentável.

Indutor: estruturação de instâncias tático-operacionais para ações de longo prazo

- Revisão do Plano Nacional de Mineração (PNM);
- Definição do escopo e responsabilidades setoriais conforme abrangência governamental, empresarial, acadêmica e outras;
- Promover a integração das cadeias de valor (setor mineral e adjacentes);
- Elaboração e implementação de mecanismos para atração de indústrias para os diferentes elos da cadeia de valor mineral;
- Estabelecimento de parcerias público-privadas.

EIXO 2 – Tático

Motor: medidas de médio prazo para apoiar a operacionalização das políticas públicas

- Elaboração da Estratégia Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos;
- Definição de metas e prazos para a industrialização do setor em alinhamento com os planos governamentais e fortalecimento da vocação da indústria mineral brasileira;
- Estabelecimento de mecanismos para a integração das cadeias de valor (setor mineral e adjacentes);
- Estabelecer os princípios da Diplomacia Mineral para posicionar o Brasil como um parceiro confiável para nações que buscam diversificar suas cadeias de suprimento fora da Ásia, incentivando a instalação de unidades produtivas;
- Definição de mecanismos de precificação dos minerais verdes;
- Elaboração de Plataforma para Mineração Urbana (Ex.: UMP¹⁰⁷).

Alavanca: estratégias de médio prazo para impulsionar a cadeia de valor mineral nacional

- Harmonização de regulamentações para a cadeia de valor (Ex.: Política Mineral, Política Industrial, Plano Clima, Plano de Transição Energética e outros);
- Planejamento coordenado de infraestrutura;
- Incentivo à aplicação estratégica da Lei do Bem (Lei nº11.196/2005) para ampliar o número de empresas que investem em pesquisa e inovação tecnológica;
- Implementação do Certificado Mineral de Baixo Carbono (CMBC) proposto pelo Projeto de Lei nº2.780/2024;
- Estabelecer e ampliar linhas de financiamento por meio de editais da Finep e do BNDES, como o “FIP Minerais Estratégicos”.

Consolidação: medidas de médio prazo com efeitos compatíveis com as metas setoriais

- Revisão e atualização periódica da lista de minerais críticos e estratégicos;
- Plano de financiamento;
- Estruturação de mecanismos para formação de demanda;

107 <https://www.urbanmineplatform.eu/>

- Incentivo a projetos para aumento da competitividade;
- Definição de parâmetros para precificação de minerais verdes;
- Aplicação de instrumentos de incentivo econômico;
- Estruturação e integração de plataformas de dados do setor.

EIXO 3 – Operacional

Operacional: medidas de curto prazo revisitadas a cada ciclo

- Identificação e redução de vulnerabilidades (Ex.: infraestrutura, transporte, fornecimento de energia, fornecimento de água e riscos socioambientais);
- Viabilizar oportunidades por meio de ações específicas direcionadas às cadeias de valor (Ex.: investimentos em PD&I, incentivos econômicos, digitalização, etc);
- Mecanismos de proteção de territórios e saberes tradicionais;
- Formação e capacitação de mão de obra por meio de parcerias público-privadas;
- Elaboração e divulgação de material informativo para a sociedade (Ex.: bibliotecas virtuais, campanhas, etc.).

Monitoramento e rastreabilidade: acompanhamento e avaliação periódicos da efetividade das ações empreendidas

- Implementação de auditorias periódicas;
- Desenvolvimento e implementação de sistemas digitais de monitoramento;
- Revisão e atualização do Plano Decenal de Mapeamento Geológico - PlanGeo108
- Revisão e atualização dos Painéis Interativos para Dados Econômicos do Setor Mineral¹⁰⁹
- Avaliação periódica de políticas públicas para o setor

108 https://www.sgb.gov.br/mapeamento_geologico/plangeo.html

109 <https://www.gov.br/anm/pt-br/anm-lanca-paineis-interativos-para-dados-economicos-do-setor-mineral>

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição energética global e a digitalização da economia oferecem ao Brasil uma janela de oportunidade sem precedentes para converter sua dotação geológica em uma vocação industrial consolidada. O cenário que se apresenta possui unidades industriais públicas e privadas, nacionais e internacionais, coexistindo em um ecossistema voltado para a industrialização nacional, que passam a requerer clareza na definição das políticas públicas e instrumentos de gestão.

Considerando as especificidades do mercado nacional, o parque industrial instalado, a dotação mineral e o nível de integração da cadeia de valor mineral, o país necessita estabelecer as diretrizes para abraçar o desafio enfrentado pelas principais potências mineradoras: **avançar com a extração e transformação mineral, ao mesmo tempo, priorizando o respeito aos requisitos socioambientais das regiões produtoras, territórios e povos tradicionais.** Este desafio se concentra no estágio *upstream* da cadeia de valor, podendo se estender ao longo da cadeia de valor, e exige definições de ordem política para ser solucionado. A prioridade consiste na avaliação de indicadores estabelecidos e pautados nos requisitos estratégicos para o país.

A identificação de minerais prioritários é o pilar para o direcionamento eficiente de investimentos e políticas públicas, permitindo que o país supere o modelo puramente extrativista, alcançando o protagonismo tecnológico e industrial em conformidade com os requisitos socioambientais.

Os minerais analisados apresentam importância técnica e econômica para setores produtivos avançados, como o setor agropecuário, farmacêutico e aeronáutico, mas também setores que ainda se encontram em baixo grau de maturidade tecnológica, como é o caso da eletrificação da mobilidade, imãs permanentes e baterias de última geração.

Em suma, a estratégia nacional deve alinhar a gestão mineral aos planos governamentais como a Nova Indústria Brasil (NIB), o Plano Clima e o PNM 2050, garantindo que o setor mineral seja o motor da reindustrialização verde e tecnológica do país. Assim, a consolidação de uma estratégia soberana exige a adoção de uma metodologia própria, como **o Índice para Estratégia e Densidade Mineral (IEDM)**, que reconheça a realidade do Brasil tanto como grande produtor quanto como dependente de certos insumos.

Diferente das metodologias internacionais da União Europeia, do Reino Unido ou dos Estados Unidos, o IEDM introduz o eixo da Densidade Produtiva. Essa adaptação aos requisitos nacionais é fundamental para evitar que minerais nos quais o Brasil já é líder mundial, como o nióbio, alumínio e o ferro, sejam erroneamente classificados como minerais críticos, negligenciando o potencial de agregação de valor e a proteção de ativos estratégicos que definem a inserção do país nas cadeias globais. A metodologia proposta permite distinguir entre o fomento a minerais emergentes, como o lítio e terras raras, e a manutenção de dotações consolidadas, garantindo que as políticas públicas de financiamento e incentivo sejam calibradas para a vocação industrial real de cada cadeia.

A integração da mineração urbana como o elo de recuperação (recovery) na cadeia de valor é indispensável para garantir a resiliência do suprimento e a sustentabilidade da reindustrialização verde. O Brasil deve avançar além do *upstream* (lavra e beneficiamento) para fechar o ciclo de materiais, utilizando a recuperação de fontes secundárias para reduzir a pegada de carbono da produção, que no caso de baterias recicladas pode ser até 30% inferior à de fontes virgens. O incentivo à mineração urbana — através do reaproveitamento de resíduos industriais, eletrônicos e sucatas metálicas — não apenas mitiga a dependência externa de minerais como potássio e fosfato, mas também gera empregos qualificados e promove a inovação tecnológica no *midstream* e *downstream*. Ao alinhar a gestão mineral aos princípios da economia circular e aos planos governamentais como a Nova Indústria Brasil (NIB) e o Plano Clima, o país converte sua dotação geológica em uma infraestrutura industrial resiliente, capaz de enfrentar as instabilidades geopolíticas globais enquanto lidera a oferta de minerais com baixo impacto ambiental

7. REFERÊNCIAS

ABDALLAH, S. 9.17 – Silicon. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**: 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 59–60.

ARBACHE, J. Powershoring. **Development Bank of Latin America and the Caribbean (CAF)**, 2022. Disponível em: <https://www.caf.com/en/blog/powershoring/>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BANCO MUNDIAL. **Distribuição do PIB por setores da economia**. 2021.

BRASIL. **Decreto nº10.657, de 24 de março de 2021**. Política Pró-Minerais Estratégicos. Diário Oficial da União, Brasília, 2021.

BRASIL. **Lei Complementar nº214, de 16 de janeiro de 2025**. Imposto Seletivo. Diário Oficial da União, Brasília, 2025.

BRASIL. **Lei Complementar nº87, de 13 de setembro de 1996**. Lei Kandir. Diário Oficial da União, Brasília, 1996.

BRASIL. **Lei nº11.196, de 21 de novembro de 2005**. Lei do Bem. Diário Oficial da União, Brasília, 2005.

BRASIL. **Lei nº13.540, de 18 de dezembro de 2017**. Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM). Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

BRASIL. **Lei nº15.042, de 2024**. Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases do Efeito Estufa (SBCE). Diário Oficial da União, Brasília, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm. Acesso em: 30 jul. 2026.

BRASIL. **Projeto de Lei nº2.780, de 2024**. Câmara dos Deputados/Senado Federal, 2024. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=10217621>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BRASIL. **Projeto de Lei nº4.443, de 2025**. Senado Federal, 2025. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/170309>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BRASIL. **Resolução CTAPME nº2, de 2021**. Lista brasileira de minerais estratégicos. Ministério de Minas e Energia, 2021b.

BRASIL. **Plano Nacional de Mineração 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2011.

BRASIL. **Plano Nova Indústria Brasil (NIB)**. Brasília: Governo Federal, 2024a.

CABRAL NETO, I. 9.7 – Lithium. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**. 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 36–37.

CABRAL NETO. **Panorama do potencial de minerais críticos e estratégicos do Brasil**: edição 2026. Serviço Geológico Brasileiro (SGB), 2026. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/items/3e73d5fb-3cf7-4d62-885c-cf0d303a4bec>. Acesso em: 30 jul. 2026.

CAPELLO, R. *et al.* Shifting production, shifting returns: *nearshoring* and functional income redistribution. **International Economics**, 2026. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.inteco.2026.100703>.

CARBALLO, A. E.; DAVAS-FAHEY, R.; HILL, C. **Digging deeper**: understanding the global Chinese mining sector. Transparency International, 2024. Disponível em: https://transparency.org.au/wp-content/uploads/2024/11/Digging-Deeper_Global-Chinese-Mining-Sector_2024.pdf. Acesso em: 30 jul. 2026.

CARNEIRO, J. S. M.; Melo, A. G. 9.12 – Niobium. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**. 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 47–48.

CHEMALE, L. T.; Guerra, G. I.T.; Siqueira, V. F. 9.16 – Rare Earth Elements. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**. 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 56–58.

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the Commission**: the raw materials initiative — meeting our critical needs for growth and jobs in Europe. COM(2008) 0699 final. Bruxelas, 2008. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:en:PDF>. Acesso em: 30 jul. 2026.

EUROPEAN COMMISSION. **Contribuição da recuperação de minerais para atender à demanda de materiais na Europa** (taxa de reciclagem de produtos). 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **Study on the critical raw materials for the EU**. 2023.

EUROPEAN UNION. **European Critical Raw Materials Act. 2024**. Disponível em: https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/europe-an-critical-raw-materials-act_en. Acesso em: 30 jul. 2026.

GOODENOUGH, K. M.; WALL, F.; MERRIMAN, D. The rare earth elements: demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. **Natural Resources Research**, v. 27, n. 2, p. 201-216, 2018.

GRAEDEL, T. E.; NASSAR, N. T.; RECK, B. K. Criticality of metals and metalloids. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 14, p. 4257-4262, 2015. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1500415112>. Acesso em: 30 jul. 2026.

HAY, D. Industrial policy in Brazil: a *framework*. Texto para discussão nº551. Rio de Janeiro: IPEA, 1998. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/6719873a-655d-4efc-8fa-9-20afd4b57746/content>. Acesso em: 30 jul. 2026.

HUND, K. *et al.* **Minerals for climate action**: the mineral intensity of the clean energy transition. Washington, DC: World Bank Group, 2020.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Anuário mineral brasileiro**. Brasília: IBRAM, 2025.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório anual de atividades do setor mineral**. Brasília: IBRAM, 2024a.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global critical minerals outlook 2025**. Paris: IEA, 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global critical minerals outlook 2026** – analysis. Paris: IEA, 2026. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/2831e0dc-f030-4d14-985c-d26d1af4430f/GlobalCriticalMineralsOutlook2026.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2026.

KALISKY, Y. **China's takeover of global minerals market**. The Institute for National Security Studies, 2025. Disponível em: https://www.inss.org.il/social_media/chinas-takeover-of-the-global-minerals-market/. Acesso em: 30 jul. 2026.

LÈBRE, É. *et al.* The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. **Nature Communications**, v. 11, artigo 4823, 2020.

LIMA, R. B.; Rios, S. F. 9.3 – Copper. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**. 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 26–27.

LORETI JÚNIOR, R. 9.1 – Aluminum. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**. 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 22–23.

MANFREDI, T. R.; Cunha, I. A. 9.13 – Phosphate. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**. 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 49–51.

MATOS, D. R. 9.5 – Graphite. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**: 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 31–32.

MINDREAU, M. **A armadilha das commodities**: minerais críticos, política industrial e a trajetória brasileira (2010-2025). 2025.

MOTTA, M. B. 9.15 – Potash. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**: 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 54–55.

MUDD, G.; JOSSO, P.; SHAW, R.; LUCE, A.; SINGH, N.; HORN, S.; BIDE, T.; CURRIE, D.; ELLIOTT, H.; GRANT, H.; HALKES, R.; IDOINE, N.; MITCHELL, C.; WATKINS, I.; PRICE, F.; PETAVRATZI, E. **2024 UK criticality assessment**. Nottingham, UK: British Geological Survey, 2024. 313 p. (OR/24/059). Disponível em: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/539735/1/OR24059.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2026.

OWEN, J. R. *et al.* Energy transition minerals and their intersection with land-connected peoples. **Nature Sustainability**, v. 6, p. 203–211, 2023.

PERES, W.; PRIMI, A. Industrial policy and learning: lessons from Latin America. In: OQUBAY, A.; OHNO, K. (Eds.). **How nations learn**: technological learning, industrial policy, and catch-up. Oxford: Oxford Scholarship Online, 2019. p. 207–234.

Queiroz, L. C. 9.11 – Nickel. In: Geological Survey of Brazil. **An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil**: 2026 edition. [S.l.]: CPRM, 2026. p. 44–45.

ROCHA, A.; DA FONSECA, L. N. M.; KOGUT, C. S. Deciphering relocation paths: a systematic literature review of near-shoring and friend-shoring. **Journal of International Management**, v. 31, n. 5, artigo 101282, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intman.2025.101282>.

ROSENTAL, R. **Terras raras**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1140/1/36%20TERRAS%20RARAS%20ok.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2026.

SCHRIJVERS, D. *et al.* A review of methods and data to determine raw material criticality. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, artigo 104617, 2020.

WATARI, T.; NANSAI, K.; NAKAJIMA, K. Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, artigo 104669, 2020.

XAVIER, L. H. *et al.* Cadeia de valor e mineração urbana de minerais críticos e estratégicos. **Estudo CETEM**, 2023.

XAVIER, L. H.; LINS, F. A. F. **Minerais críticos e estratégicos: cadeia de valor e reciclagem**. Rio de Janeiro: CETEM, 2018.

ZHOU, W. Resource geopolitics. **East Asia Forum Quarterly**, v. 18, n. 1, 2026. DOI: <https://doi.org/10.59425/eabc.1772532000>.



/InstitutoBrasileirodeMineracao



/ibrammineracao



@ibram_mineracao



InstitutoBrasileirodeMineração/videos



<https://ibram.org.br>



ibram@ibram.org.br

O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), uma organização nacional privada, sem fins lucrativos e com mais de 300 associados, representa as empresas e instituições que atuam no setor mineral.

Para saber mais acesse o link ou QR Code ao lado:

<https://ibram.org.br/associados/>



