

**FREDERICO CAMPOS REGAZONI TORQUATO**

**SUSTENTABILIDADE NO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE  
MINERAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE AS DIFERENTES  
TÉCNICAS**

**CAMPINAS-SP**

**2022**

FREDERICO CAMPOS REGAZONI TORQUATO

**SUSTENTABILIDADE NO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE  
MINERAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE AS DIFERENTES  
TÉCNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Sustentabilidade (PPGS) do Centro de Economia e Administração (CEA) da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-CAMPINAS) como requisito parcial para a para a obtenção do título de Mestre em Sustentabilidade.

**Área de Concentração:** sustentabilidade  
**Linha de Pesquisa:**Planejamento, Gestão e Indicadores de Sustentabilidade

**Orientador:** Prof. Dr. Marcos Ricardo Rosa Georges

CAMPINAS-SP

2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada por Adriane Elane Borges de Carvalho CRB 8/9313  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

339.5  
T687s

Torquato, Frederico Campos Regazoni

Sustentabilidade no reaproveitamento de rejeitos de mineração: uma revisão sistemática sobre as diferentes técnicas / Frederico Campos Regazoni Torquato. - Campinas: PUC-Campinas, 2022.

97 f.: il.

Orientador: Marcos Ricardo Rosa Georges.

Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Centro de Economia e Administração, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

Inclui bibliografia.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Rejeitos - Resíduos. 3. Governança. I. Georges, Marcos Ricardo Rosa. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Economia e Administração. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade. III. Título.

CDD - 22. ed. 339.5

**FREDERICO CAMPOS REGAZONI TORQUATO**

SUSTENTABILIDADE NO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE AS DIFERENTES TÉCNICAS

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Sustentabilidade da PUC-Campinas, e aprovada pela Banca Examinadora.

APROVADA: 16 de dezembro de 2022.



---

Prof. Dr. Marcos Ricardo Rosa Georges  
(Orientador- PUC-CAMPINAS)



---

Prof. Dr. Samuel Carvalho De Benedicto  
(PUC-CAMPINAS)



---

Prof. Dr. Admilson Írio Ribeiro  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)

## DEDICATORIA

Dedico a minha querida esposa Paola Regazoni Torquato pelo apoio incondicional e em todos os aspectos durante todo o período acadêmico.  
Sem você este trabalho não seria possível.

## AGRADECIMENTOS

Ao Pai Criador por tudo! À luz que pairou sobre a minha criatividade que me permitiu visualizar esta oportunidade e aproveitá-la de forma tão acertada. À minha esposa amada, Paola pelo incentivo de cada dia e em todos os aspectos do saber, fortalecendo-me a cada momento de necessidade.

Aos meus pais, Hilda e Marcio pela torcida de cada dia e pela presença diária mesmo que em pensamentos durante toda esta jornada.

Ao Prof. Dr. Samuel Carvalho de Benedicto que a época Coordenador do Mestrado, mostrou o caminho e com suas sábias palavras me manteve nos trilhos deste desafio.

Ao Prof. Dr. Marcos Ricardo Rosa Georges pelos ensinamentos. Às vezes vacilante, precisei voltar atrás, recuar, repensar recalcular a rota e ressignificar o propósito, e ele, atento, orientou de forma cirúrgica sempre que necessário.

À banca examinadora pelas contribuições sugeridas na qualificação, Prof. Dr. Samuel Carvalho de Benedicto e ao Prof. Dr. Admilson Írio Ribeiro.

Ao amigo Walef Guedes pela disponibilidade de sempre em ajudar, ensinar e mostrar o caminho.

À FFA Legal & Support for Mining Companies pelo incentivo e flexibilidade. Ao meu filho Caetano pelas noites de sono mal dormidas no sofá da sala.

A todo corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade que provocaram e fomentaram um olhar denso e profundo sobre a temática.

Vocês todos foram essenciais para esta conquista!

## RESUMO

A produção de rejeitos de mineração se encontra em um limite crítico, tendo em vista a ampliação do consumo de produtos com exigências tecnológicas que demandam maior quantidade de recursos minerais, ao mesmo tempo em que a produtividade das minas cai de maneira consistente e gera maior volume de rejeitos por quantidade de material lavrado. Nesse contexto, delinea-se o objetivo principal desta dissertação, como sendo: analisar as principais alternativas de aproveitamento de rejeitos minerais e discutir suas contribuições para a promoção da sustentabilidade. O método utilizado é a revisão sistemática da literatura com apoio de análises semântica automatizada e de conteúdo. A revisão sistemática da literatura utilizou o método PICO (população, intervenção, comparação e desfecho) para definir os argumentos de busca, que foram: mineração, rejeito, reaproveitamento ou reciclagem e sustentabilidade. A pesquisa foi feita na base Web of Science e retornou 50 resultados que, após análise, foram selecionados 36 artigos que foram submetidos a análise de conteúdo. A análise de conteúdo retornou 12 agrupamentos, que são: i) Governança ambiental, ii) Emprego na construção civil, iii) Modelagem produtiva integrada, iv) Bioextração e fitomineração, v) Recuperação de terras raras e outros minerais, vi) Reciclagem das águas, vii) Produção de cimento, viii) Sequestro de gases de efeito estufa (GEE), ix) Depósito de energia, x) Geração de energia geotérmica, xi) Descarte subaquático, xii) Aterro de minas. Dos 12 agrupamentos, os 6 primeiros e mais relevantes foram objeto de análise. Os resultados apontam a integração produtiva entre as plantas de mineração e a indústria de construção civil como a melhor alternativa para a disposição de rejeitos de mineração. Além disto, são propostos indicadores de sustentabilidade para o setor de mineração, focados na análise de impactos ambientais e de governança corporativa. A pesquisa contribui para propagar as melhores práticas de gestão de resíduos em mineração, bem como fornece aporte teórico para a tomada de decisões estratégicas no que tange à busca por soluções sustentáveis para a mineração, fundamentadas no tripé ambiental, social e econômico.

**Palavras-chave:** Mineração. Rejeitos. Sustentabilidade. Governança. Indicadores de sustentabilidade.

## ABSTRACT

The production of mining tailings is at a critical limit, with a view to increasing the consumption of products with technological requirements that require a greater amount of mineral resources, while the productivity of the mines falls consistently and generates a greater volume of tailings per amount of material mined. In this context, the main objective of this dissertation is outlined, as being: to analyze the main alternatives for the use of mineral tailings and discuss their contributions to the promotion of sustainability. The method used is a systematic review of the literature with the support of automated semantic and content analyses. The systematic review of the literature used the PICO method (population, intervention, comparison and outcome) to define the search arguments, which were: mining, tailings, reuse or recycling and sustainability. The research was carried out in the Web of Science database and returned 50 results, which, after analysis, were selected 36 articles that were submitted to content analysis. Content analysis returned 12 clusters, which are: i) Environmental governance, ii) Employment in civil construction, iii) Integrated productive modeling, iv) Bioextraction and phytomining, v) Recovery of rare earths and other minerals, vi) Water recycling, vii) Cement production, viii) Sequestration of greenhouse gases (GHG), ix) Energy deposit, x) Generation of geothermal energy, xi) Underwater disposal, xii) Mine landfill. Of the 12 groupings, the first 6 and most relevant were the object of analysis. The results point to the productive integration between mining plants and the construction industry as the best alternative for the disposal of mining tailings. In addition, sustainability indicators are proposed for the mining sector, focused on the analysis of environmental impacts and corporate governance. The research contributes to propagate the best practices of waste management in mining, as well as provides theoretical support for strategic decision making regarding the search for sustainable solutions for mining, based on the environmental, social and economic tripod.

**Keywords:** Mining. Rejects. Sustainability. Governance. Sustainability indicators.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Investimentos previstos em U\$ Bilhões para os anos de 2021- 2025 .....	14
<b>Figura 2.</b> Participação Brasileira na Produção Mundial de Minério de Ferro (2019- 2020). .....	14
<b>Figura 3.</b> Resultados da pesquisa WoS em janeiro de 2022.....	23
<b>Figura 4.</b> Contaminação antrópica do solo agrícola .....	40
<b>Figura 5.</b> Contaminação do ambiente por pirita.....	43
<b>Figura 6.</b> Ponte sobre o Rio Tacutu, principal rota de tráfico de mercúrio para as terras Yanomami .....	48
<b>Figura 7.</b> Processo de fitorremediação na fisiologia dos vegetais. ....	58
<b>Figura 8.</b> Participação da China, em %, na produção mineral mundial de 2018.....	61
<b>Figura 9.</b> Alçamento a montante .....	63
<b>Figura 10.</b> Alçamento a jusante.....	65
<b>Figura 11.</b> Probabilidade de rompimento de barragens e danos reconhecidos. ....	66

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Relatório de citações dos artigos selecionados.....	24
<b>Quadro 2.</b> Referenciação das categorias de análise .....	28
<b>Quadro 3.</b> Apreensões de mercúrio realizadas pelo IBAMA no Estado de Roraima, de 2013 a 2017 .....	48
<b>Quadro 4.</b> Comparação entre práticas sustentáveis na mineração.....	75

## Sumário

FREDERICO CAMPOS REGAZONI TORQUATO.....	1
SUSTENTABILIDADE NO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE AS DIFERENTES TÉCNICAS .....	1
CAMPINAS-SP.....	1
2022.....	1
FREDERICO CAMPOS REGAZONI TORQUATO .....	2
SUSTENTABILIDADE NO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE AS DIFERENTES TÉCNICAS .....	2
CAMPINAS-SP.....	2
2022.....	2
AGRADECIMENTOS .....	6
LISTA DE FIGURAS .....	9
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. CONTEXTO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DE PESQUISA.....	14
2.1. Objetivo geral .....	15
2.1.1. Objetivos Específicos .....	15
2.2. Justificativa e Problema de Pesquisa.....	16
2.2.1. Perspectiva Ambiental .....	16
2.2.2. Perspectiva social .....	17
2.2.3. Perspectiva Econômica .....	17
2.3. Contribuição da Pesquisa .....	19
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
3.1. Caracterização da Pesquisa.....	20
3.2. Procedimentos de Coleta de Dados .....	20
3.3. Critérios para a Análise.....	22
3.4. Plano de Análise dos Dados.....	24
3.4.1. Categorização.....	28
3.4.2. Inferência .....	32
3.4.3. Interpretação .....	32
4. RESULTADOS ACERCA DA MINERAÇÃO .....	34
4.1. Governança Ambiental.....	34
4.1.1. Discussão dos resultados sobre sustentabilidade em mineração	35

4.1.2.	Sustentabilidade e Mineração .....	39
4.1.3.	Impacto da Mineração no Solo.....	42
4.1.4.	Contaminação Ambiental e suas Consequências .....	46
4.1.5.	Impacto Social da Mineração .....	52
4.2.	Emprego de Rejeitos na Construção Civil .....	55
4.2.1.	Produção de Rejeitos pela Mineração .....	55
4.2.2.	Utilização de Rejeitos na Construção Civil .....	56
4.3.	Modelagem Produtiva Integrada .....	59
4.4.	Bioextração e Fitominação .....	61
4.5.	Recuperação de terras Raras e outros Minerais .....	64
4.6.	Uso e reciclagem das águas de mineração.....	68
4.6.1.	Mineração e Pegada Hídrica.....	72
5.	ESCOLHA DOS ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO.....	76
5.1.	Indicadores de Desenvolvimento em Mineração .....	76
5.1.1	Indicadores de Qualidade do Solo.....	77
5.1.2	Indicadores Relativos de Recuperação de Áreas Degradadas .	78
5.2.	Índices aplicáveis à Governança em Mineração.....	79
5.3.	Comparação entre as Práticas Sustentáveis na Mineração .....	80
5.4.	Análise de Viabilidade Ambiental, Social e Econômica .....	82
5.5.	Síntese das práticas sustentáveis revisadas .....	84
5.6.	Contribuições da pesquisa .....	85
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	85
	REFERÊNCIAS .....	87

## 1. INTRODUÇÃO

O setor extrativista mineral se encontra atualmente pressionado pela sociedade, que demanda mais recursos para manter seus níveis de industrialização, bem como para sustentar o crescimento do consumo de produtos derivados da mineração. Além disto, observa-se a ampliação dos níveis exigíveis de responsabilidade social, ambiental e financeira, visando a longevidade da cadeia de suprimentos minerais. Busca-se, desta maneira, reduzir os impactos ambientais do setor, de forma a respeitar tanto os marcos regulatórios nacionais, quanto internacionais, objetivando níveis globais de governança corporativa (DI NOI; CIROTH, 2018).

A indústria extrativista, em decorrência disso, vem reconhecendo sua responsabilidade em relação à demanda por sustentabilidade no setor de matérias-primas. Isto se manifesta através do desenvolvimento de programas de mitigação e prevenção aos impactos negativos sobre a saúde humana, sobre a poluição da água, do ar, acerca do combate à degradação ambiental e da facilitação de acesso a recursos materiais para as comunidades locais (AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018; DI NOI; CIROTH, 2018; DONG *et al.*, 2019; CHRISTMANN, 2021)

O crescimento da extração de recursos minerais para a produção de bens impulsionou o desenvolvimento econômico de forma a tornar a mineração um eixo estratégico no desenvolvimento das economias nacionais. Desta forma, a produção mineral se manifesta como essencial para a industrialização, alimentando uma ampla gama de cadeias de suprimentos. Tais cadeias são orientadas por quatro marcadores principais: a) crescimento demográfico; b) aumento do poder aquisitivo da classe média; c) urbanização; e d) transição para uma economia de baixo carbono. Esses marcadores, no estado atual, implicam um forte aumento na demanda por produtos de origem mineral, fomentando investimentos crescentes neste setor, de maneira a propiciar geração de emprego e renda (AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018; CHRISTMANN, 2021).

Conforme dados do Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2021), que representa 85% da produção mineral do país, o setor foi responsável por

aproximadamente 14% das exportações brasileiras no 1º semestre de 2020, com saldo positivo estimado em US\$11,581 bilhões. A organização, que representa 120 mineradoras e defende que o setor teve papel fundamental para manter positiva a balança comercial do país também em 2021, fomentando a tradição brasileira de fornecer matérias-primas para os mercados industrializados até o esgotamento das mesmas. Neste ano, o saldo das exportações minerais subiu para aproximadamente US\$48,900 bilhões, representando 23,4% de todos os produtos exportados pelo Brasil (IBRAM, 2021).

Além dos resultados financeiros na balança comercial, destaca-se como impacto positivo da mineração a geração de empregos, cujas estimativas do Sindicato das Indústrias Minerárias do Estado do Pará - SIMINERAL, divulgadas pela revista *In the Mine* (2020), propagam 266 mil empregos diretos e indiretos, o que representa em torno de 0,4% da população economicamente ativa no Brasil, estimada em aproximadamente 60 milhões de trabalhadores, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2015). O sindicato das mineradoras defende que o fornecimento de matérias-primas minerais é essencial para o desenvolvimento industrial, impactando vigorosamente indústrias de ponta, tais como a automotiva, de eletrodomésticos, a cadeia de suprimentos de semicondutores, as telecomunicações, a geração e distribuição de energia, dentre outras aplicações estratégicas para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, apesar de seus impactos socioambientais negativos.

Não obstante, acidentes e crimes ambientais provocados pela má gestão de resíduos são uma das características marcantes da indústria de mineração, que acumula derramamentos de rejeitos, rompimentos de barragens, infiltrações irreparáveis, além de descartes diretos em corpos hídricos, os quais produzem consequências ambientais, financeiras e sociais negativas, com potencial de inviabilizar muitas atividades econômicas. No momento, a atenção depositada nos impactos ambientais negativos das atividades de mineração é insuficiente para mobilizar os investimentos necessários para disseminar a prática de gestão responsável no setor extrativista mineral. A maioria absoluta das minas em todo o planeta, por exemplo, não realizou levantamento de biodiversidade antes da implantação das atividades de mineração, carecendo de dados relevantes para

ilustrara gravidade de seus impactos sobre a biota. Isto impede a quantificação do tamanhos passivos ambientais associados às atividades de mineração, bem como a definição de medidas compensatórias e preventivas a eles associadas (DONG *et al.*,2019).

Tais contingências têm generalizado a percepção de uma imagem negativa sobre o setor de mineração, a qual se origina na sensação de insegurança em relação às condições de vida das comunidades vizinhas às minas, à degradação ambiental, às consequências deletérias à saúde humana, bem como aos impactos financeiros negativos em outras atividades econômicas locais, como o turismo, agricultura e pecuária, além de manifesto desrespeito aos direitos de comunidades autóctones em diversas áreas de mineração, o qual culmina em violência, injustiça e corrupção.

Muitos dos impactos sociais negativos da mineração estão associados à falta de transparência e à distribuição desequilibrada de poder na gestão dos recursos minerais, que levam a conflitos de ordem social, jurídica e econômica, implicando falta de estabilidade no fornecimento de insumos. Isto pode comprometer a capacidade da indústria de mineração para o desenvolvimento futuro, restringindo o acesso a bens e tecnologias necessárias para a estabilidade social, de forma a gerar conflitos geopolíticos de ordem global. Nesse contexto, surge a necessidade de revisar as relações atuais entre mineração e sustentabilidade, que nos conduz aos problemas que deram origem ao estudo.

Adiante, são evidenciadas e analisadas algumas das fontes disponíveis sobre as melhores práticas e alternativas para a melhora nos níveis de sustentabilidade e governança para a indústria de mineração. A pesquisa está dividida em seis capítulos, sendo os primeiros dedicados à introdução, objetivos e justificativa para a pesquisa; o terceiro capítulo explana a metodologia utilizada por meio de mineração de dados, para descoberta de conhecimentos pertinentes à investigação; o seguinte busca ilustrar a tipificação de práticas de recuperação ambiental e as tecnologias socioambientais disponíveis para a indústria de mineração; o capítulo cinco trata das melhores práticas para a sustentabilidade, comparando índices e práticas de aproveitamento de rejeitos de mineração; e no sexto se encontram as considerações finais.

## 2. CONTEXTO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS DE PESQUISA

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2022), os investimentos em Projetos de Mineração no Brasil possuem expectativas de aportes financeiros entre os anos de 2021-2025 da ordem de U\$ 41,3 Bilhões, de forma que a participação brasileira na produção mundial de minério de ferro coloca o Brasil em segundo colocado no *ranking* dos países produtores. As Figuras 1 e 2 ilustram a destinação de recursos pelo setor e a posição da produção nacional de ferro no contexto global.

**Figura 1.** Investimentos previstos em U\$ Bilhões para os anos de 2021-2025.



Fonte: IBRAM (2021).

**Figura 2.** Participação Brasileira na Produção Mundial de Minério de Ferro (2019-2020).



Fonte: IBRAM (2021).

Nesse contexto, de fatura de recursos, o avanço financeiro da mineração no Brasil permite ampliar o investimento em novas tecnologias extrativistas, de forma a reduzir o impacto da atividade sobre os ecossistemas, como no caso das iniciativas de empilhamento de rejeito a seco, apontado pelo Instituto Minere (2019) como solução e alternativa para uma mineração sem barragens. Outra tecnologia em implantação no setor é o reaproveitamento de resíduos refratários, estratégia a partir da qual, a empresa Magnesita, por exemplo, registrou um aumento anual de 120% na reciclagem de rejeitos minerais, impactando positivamente 42mil toneladas de resíduos em 2021. A meta da empresa é chegar a 10% da produção oriunda de rejeitos reciclados (BRASIL MINERAL, 2022). Diante dessas oportunidades de avanço nos indicadores de sustentabilidade da indústria de mineração, emerge o problema e se justifica a pesquisa, conforme exposto a seguir.

## **2.1. Objetivo geral**

Considerando-se o problema de pesquisa apontado, foi delineado como objetivo principal desta dissertação: analisar, por meio de revisão sistemática da literatura, as principais alternativas de aproveitamento de rejeitos minerais e discutir as contribuições das mesmas para a promoção da sustentabilidade.

### **2.1.1. Objetivos Específicos**

- a) Revisar a literatura sobre geração de rejeitos na cadeia produtiva da mineração;
- b) Descrever as práticas indicadas para o aproveitamentos de rejeitos da mineração;
- c) Evidenciar aquelas práticas que apresentam melhor viabilidade social, ambiental e econômica.
- d) Destacar indicadores de sustentabilidade para a mineração.

Para atingir os objetivos propostos foi adotada a metodologia de revisão sistemática da literatura, por meio da mineração de dados, conforme explanado no capítulo seguinte.



## 2.2. Justificativa e Problema de Pesquisa

Para explicar as justificativas e motivações que trouxeram até esta pesquisa foram adotadas três perspectivas, correspondentes ao tripé da sustentabilidade. As mesmas são abordadas nesta seção.

### 2.2.1. Perspectiva Ambiental

O setor mineral fornece matérias-primas abundantes em um ritmo acelerado de produção. Não obstante, as taxas de minério por área lavrada diminuem progressivamente, tornando mais complexa a operação de mineração e ampliando o volume de rejeitos. Além disso, são observados impactos negativos contínuos e irreversíveis na água, ar, degradação do solo, plantas, animais e na cultura de comunidades tradicionais (DONG *et al.*, 2019).

A busca por satisfação da cultura de consumo induziu desafios ambientais sem precedentes, que vão do esgotamento de recursos à deterioração ecológica. A pressão ambiental da atividade de mineração, em números, contribui com “16% das emissões globais de CO<sub>2</sub>”, produzindo “50 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano”, equivalente a “25 vezes” a massa de resíduos urbanos produzidos pela humanidade. Tal disposição de rejeitos pode conter contaminantes ambientais da extração, tais como, pirita, arsênico, cádmio, mercúrio, selênio, telúrio, etc..., os quais comprometem a sustentabilidade das gerações futuras e da própria atividade de mineração, gerando passivos ambientais e sociais de difícil gerenciamento (CHRISTMANN, 2021, p. 187).

No caso da mineração, um dos fatores críticos mais relevantes para que se busque uma produção mais limpa consiste na redução no descarte de rejeitos, que tende a aumentar com o esgotamento dos minerais de interesse comercial (HUNT *et al.*, 2014; AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018; HEFNI *et al.*, 2021). A partir de tais horizontes, que se mostram negativamente impactantes e ambientalmente insustentáveis para a mineração, justifica-se a proposta de revisão dos conhecimentos sobre as relações entre mineração e sustentabilidade, aqui apresentada.

### **2.2.2. Perspectiva social**

Tradicionalmente, a gestão de minas tem se orientado a partir de conceitos lineares de produção, de modo que a transição para uma economia circular é desafiadora para este setor. Entretanto, ela se caracteriza como um avanço necessário para que a sociedade mude a percepção negativa que prevalece sobre os benefícios da mineração. Gradativamente, a indústria vem se adaptando a processos cíclicos, como nos casos da utilização de grafite na redução de escória em minas de estanho, no enchimento de cimento de rejeito reciclado para controle de sumidouros, em diversas aplicações de geoengenharia, bem como na reciclagem de resíduos de lixiviação, ou seja, na requalificação do chorume produzido pela drenagem dos rejeitos decorrentes dos processos de mineração (AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

A busca por uma produção mais limpa pelas empresas de mineração, bem como a permeabilidade às demandas de interesse social são características desejáveis e necessárias para mitigar os impactos negativos do setor nas sociedades em que está inserido. Apesar dos impactos negativos na comunidade, como desestabilização dos hábitos culturais e destruição das fontes tradicionais de sobrevivência entre ribeirinhos e povos autóctones, a mineração possui também um grande potencial de melhora dos entornos, no que tange à infraestrutura básica de logística, na construção de rodovias, ferrovias e portos. Além disto, medidas compensatórias à atividade de mineração podem ser associadas à melhoria do patrimônio coletivo, por meio da construção de equipamentos públicos, como postos de saúde e hospitais. Este tipo de prática mitigadora tende a reverter a percepção negativa que geralmente as mineradoras oferecem aos seus vizinhos.

### **2.2.3. Perspectiva Econômica**

Dentre os impactos econômicos positivos da mineração, um dos mais relevantes é a geração de empregos em áreas remotas, em cujas comunidades muitas vezes teriam dificuldade de se industrializar e desenvolver os setores de

comércio e serviços sem os grandes investimentos em mineração. A produção de empregos detém a virtude de fazer circular na região de lavra recursos financeiros advindos da prestação de serviços locais e pagamento de impostos e taxas que, de outra forma, não estariam disponíveis.

Não obstante, cada região produtora desenvolve marcos legais e limites diferenciados à extração, de modo que tanto a tecnologia, quanto os custos e impactos da mineração podem ser radicalmente diversos para cada planta industrial, afetando fortemente a sustentabilidade econômica das atividades locais de mineração (CHRISTMANN, 2021). Por estes motivos, a implantação de uma planta de produção extrativista é motivo de interesse e controvérsia nas comunidades vizinhas, estando frequentemente ligada a conflitos de propriedade e especulação imobiliária. Outro fator econômico altamente relevante, no que tange à mineração, é o potencial de desenvolvimento tecnológico e industrial, que podem ser fortemente limitados em regiões de escassez de recursos minerais básicos, como metais, energia e água. Por outro lado, a abundância mineral favorece a implantação de indústrias de processamento pesado, como usinas e metalúrgicas, as quais demandam e subsidiam o avanço tecnológico, um importante potencializador do progresso econômico.

No que tange à economia da produção de rejeitos, cabe notar dois vieses relevantes: a quantidade significativa de recursos desperdiçados na deposição dos resíduos de mina; e os consideráveis passivos jurídicos, associados à má gestão das jazidas. Financeiramente, a evolução para uma produção mais limpa detém o potencial de reduzir o risco jurídico das empresas, gerando recursos intangíveis de significativa monta, tais como a melhora na imagem da empresa e acesso a mercados mais exigentes e rentáveis. Ao mesmo tempo, a redução, o reuso e a reciclagem de rejeitos oferecem às empresas aumento no ciclo de vida dos projetos, permitindo acesso a novos recursos econômicos e melhorando a viabilidade do negócio (CAPASSO *et al.*, 2019; MEHTA *et al.*, 2020).

A partir de tais perspectivas, justificadas a partir do tripé da sustentabilidade, surge o problema de pesquisa: quais as principais alternativas disponíveis para a disposição sustentável de rejeitos da mineração?

### 2.3. Contribuição da Pesquisa

O levantamento bibliográfico, realizado ao final de 2021, a partir de revisão sistemática da literatura nas bases de dados *Web of Science - WoS* (CLARIVATE, 2022) evidenciou o relato de volumes consideráveis de rejeitos minerais que não são atualmente destinados a um processo de reaproveitamento. Neste contexto, o presente estudo pretende contribuir para evidenciar a viabilidade ambiental e social do aproveitamento e reaproveitamento desses materiais, de forma a propagar práticas sustentáveis no setor mineral e viabilizar o aumento no ciclo de vida das minas. Além disso, espera-se oferecer aporte teórico para a diminuição do enorme volume de resíduos sólidos gerado atualmente pela mineração; fomentar a redução dos riscos de acidentes com barragens; favorecer a minimização da geração de gases de efeito estufa na atividade de lavra; promover a redução das concentrações de metais contaminantes nos resíduos de mineração, bem como concentrar e organizar os conhecimentos sobre boas práticas de gestão de minas já existentes, mas que se encontram diluídos na literatura científica.

Tais resultados pretendem também fornecer referencial teórico para nortear políticas públicas e iniciativas de sustentabilidade para o setor de extração mineral. A dissertação detém ainda o potencial de difundir conhecimentos que contribuam para a redução do número de barragens de rejeitos da mineração, por meio de informações úteis sobre alternativas a este tipo de técnica. Busca-se, desta maneira, promover a aplicação de práticas sustentáveis na indústria extrativista mineral, bem como propor e comparar indicadores de sustentabilidade aplicáveis à mineração.

### **3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Este capítulo é dedicado a apresentar os aspectos metodológicos utilizados na dissertação e está organizado em três seções: caracterização da pesquisa, procedimentos de coleta de dados e plano de análise dos dados.

#### **3.1. Caracterização da Pesquisa**

Esta pesquisa se caracteriza como uma pesquisa de natureza aplicada, de abordagem qualitativa, com objetivo descritivo e que recorre aos procedimentos de revisão sistemática da literatura, com análise semântica automatizada e posterior análise de conteúdo (BARDIN, 2000). Silva e Menezes (2005) afirmam que as pesquisas aplicadas têm o propósito de gerar conhecimentos voltados para a prática e dirigidos à solução de problemas específicos de interesses locais. No caso desta dissertação, a orientação prática busca alternativas para a problemática das barragens de rejeitos de mineração, evidenciando a natureza aplicada da pesquisa. Em relação à abordagem qualitativa, os mesmos autores consideram que há uma relação dinâmica e indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito, que não pode ser traduzida em números. No caso desta dissertação, o mundo objetivo são as alternativas para o reaproveitamento do estéril e rejeito na indústria da mineração, em relação dinâmica e indissociável com a subjetividade do pesquisador, que se dá na análise da sustentabilidade destas alternativas.

Com relação ao objetivo, esta pesquisa se caracteriza como descritiva pois, como tal, ela visa descrever as características de determinada população, fenômeno, ou o estabelecimento de relações entre variáveis de interesse. Neste caso, as características de interesse são os critérios de sustentabilidade e o fenômeno pesquisado são as alternativas para reaproveitamento do estéril e rejeito na indústria de extração mineral.

#### **3.2. Procedimentos de Coleta de Dados**

A revisão do estado da arte na mineração foi efetuada por meio da associação entre diversas metodologias disponíveis para o tratamento e mineração de dados, dentre elas destaca-se a análise de conteúdo, prática tradicional, em utilização nas mais diversas áreas de pesquisa desde a década de 1970 (BARDIN, 2000). A revisão indicou 36 artigos como fontes primárias da pesquisa, além de destacar 12 categorias de práticas sustentáveis, dentre as quais seis foram selecionadas a partir do índice de recorrência dos assuntos na temática dos autores revisados. Estas orientam a apresentação dos conteúdos revisados.

Inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura para levantar as principais técnicas de aproveitamento do estéril e rejeito como alternativa ao uso de barragens na mineração (DE-LA-TORRE-UGARTE-GUANILO; TAKAHASHI; BERTOLOZZI, 2011). A revisão sistemática teve como critérios de seleção de fontes a busca por artigos revisados por pares, que contemplem os assuntos relativos à produção mais limpa e à ampliação do ciclo de vida de produtos e processos nas atividades de mineração. A pesquisa foi realizada em Campinas, SP, entre setembro de 2021 e março de 2022. Foi utilizado como critério de inclusão para as fontes primárias a limitação a artigos revisados por pares, publicados a partir de 2014 e indexados na base de dados da base *Web of Science*.

Os trabalhos destacados pelo mecanismo de busca foram selecionados por critério de pertinência para o tema de pesquisa, qual seja: discussão do reaproveitamento de rejeitos de mineração como alternativa para promover o desenvolvimento sustentável na mineração.

A utilização da revisão sistemática, conforme Coelho *et al.* (2021), visa fomentar os objetivos específicos de pesquisa referentes à revisão do conceito de sustentabilidade e sua aplicabilidade na mineração, além de evidenciar as principais alternativas quanto ao aproveitamento de rejeitos comumente depositados em barragens de mineração. A revisão sistemática da literatura foi subsidiada pelo mecanismo de busca disponibilizado pela base de dados *WoS* (CLARIVATE, 2021), escolhida por caracterizar-se como uma das mais completas bibliotecas digitais de artigos acadêmicos dentre as disponibilizadas pelo portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de

Nível Superior, fundação do Ministério da Educação (CAPES, 2022). Trata-se de uma biblioteca significativa tanto em termos quantitativos, quanto qualitativos, que disponibiliza diversos recursos para análise bibliométrica, tais como quantidades de citações, referências e índices de relevância.

Os procedimentos de pesquisa seguiram as seguintes etapas:

- a) Definição do problema de pesquisa;
- b) Escolha das palavras-chave;
- c) Busca na base de dados;
- d) Recuperação de artigos, a partir da análise de pertinência dos títulos e resumos;
- e) Seleção das fontes, a partir da análise em texto integral, a qual utilizou como critério de seleção os artigos que tratavam especificamente de produção mais limpa, ou aumento do ciclo de vida na mineração;
- f) Análise de conteúdo, focada em categorização, inferência e interpretação dos textos selecionados (BARDIN, 2000).

Após a seleção dos artigos, o conteúdo analisado foi classificado, a partir da matriz que representa a concatenação entre os objetivos de pesquisa e os achados presentes nas fontes selecionadas. Por fim, os resultados estão apresentados por grupo de análise, conforme as alternativas tecnológicas para a deposição dos rejeitos em minas, no que tange às categorias **água, solo e sociedade**, destacadas pela análise de conteúdo.

A escolha das palavras-chave utilizadas na revisão sistemática foi realizada a partir do acrônimo PICO (população, intervenção, comparação e desfecho – *outcome*), frequentemente utilizado nas ciências da saúde para delimitar problemas e fontes de consulta para revisões sistemáticas e pesquisas orientadas por evidências (GALVÃO; PEREIRA, 2014; BHAGWAT; DELHI, 2021).

### 3.3. Critérios para a Análise

Os critérios para seleção, análise das fontes primárias e classificação

do conteúdo se fundamentaram na convergência temática para com a busca de uma produção mineral mais limpa, ou orientada para a ampliação dos ciclos de vida das minas e a redução do risco de barragens. Os resultados aqui apresentados foram constituídos por meio de descrição, análises sistemática, de conteúdo e comparação qualitativa entre as soluções possíveis para o problema de pesquisa: quais as principais alternativas disponíveis para a deposição sustentável de rejeitos da mineração?

Uma vez estabelecido o tema de interesse e o problema de pesquisa, foi utilizado o acrônimo PICO para definir as chaves de busca, utilizadas para destacar as fontes primárias, posteriormente fichadas e referenciadas (GALVÃO; PEREIRA, 2014). Os termos de busca escolhidos, por critério de pertinência, foram os seguintes:

P - (população)

<mineração>I -

(intervenção) <rejeito>

C - (comparação) <reaproveitamento ou

reciclagem>O - (desfecho) <sustentabilidade>

Em seguida, os termos foram traduzidos para o idioma inglês e submetidos a várias configurações semânticas possíveis, em associação aos operadores lógicos

<and> e <or>, até que produzissem um resultado ótimo, ou seja, uma quantidade de artigos relevantes, passível de ser lida e analisada em texto integral. Ao final do processo, desenvolvido no buscador WoS, a chave de busca escolhida foi:

<mineração e rejeito e <reaproveitamento ou reciclagem> e sustentabilidade>

A tradução dos termos, aplicados à sintaxe da base WoS gerou a seguinte chave de busca para todos os campos: (((ALL=(mining )) AND ALL=(tailings)) AND ALL=(reuse or recycling)) AND ALL=(sustainability)

Em março de 2022 a aplicação da chave de busca, em todos os campos do mecanismo WoS, gerou 50 resultados, como pode ser visualizado na Figura 3:



**Figura 3.** Resultados da pesquisa WoS em janeiro de 2022.

Clarivate  
**Web of Science™** Pesquisar 146 Histórico Alertas

Pesquisa avançada > Resultados para (((TODOS=(mineração)) E TODOS=(rejeitos)) E TODOS=(re...)

**50 resultados da Coleção principal da Web of Science para:**

Q (((TODOS=(mineração)) E TODOS=(rejeitos)) E TODOS=(reutilização ou reciclagem)) E TODOS=(sustentabilidade)

∞ Copiar link dos resultados da busca

Publicações Você também pode gostar de...

Refinar resultados

Procurar nos resultados...

Filtros rápidos

- Artigos de revisão 9
- Acesso antecipado 1
- Acesso Aberto 20

0/50 Adicionar à lista de itens marcados Expo

1 Sustentável Reuso meu Rejeito se Waste Rc  
 Gorakki, MH e Bareither, CA  
 julho de 2017 | MINERAI 7 (7)

O foco deste estudo foi avaliar o potencial reuso de m  
 (WBCs). Reuso de resíduos de minas em aplicações de  
 compensar os requisitos de matéria-prima e reduzir

Fonte: Clarivate (2022, tradução automatizada).

A busca foi refinada por tempo, entre 2014 e 2022, permitindo selecionar 45 resultados, os quais foram lidos em texto integral e selecionados por critério de pertinência para o tema de pesquisa. Nesta fase da revisão foram descartados onze artigos, por não se mostrarem relevantes para a resolução do problema de pesquisa, restando como fontes primárias da revisão 36 artigos publicados em periódicos revisados por pares.

### 3.4. Plano de Análise dos Dados

Para articular as soluções apontadas pelos autores consultados e os objetivos de pesquisa foi elaborado um plano de análise, que visa concatenar estes dois fatores com as respectivas referências, em busca de evidenciar as melhores alternativas para o aproveitamento de rejeitos de mineração em barragens e atingir os objetivos de pesquisa. O Quadro 1 representa a lista de artigos selecionados na base WoS, com os respectivos índices de citações:

**Quadro 1.** Relatório de citações dos artigos selecionados.

Referências	Título (tradução automatizada)	Citações	
		Por ano	Total
(KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017)	Drenagem ácida de mina: prevenção, opções de tratamento e recuperação de recursos	46,3	278
(DUSHYANTHA et al., 2020)	A história dos elementos de terras raras (REEs): ocorrências, distribuição global, gênese, geologia, mineralogia e produção global	19,7	59
(CAPASSO et al., 2019)	Reutilização de resíduos de mineração como agregados em geopolímeros à base de cinzas volantes	10,3	41
(MOHAJERANI et al., 2019)	Reciclagem de materiais residuais em concreto geopolimérico	8,5	34
(DI CARLO et al., 2019)	Indicadores de qualidade do solo e desempenho da vegetação para reabilitação sustentável de áreas de disposição de resíduos de bauxita: uma revisão	5,5	22
(GORAKHKI; BAREITHER, 2017)	Reutilização Sustentável de Rejeitos de Mina e Resíduos de Rocha como Coberturas de Equilíbrio de Água	3,2	19
(KYZAS; MATIS, 2016)	Métodos de reciclagem de resíduos de arsênico: foco na flotação	2,3	16
(DI NOI; CIROTH, 2018)	Pressões Ambientais e Sociais na Mineração. Resultados de uma triagem de pontos de acesso de sustentabilidade	2,4	12
(BAMIGBOYE et al., 2021)	Resíduos em aplicações rodoviárias: uma visão geral das implicações de geração e utilização na sustentabilidade	5,5	11
(KINNUNEN et al., 2021)	Revisão de ciclos de água fechados com classificação de minério e valorização de rejeitos para uma indústria de mineração mais sustentável	5	10
(MEHTA et al., 2020)	Avaliação da possível reutilização de resíduos extrativos provenientes de minas abandonadas: estudo de caso em Gorno, Itália	3,3	10
(LUO et al., 2017)	Recuperação verde de elementos de potássio e alumínio de rejeitos de alunita usando processo de lixiviação por gradiente	1,67	10
(ZHANG; HEDAYAT; BOLAÑOS SOSA; GONZÁLEZ CÁRDENAS; et al., 2021)	Avaliação de danos e comportamento de deformação de geopolímero à base de rejeitos de mina sob compressão cíclica uniaxial	4,5	9
(ESMAEILI; ASLANI; ONUAGULUCHI, 2020)	Potenciais de Reutilização de Rejeitos de Mina de Cobre em Compósitos de Argamassa e Concreto	2,7	8

Referências	Título (tradução automatizada)	Citações	
		Por ano	Total
(INCE et al., 2021)	Propriedades, durabilidade e rentabilidade de argamassas de cimento e cal hidratada reutilizando rejeitos da mina de cobre de Lefke-Xeros em Chipre	3	6
(DE VILLIERS, 2017)	Como sustentar os recursos minerais: oportunidades de beneficiamento e Engenharia Mineral	1	6
(NAGARAJ; SHREYASVI, 2017)	Blocos de terra estabilizados compactados usando estéril de mina de ferro - Um estudo exploratório	1	6
(ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ et al., 2021)	Projeto de mistura ideal para impressão de concreto 3D usando rejeitos de mineração: um estudo de caso na Espanha	1	6
(CUI et al., 2020)	Gerenciamento de risco para fechamento de mina: um modelo de nuvem e método de decisão semiquantitativo híbrido	2	4
(ZHANG; HEDAYAT; BOLAÑOS SOSA; TUPA; et al., 2021a)	Evolução de trincas em discos de geopolímeros no Brasil, baseados em rejeitos de minas, medidos a partir de correlações de imagens digitais: uma investigação experimental considerando os efeitos das adições de cinzas volantes classe F	1,3	4
(ZHANG; HEDAYAT; BOLAÑOS SOSA; TUPA; et al., 2021b)	Comportamentos mecânicos e de fratura de rejeitos de mina de ouro compactados por testes de flexão semicircular e correlação de imagens digitais	1,5	3
(MORAN-PALACIOS et al., 2019)	O potencial dos rejeitos de minério de ferro como depósitos secundários de terras raras	1,5	3
(REIS; COLLARES; REIS, 2018)	Avaliação tecnológica de rejeitos de garimpos de quartzito em Alpinópolis (Minas Gerais-Brasil) como agregados em pavimentação de blocos de concreto (CBP)	0,75	3
(ALMEIDA et al., 2021b)	Produção de argamassas à base de cimento aplicando resíduos de mineração tratados com tecnologia eletro-base e tratamento térmico: efeitos técnicos e econômicos	0,6	3
(NWAILA et al., 2021)	Valorização de resíduos de minas - Parte I: Características e metodologia de amostragem para rejeitos mineralizados consolidados usando as minas de ouro de Witwatersrand (África do Sul) como exemplo	1	2
(CARVALHO EUGÊNIO et al., 2021)	Estudo sobre a viabilidade do uso de rejeitos de minério de ferro (iot) nas propriedades tecnológicas de telhas de concreto.	0,5	1
(CASTELEIN et al., 2021)	Bioliqüidação de metais de materiais secundários usando biossurfactantes glicolipídicos	0,5	1

Referências	Título (tradução automatizada)	Citações	
		Por ano	Total
(MULEYA et al., 2021)	Investigando a adequação e custo-benefício de rejeitos de cobre como substituição parcial de areia em concreto na Zâmbia: um estudo exploratório	0,5	1
(MARUTHUPANDIAN ; CHALIASOU; KANELLOPOULOS , 2021)	Reciclagem de rejeitos de minas como precursores de ligantes cimentícios - Métodos, desafios e perspectivas futuras	0	0
(ARAYA et al., 2021)	Uso de opções reais para melhorar o nexso água- energia na gestão de rejeitos de minas	0	0
(VIMALA et al., 2021)	Modelo Ambiental de Grama Vetiver para Reabilitação de Solo Sobrecarregado de Ferro: Uma Abordagem de Serviço Ecosistêmico	0	0
(POORNIMA; SUGANYA; SEBASTIAN, 2022)	Biossólidos rumo ao conceito alternativo Back-To- Earth (BEA) para sustentabilidade ambiental: uma revisão	0	0
(SUPPES; HEUSS-ASSBICHLER, 2021)	Como Identificar Potenciais e Barreiras de Recuperação de Matéria-Prima de Rejeitos? Parte II: Uma abordagem prática em conformidade com a UNFC para avaliar a sustentabilidade do projeto com dados de exploração no local	0	0
(ALMEIDA et al., 2021a)	Avaliação do Ciclo de Vida de Tecnologias Eletrodialíticas para Recuperar Matérias-Primas de Rejeitos de Mina	0	0
(SELEBALO; SCHOLE; CLIFFORD-HOLMES, 2021)	Uma Análise Sistêmica dos Impactos Ambientais da Mineração de Ouro na Bacia do Rio Blyde, uma Área Estratégica de Água da África do Sul	0	0

Fonte: Elaboração própria, adaptado de Clarivate (2021, p. tradução automatizada).

O artigo mais referenciado dentre os selecionados, de Kefeni, Msagati e Mamba (2017), com 278 citações, trata da prevenção de drenagem ácida em minas, evidenciando a relevância da reciclagem das águas de processos na busca por sustentabilidade da extração mineral. Dentre os artigos mais recentes, destaca-se o trabalho de Dushyantha *et al.* (2020), com 59 citações, sobre a história dos elementos de terras raras, evidenciando o grande interesse econômico deste recurso para a indústria de mineração, o qual pode ser recuperado a partir da reciclagem de rejeitos. A revisão da literatura permitiu colocar em destaque, como principais categorias de análise, a água, solo e sociedade, que são articulados com os objetivos de pesquisa nos capítulos

seguintes. Identificadas as fontes primárias da revisão da literatura, foi definido o plano de análise, que se fundamenta na análise de conteúdo de Bardin (2000), que se orienta pelos seguintes passos: categorização; inferência; e interpretação.

### 3.4.1. Categorização

A fragmentação do texto em categorias é uma forma de imprimir ordem ao caos aparente da grande quantidade de dados evidenciados pela revisão sistemática da literatura (BARDIN, 2000). Devido ao volume de texto tratado, a categorização recorreu à análise semântica automatizada, por meio do software *VOSviewer*, disponibilizado pela Universidade de Leiden (2022). Esta é uma técnica utilizada a fim de minimizar o risco de viés subjetivo na escolha das categorias de interesse. Para destacar as mesmas, foram utilizados os índices bibliométricos, fornecidos pela base de dados *WoS* (Quadro 1) e também o cálculo de relevância dos termos mais mencionados nos textos de referência. Este cálculo foi efetuado a partir de análise semântica, que recorreu ao software *VOSviewer*. As categorias destacadas na revisão sistemática (Quadro 2) foram:

- a) Governança ambiental
- b) Emprego na construção civil
- c) Modelagem produtiva integrada
- d) Bioextração e fitominação
- e) Recuperação de terras raras e outros minerais
- f) Reciclagem das águas
- g) Produção de cimento
- h) Sequestro de gases de efeito estufa (GEE)
- i) Depósito de energia
- j) Geração de energia geotérmica
- k) Descarte subaquático
- l) Aterro de minas

A referenciação das categorias de análise encontra-se sintetizada no Quadro 2. Nele, são relacionados os principais autores de referência com os

temas destacados pela leitura, em relação aos objetivos de pesquisa e alternativas, ou melhores práticas e ou alternativas para o aproveitamento de rejeitos de mineração e gestão sustentável no setor. O critério de classificação utilizado foi o elenco por ordem de recorrência nas fontes consultadas.

**Quadro 2.** Referenciação das categorias de análise.

<b>Interpolação entre os objetivos de pesquisa e as alternativas para rejeitos de minas</b>			
Alternativas / objetivos	Objetivo a: revisar o estado da arte na extração mineral	Objetivo b: analisar as melhores práticas de mineração	Índice (quantidade de referências)
Governança ambiental	(ALMEIDA et al., 2021a; AZNAR-SÁNCHEZ et al., 2018; CHRISTMANN, 2021; CUI et al., 2020; DE VILLIERS, 2017; DI CARLO et al., 2019; DI NOI; CIROTH, 2018; DONG et al., 2019; GORAKHKI; BAREITHER, 2017; HEFNI et al., 2021; HUNT et al., 2014; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; LANGEFELD; BINDER, 2017; MEHTA et al., 2020; NWAILA et al., 2021)		15
Emprego na construção civil	(ALMEIDA et al., 2021b, 2021a; ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ et al., 2021; BAMIGBOYE et al., 2021; CAPASSO et al., 2019; CARVALHO EUGÊNIO et al., 2021; ESMAEILI; ASLANI; ONUAGULUCHI, 2020; INCE et al., 2021; MARUTHUPANDIAN; CHALIASOU; KANELLOPOULOS, 2021; MOHAJERANI et al., 2019; MULEYA et al., 2021; NAGARAJ; SHREYASVI, 2017; REIS; COLLARES; REIS, 2018; ZHANG et al., 2021a, b)		14
Modelagem produtiva integrada	(ARAYA et al., 2021; CASTELEIN et al., 2021; CUI et al., 2020; DI NOI; CIROTH, 2018; HUNT et al., 2014; LUO et al., 2017; NTLHABANE et al., 2018; POORNIMA; SUGANYA; SEBASTIAN, 2022; SRIRAMOJU et al., 2021)		9
Bioextração e fitomineração	(CASTELEIN et al., 2021; DI CARLO et al., 2019; DONG et al., 2019; HUNT et al., 2014; KYZAS; MATIS, 2016; LANGEFELD; BINDER, 2017; LI, 2021; LUO et al., 2017; POORNIMA; SUGANYA; SEBASTIAN, 2022; VIMALA et al., 2021)		9

<b>Interpolação entre os objetivos de pesquisa e as alternativas para rejeitos de minas</b>			
Alternativas / objetivos	Objetivo a: revisar o estado da arte na extração mineral	Objetivo b: analisar as melhores práticas de mineração	Índice (quantidade de referências)
Recuperação de terras raras e outros minerais	(ALMEIDA et al., 2021b; DUSHYANTHA et al., 2020; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; KINNUNEN et al., 2021; MEHTA et al., 2020; MORAN-PALACIOS et al., 2019; NWAAILA et al., 2021; SUPPES; HEUSS-ASSBICHLER, 2021)		8
Reciclagem das águas	(ARAYA et al., 2021; CASTELEIN et al., 2021; GORAKHKI; BAREITHER, 2017; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; LUO et al., 2017; SELEBALO; SCHOLES; CLIFFORD- HOLMES, 2021)		6
Produção de cimento	(ALMEIDA et al., 2021a; ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ et al., 2021; INCE et al., 2021; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; LI, 2021; MARUTHUPANDIAN; CHALIASOU; KANELLOPOULOS, 2021)		6
Sequestro de GEE	(DONG et al., 2019; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; POORNIMA; SUGANYA; SEBASTIAN, 2022; VIMALA et al., 2021)		4
Depósito de energia	(DONG et al., 2019; HUNT et al., 2014; LANGEFELD; BINDER, 2017; LI, 2021)		4
Geração de energia geotérmica	(DONG et al., 2019; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017)		2
Descarte subaquático	(GORAKHKI; BAREITHER, 2017; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017)		2

<b>Interpolação entre os objetivos de pesquisa e as alternativas para rejeitos de minas</b>			
Alternativas / objetivos	Objetivo a: revisar o estado da arte na extração mineral	Objetivo b: analisar as melhores práticas de mineração	Índice (quantidade de referências)
Aterro de minas	(KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017)		1

Fonte: elaboração própria (2022).

O destaque das categorias de pesquisa mostra abordagens e práticas de mineração, que são apontadas nos artigos consultados como soluções viáveis, ou em viabilização para alguns dos principais problemas de sustentabilidade evidenciados no setor. A partir da comparação por índice de recorrência (Quadro 2), calculado a partir da quantidade de fontes que tratam principalmente das categorias destacadas, foram selecionadas para comparação as alternativas que apresentam seis ou mais ocorrências nas fontes principais, a saber: governança ambiental; emprego na construção civil; modelagem produtiva integrada; bioextração e fitomineração; recuperação de terras raras e outros minerais; reciclagem das águas; produção de cimento. Estas categorias compõem os tópicos da análise de conteúdo na fase de interpretação das fontes.



### 3.4.2. Inferência

A análise de conteúdo, conforme Bardin (2000, p. 30), possui basicamente duas finalidades complementares, sendo uma de natureza “heurística”, ou seja, viabiliza a descoberta, explorada na fase de categorização, descrita acima. A outra função da análise de conteúdo é administrar a prova, indicando hipóteses de trabalho, de forma a corroborar ou refutar afirmações sugeridas pela revisão sistemática da literatura.

A fase de inferência da análise de conteúdo, segundo a autora, é aquela em que se busca deduzir de maneira lógica “conhecimentos sobre o emissor” de uma mensagem, ou sobre o meio no qual ela foi produzida. Para tanto, faz-se necessário a elaboração de índices, “cuidadosamente” evidenciados, a partir de procedimentos “complexos”. Trata-se de uma fase intermediária, entre a enunciação das categorias de trabalho e a interpretação dos textos (BARDIN, 2000, p. 39).

A identificação dos índices que orientam as fases posteriores, de interpretação dos textos, foram sugeridas ao pesquisador pela banca, durante a prática de qualificação do texto. São eles:

- a) Tipificação de ambientes em recuperação com base no desenvolvimento fitossociológico;
- b) Indicadores físico, químicos e microbiológicos do solo para áreas degradadas pela mineração;
- c) Índices relativos de recuperação em áreas degradadas pela mineração

### 3.4.3. Interpretação

A fase de interpretação dos textos analisados considera três níveis de problemas a serem resolvidos, sendo o primeiro relativo à consecução dos objetivos de pesquisa, o segundo à integração das categorias destacadas pela análise de conteúdo e o terceiro a comparação dos índices de sustentabilidade entre as melhores práticas para a mineração. Nos capítulos seguintes são apresentadas as interpretações, ou seja, as significações concedidas aos textos analisados, a partir dos objetivos propostos e das inferências realizadas, com

vistas à comparação da viabilidade das categorias selecionadas, em relação aos índices de sustentabilidades escolhidos.

## 4. RESULTADOS ACERCA DA MINERAÇÃO

Este capítulo visa apresentar os resultados da revisão sistemática, bem como evidenciar os principais tópicos do estado da arte em mineração, no que se refere à adoção de práticas sustentáveis. Outrossim, a análise ressalta a urgência da necessidade de recuperação dos mais diversos biomas terrestres, de maneira a evidenciar características sociais e biológicas do estado de emergência ambiental na qual o nosso passado comum nos colocou. Trata-se de uma interpretação fitossociológica das fontes, ou seja, orientada pela relação entre a sociedade e o biota (conjunto de seres vivos de um ecossistema), no contexto das demandas próprias da biodiversidade (TORRES *et al.*, 2017).

### 4.1. Governança Ambiental

A escolha e aplicação das melhores técnicas para a administração de cada jazida é uma questão de governança, que precisa ser abordada ainda antes da implantação das novas plantas industriais e também como forma de remediação, quando necessário. Existem muitas definições de governança. Em relação à indústria de minerais e metais, ela pode ser definida como a estrutura de leis, regulamentos, iniciativas voluntárias, padrões, normas e práticas aplicadas pelas partes interessadas em seus projetos. Atingir altos níveis de governança requer uma implementação eficaz verificável dos estatutos e normas vigentes, bem como o comprometimento com a estrutura regulamentadora da atividade. A governança em recursos minerais refere-se à necessidade de dissociar o crescimento econômico dos impactos negativos produzidos sobre os ecossistemas locais e global de suporte à vida, dos quais o clima, os oceanos, a diversidade de habitats, os ciclos de carbono e água são componentes essenciais (ARAYA *et al.*, 2021; CHRISTMANN, 2021; KINNUNEN *et al.*, 2021).

Nos últimos anos, a importância do desenvolvimento econômico de baixo carbono tem sido reconhecida globalmente. Nesta perspectiva, a redução dos impactos ambientais da mineração, extração e processamento de minerais tem uma função estruturante para a sustentabilidade, a saber: o fornecimento de

matéria-prima essencial para o desenvolvimento tecnológico, que permite a redução do impacto ambiental em todas as atividades humanas. Não obstante, a gestão ambiental na mineração enfrenta grandes desafios, associados principalmente às dificuldades de manuseio e descarte dos rejeitos (SRIRAMOJU *et al.*, 2021). Para facilitar o entendimento sobre a importância da atualização do estado da arte na gestão ambiental de minas, foi elaborada uma análise histórica sobre a evolução do conceito de sustentabilidade.

#### **4.1.1. Discussão dos resultados sobre sustentabilidade em mineração**

A busca por uma produção mais limpa tem sido amplamente reconhecida como um dos melhores caminhos para se alcançar a sustentabilidade. Ela visa maximizar a eficiência energética e minimizar os efeitos negativos da atividade sobre o ecossistema em todo o ciclo de vida de um processo, ou produto. Trata-se de uma estratégia de prevenção e controle da poluição industrial, desenvolvida para a promoção de benefícios ambientais e humanos (AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018; DONG *et al.*, 2019).

A sustentabilidade nasceu como um conceito derivado da noção de desenvolvimento sustentável, apontado como desejável pelo relatório Brundtland, no início da década de 1980. Este documento, intitulado “Nosso Futuro Comum”, é o resultado de uma série de debates apresentados na primeira conferência global sobre o meio ambiente, realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em Estocolmo, no ano de 1972, quando representantes de 112 países e uma chefe de Estado, a primeira-ministra da Índia, Indira Gandhi, se reuniram para debater com cientistas a participação antrópica nas mudanças climáticas.

Embora o aquecimento global já fosse um fato reconhecível, a participação das atividades humanas no mesmo era discutível. Além disto, havia uma polarização entre países desenvolvidos, que atribuíam o crescimento da pegada ambiental à explosão demográfica nos países pobres, ao passo que estes não estavam dispostos a abrir mão da sua luta por industrialização e progresso. O bloco dos países subdesenvolvidos venceu a disputa, formando uma maioria

sólida, que agremiou 77 representações diplomáticas, encabeçadas pelo Brasil e pela Índia.

Do lado brasileiro, o posicionamento antiprotecionista era marcado por uma posição favorável aos investimentos poluidores (DIAS, 2004, p. 36). Pelo lado da Índia, Indira Gandhi<sup>1</sup>, adotava uma posição mais moderada, defendendo a necessidade de desenvolvimento acima da preservação (GANDHI, 1972, par. 8º). O bloco subdesenvolvido, com a força da maioria, conseguiu tanto postergar por décadas a implantação de políticas protecionistas e de controle da natalidade, destinadas a frear o aquecimento global oriundo da pressão antrópica, quanto ofereceu a motivação para que os países desenvolvidos não trabalhassem em tempopara alterar os rumos da degradação ambiental em suas áreas de influência.

O conceito de desenvolvimento sustentável se tornaria público e notório em março de 1987, em decorrência dos trabalhos de uma comissão de notáveis instituída pela ONU para avaliar a pressão antrópica sobre o ambiente. O Relatório Brundtlandfoi bastante otimista, visando a “possibilidade de uma nova era de crescimento econômico, que deve ser baseada em políticas que sustentem e expandam a base de recursos ambientais”. A fórmula encontrada pela comissão, que ficou conhecida como desenvolvimento sustentável, consiste em tomar as decisões estratégicas como objetivo de garantir os recursos necessários para o sustento da geração atual e das próximas (OUR COMMON FUTURE, 1987, p. 11, livre tradução do autor).

Em 1992, nova conferência ambiental realizada no Rio de Janeiro (Eco-92), viria a ratificar o posicionamento da comissão Brundtland, propondo uma agenda de objetivos com vistas ao desenvolvimento sustentável em escala global. Mesmo considerando as iniciativas assumidas na Eco-92 e no desenvolvimento do protocolo de Quioto, que foi negociado em 2001, visando a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) por meio da criação de um mercado de sequestro dos mesmos, não tardaria a se tornar claro que tais

---

1 1 Cf. original: “We do not wish to impoverish the environment any further and yet we cannot for a moment forget the grim poverty of large numbers of people. Are not poverty and need the greatest polluters?” (GANDHI, 1972, par. 8º).

agendas não passaram de um elenco de intenções. Elas nunca foram de fato efetivadas, uma vez que as metas locais e imediatas das partes envolvidas estão associadas ao avanço na demanda por consumo de recursos finitos e ao contínuo crescimento demográfico. Estes fatores permitem amplificar a pressão antrópica sobre o ambiente, a qual tende continuamente para o esgotamento ecológico e para a inviabilização da sobrevivência das gerações futuras.

Dessa forma, a ideia de desenvolvimento sustentável, convertida nas perspectivas econômica, ambiental e social, não progrediu como esperado, deixando em seu lugar uma noção vaga de sustentabilidade, que está muito mais atrelada às perspectivas financeiras e gerenciais, ou seja, à viabilidade econômica de uma organização e à sua imagem perante o público consumidor, está representada atualmente pela sigla ESG (*Environmental, Social and Governance*), que conta com indicadores financeiros e uma série de propagandistas pouco afeitos à conservação ambiental, mas bastante interessados nos dividendos oriundos de tal demanda. Foram relegadas a segundo plano as demandas sociais e ambientais, as quais se mostraram onerosas e pouco lucrativas. Não obstante, a ONU manteve viva a esperança de unir a coletividade global em função dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), lançados em 2015. Entretanto, a organização informa que, em 2020, os fluxos de investimentos nesta iniciativa “despencaram 35%”, afetando “setores relevantes” para os ODS (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2021).

Apesar da grande redução de investimentos nos ODS, em decorrência da pandemia de Covid-19, os objetivos da União Europeia para 2030, em matéria de ação climática, visam reduzir 55% das emissões de GEE, em comparação com os valores de 1990. Tais metas incluem a ampliação da matriz energética renovável, bem como a redução dos consumos de água e energia. Além disto, o velho continente prevê regulamentação para a gestão de resíduos, biodiversidade e adaptação das operações de mineração às mudanças climáticas (ALMEIDA *et al.*, 2021; KINNUNEN *et al.*, 2021), ou seja, mais barreiras alfandegárias e protecionismo comercial em relação aos produtos e serviços do mundo emergente.

Nesse contexto, a produção mineral tem sido considerada como fundamental para a prosperidade e a estabilidade econômica em escala global, tendo em vista a pressão demográfica e os avanços tecnológicos crescentes da humanidade. Apesar das dificuldades acima elencadas, o desenvolvimento e a disseminação de práticas sustentáveis de mineração, a partir da definição do relatório Brundtland, ou seja, sem comprometer a capacidade das gerações futuras, ainda se mostram como indispensáveis para a manutenção do setor extrativista mineral.

Em tal perspectiva, a mineração sustentável deveria suprir as necessidades da demanda atual por recursos, sem esgotar a capacidade de suprimento futuro, diretriz esta que orienta a governança ambiental em mineração e suas consequências.

Entretanto, esta atividade não pode ser considerada sustentável, quando comparada com as práticas e conceitos geralmente aplicados na gestão de recursos renováveis, uma vez que a mineração está sedimentada sobre a extração de recursos finitos, de forma que o desempenho sustentável, neste caso, se apresenta a partir da maximização dos efeitos positivos e minimização dos efeitos negativos da atividade (LANGFELD; BINDER, 2017).

A busca por maximizar o suprimento de insumos essenciais para as próximas gerações demanda investimentos na redução de desperdícios, bem como o aumento da eficácia dos processos integrados à abertura e exploração das minas (NTLHABANE *et al.*, 2018). Nesta perspectiva os rejeitos, estéréis, escórias, túneis de acesso às jazidas e até mesmo o calor em profundidade começam a ser tratados como recursos, com potencial de ganho de produtividade para a mineração, seja para o depósito de energia; sequestro de CO<sub>2</sub>; bioextração; fitomineração; pelo potencial de recuperação de metais residuais; reciclagem de escória e rejeito; ou até mesmo pelo desbloqueio de novas fontes de energia, como a geotérmica, tendo em vista a necessidade de enfrentamento do aquecimento global e de transição energética em curso (HUNT *et al.*, 2014; DONG *et al.*, 2019; LANGFELD; BINDER, 2017; LI, 2021).

Caracteriza-se, desta forma, a geração de energia limpa e o sequestro de GEE como fontes de recursos derivados de projetos de mineração sustentável, os quais

fornece potencial de ampliação do ciclo de vida das minas, melhoria dos impactos socioambientais positivos da atividade e reversão da má percepção generalizada sobre as atividades da indústria de mineração.

Como evolução do conceito Brundtland, aplicado à realidade da mineração, Hunt *et al.* (2014) destacam a noção de sustentabilidade, que considera a disponibilidade dos elementos químicos para as gerações futuras. Nesta perspectiva, as substâncias não estão sendo destruídas pelo processo de extração, mas sim dispersas na tecnosfera, de modo que a viabilidade da recuperação das mesmas se torna mais cara e problemática, após a passagem pelos processos industriais e de consumo. Adiante são abordadas algumas relações fundamentais entre sustentabilidade e mineração, no que tange à análise fitossociológica.

#### **4.1.2. Sustentabilidade e Mineração**

Dentre as dificuldades de governança enfrentadas pelo setor de extrativismo mineral, destacam-se o desperdício de rendas minerais pelas elites políticas em alguns países ricos em minerais; a corrupção; a busca por lucros de curto prazo; a evasão fiscal; e a falta de transparência nos projetos de exploração (CHRISTMANN, 2021). Para que o setor mineral alcance um patamar superior de governança corporativa, associada à responsabilidade social e ambiental, faz-se necessário que os envolvidos percebam a importância estratégica dos recursos naturais, apoiando esforços necessários para desenvolver uma maior circularidade dos mesmos. Conforme Almeida *et al.* (2021b), dentre os principais objetivos de governança mineral, destacam-se:

- a) Conceber recursos inovadores e materiais eficientes;
- b) Conceber produtos utilizáveis e recicláveis por meio de *ecodesign*;
- c) Desenvolvimento da reutilização, renovação e remanufatura de componentes específicos, com reciclagem no fim da vida;
- d) Luta contra a obsolescência programada;
- e) Aplicação do princípio da ecologia industrial, onde os resíduos de uma indústria são usados como recurso para outra;



f) Relato público das empresas sobre seu desempenho social, econômico, ambiental e de governança corporativa (ALMEIDA *et al.*, 2021a).

Os pressupostos mencionados anteriormente corroboram a hipótese levantada por Ntlhabane *et al.* (2018), para quem a indústria de mineração encontra-se em uma encruzilhada tecnológica econômica, na qual são apresentados desafios múltiplos, relativos ao aumento de custos operacionais, redução da produtividade, volatilidade do mercado e desequilíbrio entre oferta e procura. A necessidade de extração em jazidas com concentrações minerais de baixo teor, que apresentam maior complexidade química em seus insumos, implica o desenvolvimento e aplicação de técnicas de mineração mais agressivas, com aumento da drenagem ácida de rochas, que está associada a impactos severos no ambiente, principalmente em locais áridos (NTLHABANE *et al.*, 2018). Neste contexto, a necessidade de aplicação das melhores práticas disponíveis para prevenção e mitigação de impactos ambientais e sociais negativos se converte em requisitos de produtos e de processos, os quais são a cada dia mais fiscalizados pelos clientes e investidores, principalmente no que se refere ao acesso aos mercados do hemisfério norte que, via de regra, impõe a tendência para as ações futuras em termos de tecnologias, normalização, investimentos e governança corporativa.

A partir desse novo direcionamento para a indústria de mineração, podem ser identificados projetos que visam a implementação de tecnologias orientadas para o tratamento de águas residuais, bem como para a redução do consumo de recursos energéticos, otimização no armazenamento e tratamento de rejeitos, os quais contribuem, por exemplo, para atingir alguns dos 17 ODS, propostos pelas Nações Unidas em 2015, tais como o ODS – 6 “Água limpa e saneamento” e o ODS – 15 “Vida na Terra”. Outrossim, a otimização no uso energético detém o potencial de reduzir as emissões de GEE pela atividade de mineração, colaborando com os objetivos ODS – 7 “Acesso à energia e sustentabilidade” e ODS – 13 “Ação climática” (DI NOI; CIROTH, 2018, p. 2). Dentro desta perspectiva, emergente para a mineração, surge a demanda por identificar e quantificar o anseio por recuperação ambiental. Neste contexto, faz-se mister a tipificação fitossociológica de áreas e comunidades degradadas pela extração, na

qual as avaliações sobre potabilidade da água e fertilidade do solo são determinantes para a interdição de atividades danosas e a implantação de propostas mitigadoras (ARAYA *et al.*, 2021).

Torres *et al.* (2017), dedicados ao cálculo do sequestro de carbono em florestas, propõem como parâmetros funções demográficas e fitodistributivas: densidade; frequência; dominância; e valor de importância das espécies locais. Nesta perspectiva, se pode avaliar o grau de impacto ao ambiente inferindo o empobrecimento da diversidade de plantas e animais, quando causados por uma atividade econômica, como a mineração. Os níveis de degradação estão inversamente correlacionados com a diversidade biológica, quando comparada com áreas preservadas. Esta forma de quantificação é útil para o cálculo dos passivos ambientais derivados de intervenções antrópicas. A mensuração de custos ao biota viabiliza metas de redução e compensação dos impactos negativos tanto ao ambiente, quanto às comunidades.

Os indicadores de biodiversidade são úteis para o entendimento e cálculo dos impactos socioculturais de atividades produtivas em comunidades tradicionais, fomentando a tomada de decisões no sentido de melhorar a governança das empresas no contexto da sustentabilidade. Por exemplo, o adensamento demográfico pode ser um fator decisivo na destruição de uma cultura nômade, ou seminômade, ao passo que o aumento da frequência e dominância de uma espécie sobre as outras são indicativos de empobrecimento do biota. A ocorrência de espécies raras, ou relevantes para a dispersão de sementes e sustento, seja da fauna, seja das comunidades tradicionais, por seu turno, é um indicador de preservação ecológica.

A aplicação de tais recursos analíticos para tipificar fitossociologicamente o entorno das jazidas permite avaliar a necessidade de intervenção do Estado, seja por restrição às atividades predatórias, seja para o incentivo às boas práticas de mineração de maneira a estimular a gestão ambiental responsável em escalas regionais e nacionais. Além disto, a avaliação permite a produção de índices úteis para verificar o alcance de metas associadas aos ODS, as quais estão relacionadas também ao desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias sustentáveis.

### 4.1.3. Impacto da Mineração no Solo

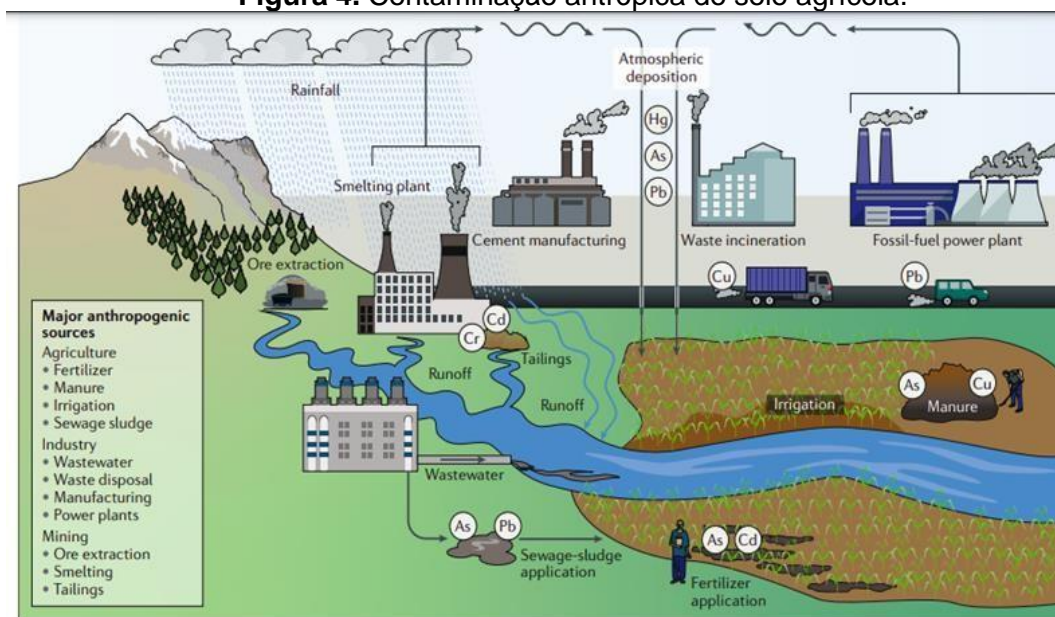
A contaminação do solo é outro dos fatores críticos para o desenvolvimento e manutenção das sociedades contemporâneas. Trata-se de um recurso não renovável, com taxa de expansão da ordem de poucos centímetros de profundidade por milhares de anos. Este recurso fornece os meios básicos de sobrevivência para a maioria das espécies do planeta, servindo também para o fornecimento de sustento às populações humanas. Apesar de tal relevância, o solo agricultável encontra-se em franco processo de contaminação e degradação em todo o planeta. Apenas na Europa já foram contabilizados 2,8 milhões de locais com solo contaminado. Na China, por exemplo, em 2018 foram constatados tóxicos nocivos acima dos padrões aceitáveis em 19% do território agrícola, sendo o cádmio o principal contaminante presente nos arrozais chineses. Tal fato tem levado à indisponibilidade de milhões de hectares de terras agricultáveis (HOU *et al.*, 2020).

Para evitar efeitos degradantes ao solo, faz-se mister a análise prévia sobre os contaminantes presentes na mina, a fim de estabelecer margens operacionais de segurança. Os elementos com potencial de toxidez devem ser avaliados em sua concentração no solo para estabelecer a capacidade de produção de drenagem ácida na mina, estimando-se a presença de minerais primários e secundários na jazida e o potencial de mobilidade no ambiente dos elementos perigosos. Outros estudos que auxiliam na avaliação de risco para o solo, antes da abertura de uma mina, são as análises de dispersão de contaminantes residuais; de estabilidade estrutural dos mesmos; de bioacessibilidade humana; fator de enriquecimento; índice de geoacumulação; análise da qualidade dos sedimentos; avaliação de riscos ecotoxicológicos, dentre outros (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; AZNAR- SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

Conforme Hou *et al.* (2020), oito dos 17 ODS dependem de solos saudáveis. No ambiente denominado 'solo' se encontra o maior reservatório de carbono do planeta, de forma que um dos efeitos indesejáveis da contaminação do solo é que a degradação e o desequilíbrio físico-químico deste recurso podem

levar à liberação de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> e de outros GEE, além de reduzir a capacidade do solo de sequestrar tais gases. Esse efeito altera negativamente o ciclo de carbono e contribui para o agravamento do aquecimento global. Outrossim, a perda de fertilidade decorrente da contaminação do solo detém o potencial de reduzir e encarecer a produção agrícola, trazendo insegurança alimentar, instabilidade econômica e caos social, em decorrência da fome, desnutrição e demais efeitos da escassez de alimentos. Foram constatados também efeitos neurológicos e carcinogênicos decorrentes da ingestão de culturas produzidas em solos contaminados (HOU *et al.*, 2020). A Figura 4 ilustra os principais fatores antrópicos que contribuem para a degradação do solo agrícola.

**Figura 4.** Contaminação antrópica do solo agrícola.



Fonte: Hou *et al.* (2020, p. 4).

Dentre as contribuições da extração mineral para a degradação do solo, destaca-se a deposição de metais pesados, ou metaloides (principalmente cádmio, arsênico, cobre, mercúrio, chumbo e cromo), muitos dos quais são biodisponíveis para absorção em culturas agrícolas e pecuárias, além de não serem biodegradáveis e apresentarem severas características de toxicidade para

a biota. Tais fatos resultam na percepção da contaminação do solo por metais pesados como uma das principais ameaças à segurança alimentar do planeta. Esta segurança depende, até 2050, da duplicação na capacidade de produção agrícola, a fim de eliminar a fome e atender à pressão demográfica crescente. Diante desta emergência ambiental e social, a China projetou ações para descontaminar 700 mil hectares de solo até 2020 e 95% das áreas indisponíveis por toxicidade até 2030. No contexto da mineração se destacam, como soluções para a degradação do solo, tanto processos naturais, quanto antropogênicos, tais como a eliminação da drenagem ácida, controle do transporte atmosférico, deposição adequada de rejeitos, biorremediação, reciclagem de rejeitos e fitoextração (HUNT *et al.*, 2014; MSAGATI; MAMBA, 2017; HOU *et al.*, 2020).

As principais técnicas de prevenção e mitigação, em relação aos impactos da mineração ao ambiente solo, são o selamento; a descrição geográfica da mobilidade dos resíduos; o controle do desmantelamento biogênico e mineral dos sulfetos; as análises da formação de jarosita e de sulfatos de ferro solúveis; a monitoração do intemperismo e da oxidação da escória; a imobilização de oligoelementos; a aplicação de micro-organismos para estabilização química dos resíduos minerais, a remediação e controle da drenagem ácida (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

A aplicação de rejeitos em vazios de minas é também uma forma de estabilizar o subsolo, minimizando o potencial de acidentes geológicos. Esta técnica pode ser aplicada com rejeitos secos, cimentados, hidráulicos ou pastosos. Além desta, a literatura também registra a utilização de coberturas secas, com água, lodo (lama vermelha + resíduos de rochas), cobertura consumidora de oxigênio (resíduos industriais alcalinos) e descarte subaquático como formas de evitar a drenagem ácida. Alternativamente, coberturas de carbono orgânico (madeira e resíduos vegetais) têm sido utilizado como eliminador de oxigênio, de forma a reduzir os impactos no solo por drenagem ácida (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017).

Normalmente, o estéril e os rejeitos são depositados em pilhas e em barragens, ou tanques de rejeitos, conforme a legislação local, sendo levados para reciclagem, quando viável. Há evidências, entretanto, de que parte

considerável dos recursos minerais têm sido deixados para trás nos processos de mineração, principalmente em forma de rejeitos, contaminando o solo (LÉBRE; CORDER; GOLEV, 2017; AZNAR- SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

O aproveitamento de rejeitos e estéril é um tema que vem ganhando relevância, diante da necessidade de dar destinação sustentável aos resíduos da mineração em consequência, principalmente, dos desastres das barragens de rejeito em Mariana e Brumadinho, bem como a partir da busca por práticas de mineração mais sustentáveis. As estruturas utilizadas como depósitos de rejeitos podem ser consideradas inertes, quando não apresentam risco ao ambiente, ou perigosas, quando apresentam efeitos negativos para o solo, águas, vegetação, fauna, ou populações humanas. Os riscos de toxicidade dos depósitos podem ser classificados como agudo, crônico, ou extrínseco, estando associados às características químicas dos rejeitos, tais como inflamabilidade, reatividade, corrosividade (AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

Atualmente, a produção mundial de rejeitos minerais é estimada em até cinquenta bilhões de toneladas por ano. Nas minas de cobre, por exemplo, a taxa de descarte de minério processado varia entre 95 e 99% do volume lavrado. Tal quantidade de material armazenado tem produzido contaminação do solo, água, falhas catastróficas nas instalações de armazenamento e até fatalidades humanas (CHRISTMANN, 2021; HEFNI *et al.*, 2021). Dados do Relatório Anual de Lavra (RALao) da Agência Nacional de Mineração (ANM), no período de 2010 a 2019, estimam que no Brasil 3,4 bilhões de toneladas de rejeitos e 8,2 bilhões de toneladas de estéril foram geradas na mineração de ferro, ouro, cobre, fosfato, estanho, alumínio, níquel, carvão, manganês, zinco, cromo e vanádio (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2020). Um efeito sistêmico da contaminação do solo por metais pesados é a indisponibilidade de áreas que foram agricultáveis, o que afeta negativamente a relação entre as mineradoras e as comunidades locais, uma vez que promove a escassez de alimentos e outros problemas econômicos.

Esses dados demonstram a importância do tema, em face do volume gerado de rejeitos e do potencial de recursos que podem estar disponíveis nos mesmos, se considerados como fontes secundárias de mineração, objetivando a

ampliação do ciclo de vida das minas e a sua inserção no fluxo de valor de uma produção mais limpa, uma adição à noção de sustentabilidade, que pode ser aplicada à mineração no aproveitamento dos rejeitos de mineração.

#### 4.1.4. Contaminação Ambiental e suas Consequências

Dentre os impactos mais significativos da contaminação oriunda da extração mineral, salta aos olhos a deposição de pirita (dissulfeto de ferro -  $\text{FeS}_2$ ) que, pasmem, prejudica até o concreto, por meioda aceleração da corrosão do aço e enfraquecimento das armaduras na construção civil (CAPRARO *et al.*, 2020). Esse resíduo mineral, também conhecido como ouro detolo, pode ser encontrado em diversas minas e está associado frequentemente à extração de carvão e de outras rochas sedimentares, além de estar presente na lavrade ouro (Figura 5).

**Figura 5.** Contaminação do ambiente por pirita.



**Fonte:** Bancários - PA (2021, p. 1).

A Figura 5 evidencia os impactos da contaminação por pirita nas imediações de uma mina de ouro, que invade terras da etnia Munduruku, na região do médio Tapajós, no Pará, em 2020 (BANCÁRIOS - PA, 2021). A contaminação dos cursos d'água por pirita se dá por meio de um "processo pedogenético denominado de sulfurização, onde os materiais contendo sulfetos são oxidados, formando ácido sulfúrico, gerando condições extremamente ácidas





protegidos das intempéries, visto que quanto mais minerais são extraídos do solo, menor a proporção economicamente viável e maior o volume de resíduos produzidos por lavra. Se fosse possível, a utilização em larga escala de empilhamento a seco exigiria uma quantidade insustentável de galpões para proteger os resíduos das precipitações.

A solução definitiva, que não interessa aos mineradores e a seus sindicatos, seria reaproveitar os resíduos, desenvolvendo destinações industriais para os mesmos. Isto, entretanto, elevaria sobremaneira o custo da extração, visto que demanda o investimento em industrialização, infraestrutura, logística, desenvolvimento tecnológico e humano de regiões subdesenvolvidas é pouco atraentes para o grande capital, que apenas se interessa em manter os passivos ambientais no lado sul do planeta Terra, enquanto extrai suas riquezas naturais para continuar enriquecendo onorte.

Outro resíduo de minas muito preocupante é o Arsênio (As), um metaloide naturalmente líquido, com alto potencial de contaminação das águas superficiais e subterrâneas, frequentemente associado ao resíduo de minas. O nível de toxidez do elemento varia conforme o pH da solução, o intemperismo oxidativo e a dissolução de minerais contendo os íons na forma inorgânica  $As^{3+}$  trivalente (arsenito, o ácido arsenioso), ou  $As^{5+}$  pentavalente (arsenato, ou ácido arsênico), os quais possuem altíssimo potencial de risco para o consumo humano e animal, sendo considerados como contaminantes, quando presentes em meio aquoso em concentrações superiores a 0,01ppm. Tais resíduos são dispersos a partir de rochas como arsenopirita, pirita e outros rejeitos de minas, principalmente de origem vulcânica. O Arsênio inorgânico dissolvido é transportado em águas superficiais ou subterrâneas, contaminando o solo. Não obstante, os resíduos concentrados de pirita ricos em Arsênio são geralmente estocados na área de lavra, como um depósito mineral para processamento futuro. Isto ocorre porque minerais preciosos estão frequentemente presentes nos resíduos, mesmo que em pequenas concentrações (SOUZA *et al.*, 2014; KYZAS; MATIS, 2016).

Souza *et al.* (2014) informam que os compostos de Arsênio são facilmente absorvidos pela biota, tanto pelos pulmões, quanto pelos tratos gastrointestinais, onde pode chegar a proporções de 95% de absorção, no caso das formas

inorgânicas do elemento, produzindo efeitos sistêmicos, com acumulação e absorção dérmica e epidérmica. De forma geral, o arsênio absorvido pelos organismos superiores é distribuído pelo corpo em até 24h, após a contaminação, cujo transporte se dá pelo sangue, através da hemoglobina, leucócitos e plaquetas, acumulando-se em órgãos ricos em enxofre, tais como fígado, rins, baço e glândulas adrenais. Quatro semanas após a contaminação, o Arsênio se acumula nos ossos, podendo ocorrer transferência transplacentária para os fetos em casos de consumo de água contaminada (0,36 µg L<sup>-1</sup> para As total). A principal forma de eliminação do Arsênio pelos organismos superiores é através da urina, que carrega os compostos orgânicos contaminados para o solo e água, consolidando o aspecto sistêmico da intoxicação alimentar, o qual levou a *European Food Safety Authority* (EFSA) a concluir que a principal fonte de Arsênio para crianças e lactentes é o arroz.

A exposição prolongada ao elemento está associada a problemas cardiovasculares, com preponderância de hipertensão e diabetes em populações do Irã e Bangladesh. Casos relatados de cronicidade da exposição ao Arsênio foram associados a “[...] conjuntivite, hiperqueratose, hiperpigmentação e gangrena nos membros. Espécies inorgânicas de As são consideradas carcinógenos humanos classe I, pois estão associadas ao desenvolvimento de cânceres de pele, pulmão, bexiga e rim”, de forma que a presença de tais agentes no ambiente se configura como problema de saúde pública, com efeitos ambientais negativos e sistêmicos reconhecidos desde o final do século XIX (SOUZA *et al.*, 2014, p. 118–19).

Outro contaminante de alto impacto negativo na mineração é o mercúrio, associado frequentemente à busca por ouro. Inúmeras comunidades, como os povos Yanomami, nas imediações do Rio Uraricoera, em Roraima, sofrem constantemente as consequências ambientais, sociais e humanitárias desta mazela. No caso da exploração ilegal de ouro (garimpo), são violados princípios éticos, jurídicos, científicos, econômicos e ambientais, que tendem a culminar com a destruição do modo de vida da etnia nativa (RAMOS; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2020). Neste contexto, a utilização do mercúrio para acelerar a mineração de ouro se caracteriza não apenas como um crime ambiental, pela

destruição da potabilidade e vida aquática na bacia hidrográfica afetada, mas também uma situação de lesa-humanidade<sup>2</sup>, visto que a própria dignidade da espécie é insultada pelo descaso das autoridades públicas para com a realidade dos povos originários. No caso da mineração em terras Yanomami, trata-se de um risco eminente de extermínio de várias etnias, como consequência do atentado contra a paz milenar e o direito incontestável ao território herdado de seus ancestrais, cuja titularidade é legalmente reconhecida pelo governo brasileiro desde 1992.

É impossível calcular a quantidade exata de mercúrio depositado no ambiente em função da mineração de ouro, haja vista a ilegalidade do garimpo. Não obstante, estima-se a proporção em 1:1, ou seja, para cada Kg de ouro garimpado, que representa em torno de 37% da produção mundial, um Kg de mercúrio foi lançado em terras e rios de povos autóctones. Na década de 1980, algo entre mil e duas mil toneladas de mercúrio foram lançadas no ambiente amazônico, em consequência do extrativismo mineral. Some-se a isto o fato de que o solo da região é naturalmente rico em mercúrio, e tem-se uma receita para o extermínio sistemático de um povo pacífico, ou seja, um crime de lesa-humanidade. Esse mercúrio do solo é exposto pelo desmatamento e carregado para os leitos dos rios pelo intemperismo, aumentando a concentração nas águas, onde a assimilação por micro-organismos insere o mercúrio nas cadeias alimentares, potencializando a contaminação sistêmica do ambiente (RAMOS; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2020).

Uma vez contaminada a cadeia alimentar dos povos invadidos pelo garimpo, o metal pesado introduzido pela mineração manifesta uma alta capacidade de bioacumulação, por meio da sua recombinação orgânica, em forma de metilmercúrio, causando danos permanentes e severos à saúde humana e à vida animal. O mercúrio é um metal com propriedades neurotóxicas, que é capaz de ultrapassar as barreiras de proteção natural do cérebro e do sangue,

---

3 2Instituído pelos Princípios de Nuremberg (de 1950), o crime de lesa-humanidade é admitido pelo direito internacional como *ius cogens* (direito cogente ou imperativo), pelo qual os signatários da ONU são obrigados a investigar e punir "o extermínio, a escravidão, a deportação e qualquer outro ato desumano contra a população civil, ou a perseguição por motivos religiosos, raciais ou políticos, quando esses atos ou perseguições ocorram em conexão com qualquer crime contra a paz ou em qualquer crime de guerra" (GOMES, 2009, p. 1).

provocando severas alterações na homeostase orgânica. Ainda assim, é utilizado na mineração devido à sua característica de ligação ao ouro, que permite evidenciá-lo entre outras rochas. Após encontrado o metal precioso, a forma utilizada para separação do mercúrio nos garimpos é o aquecimento, que leva à evaporação do metal, que contamina os próprios garimpeiros e o seu entorno. Aproximadamente 20% do mercúrio utilizado na mineração de ouro é lançado nos rios; 80% evapora no aquecimento do amálgama e retorna para o ambiente pelas precipitações, contaminando a água, plantas e solo. Isto permite o acúmulo nas cadeias alimentares da região afetada. Conforme Ramos, Oliveira e Rodrigues (2020), a contaminação por mercúrio provoca distúrbios neuropsíquicos, vômitos, diarreia, alterações de personalidade, ansiedade, perda da capacidade de concentração, depressão, irritabilidade, anorexia, insônia, tremores e distúrbios renais. A intoxicação aguda pode levar a óbito de um a cinco dias.

A extração de ouro no estado de Roraima, extremo norte do Brasil, onde vivem várias comunidades Yanomami, é completamente ilegal. Além disso, o ouro e demais recursos minerais ali presentes são de propriedade da República Federativa do Brasil, conforme a legislação vigente, de forma que a mineração naquela região não gera recursos significativos para o Estado (R\$874,00 em 2016), deixando incalculáveis passivos ambientais e sociais. Nas esferas federal e estadual, o órgão responsável pela fiscalização da venda de mercúrio é o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (RAMOS; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2020). A atividade do órgão ambiental brasileiro, em relação à apreensão de mercúrio no estado de Roraima pode ser analisada no Quadro 3:

**Quadro 3.** Apreensões de mercúrio realizadas pelo IBAMA no Estado de Roraima, de 2013 a 2017.

Ano	Quantia	Observação
2013	0	Não há registro de apreensões realizadas pelo IBAMA.
2014	0	Não há registro de apreensões realizadas pelo IBAMA.
2015	0	Não há registro de apreensões realizadas pelo IBAMA.

2016	0	Não há registro de apreensões realizadas pelo IBAMA.
2017	886g	Processo administrativo 02025101108 / 2017-79.

Fonte: Ramos, Oliveira e Rodrigues (2020, p. 7)

**Figura 6.** Ponte sobre o Rio Tacutu, principal rota de tráfico de mercúrio para as terras Yanomami.



Fonte: Universidade Federal de Roraima (2018, p. 1).

O IBAMA registrou, entre 2013 e 2017, a apreensão de 886g de mercúrio em Roraima (Quadro 3), metal que pode ser comprado em arrobas em sites de comércio eletrônico. Ele entra livremente pela divisa com a República Cooperativa da Guiana, através da ponte sobre o rio Tacutu (Figura 6), evidenciando o descaso do governo brasileiro para com o severo impacto negativo da mineração sobre as comunidades originais da Amazônia e o meio ambiente da região.

#### 4.1.5. Impacto Social da Mineração

Frequentemente, os sindicatos de mineradores e lobistas associados requerem a geração de emprego como uma bandeira universal em favor da atividade de extração mineral, alegando a criação de 266 mil empregos diretos e indiretos no Brasil, além de um bocado considerável da balança comercial, conforme *In the Mine* (2020). Não obstante, quando comparamos esses números

com um mercado de trabalho da ordem 100 milhões de pessoas em idade laboral e com o impacto negativo da atividade, estes números não parecem tão atraentes. A título de comparação, em 2002 foram registradas 4,6 milhões de postos de trabalhos diretos e indiretos na cafeicultura de Minas Gerais, uma das 27 unidades da República. Apesar desta enorme demanda de mão de obra, a cafeicultura mineira registrou tão somente R\$ 2 bilhões (US\$ 0,8 bi), relativos ao saldo positivo da balança comercial desta cadeia produtiva, evidenciando que exportação e desenvolvimento não são sinônimos. Neste caso, muito da riqueza produzida pelo agronegócio de Minas Gerais é consumida e reproduzida dentro das fronteiras nacionais, gerando mais empregos e mais renda para o povo nativo, sem precisar de recursos estrangeiros, reduzindo a dependência e potencializando a operatividade nos arranjos produtivos locais (SANTOS *et al.*, 2009).

Não há dúvida de que os recursos minerais são indispensáveis para o domínio e desenvolvimento tecnológico, cuja falta pode se constituir como um limitante à industrialização. Apesar disto, países altamente desenvolvidos, como Liechtenstein, Japão, ou a Suíça, simplesmente não os possuem em quantidades consideráveis e nada indica que tais recursos lhes façam falta, visto que as commodities estão no balcão, a preços módicos, em grandes quantidades e para quem puder comprar. O extrativismo, tanto vegetal, quanto mineral, é o setor mais primitivo de dominação da natureza e organização da sociedade, de forma que, apesar dos esforços de lobistas e sindicatos, a mineração permanece associada com muito mais propriedade à guerra e à destruição, do que à construção e à operatividade, propriamente identificadas como progresso. Este não é um fenômeno de fácil explicação, tão pouca regra, mas evidencia que o progresso econômico não está ligado à exportação de recursos naturais. Se assim o fosse, o Brasil e boa parte dos países africanos estariam na liderança do desenvolvimento humano.

Não obstante, são considerados como efeitos sociais positivos da mineração o potencial de redução das taxas de desemprego, que promove o desenvolvimento econômico – ODS-3 “Saúde e bem-estar” – e reduz a discriminação e as desigualdades sociais, desde que observada a

responsabilidade social dos atores envolvidos, de forma a evitar conflitos armados e combater a corrupção, por meio de níveis adequados de governança corporativa e transparência. Tal postura pode colaborar também com os ODS-1 e ODS-10: “Acabar com a pobreza” e “Redução das desigualdades”, respectivamente. Outrossim, a implantação de uma mina detém o potencial de investimento em infraestruturas sociais relevantes, como estradas, hospitais e escolas, de forma que a análise de risco social se tornou um tema fundamental para o desenvolvimento e sustentabilidade das atividades de mineração (DI NOI; CIROTH, 2018; CHRISTMANN, 2021).

Do ponto de vista negativo dos impactos sociais da mineração, são observadas também alterações no uso tradicional do solo, poluição, escassez de água, alteração das redes locais de infraestrutura, desequilíbrio no desenvolvimento industrial, reassentamento compulsório, alterações na dinâmica econômica da sociedade, concentração de renda, especulação imobiliária, etc... (AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018). Não bastassem os já mencionados, outro impacto socioeconômico negativo preocupante, derivado de baixos níveis de governança na atividade de mineração, é a possibilidade de formação de cartéis e de oligarquias criminosas, associadas à atividade, como a exploração de terras raras e ouro, por exemplo. Como são poucas as minas de terras raras em condições de operar comercialmente, as mesmas oferecem a possibilidade de monopólios locais e cartéis regionais, impactando negativamente o desenvolvimento de tecnologias verdes e militares, essenciais tanto para o equilíbrio geopolítico e manutenção da paz, quanto para a transição para uma economia mais limpa (DONG *et al.*, 2019).

Também pode ser observado tal fenômeno em mercados sem regulação, como os garimpos irregulares de ouro em terras indígenas no Brasil, os quais têm gerado sérios problemas sociais e ambientais associados ao crime organizado, à expulsão dos povos da floresta e ao comércio ilegal de minerais preciosos (RAMOS; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2020). Na seção seguinte é discutida a viabilidade de algumas das principais alternativas para o aproveitamento de rejeitos na mineração.

## **4.2. Emprego de Rejeitos na Construção Civil**

De acordo com parte significativa dos artigos consultados, as alternativas orientadas para a redução do volume de estéril e rejeito estão ligadas ao aproveitamento destes para a construção civil, para uso no subleito de estradas e na produção de materiais de pavimentação, por exemplo. Trata-se de uma alternativa técnica de beneficiamento mineral que reduz a necessidade de utilização de barragens de mineração. Essas práticas, voltadas para a produção mais limpa, permitem também o aumento do ciclo de vida das minas, promovendo a sustentabilidade do setor de extração mineral (NAGARAJ; SHREYASVI, 2017).

### **4.2.1. Produção de Rejeitos pela Mineração**

A fim de caracterizar a geração de rejeitos na indústria de extração mineral, bem como tipificar seu impacto fitossociológico, adiante são abordados aspectos técnicos da mineração que foram considerados necessários para o entendimento do assunto pelo público leigo tanto no que se refere à produção de rejeitos, quanto à aplicabilidade prática das noções de sustentabilidade nesse ramo de atividades.

O processo de mineração é definido pelo Sistema de Classificação da Indústria da América do Norte (NAICS, na sigla em inglês) como a extração de depósitos minerais metálicos, ou rochas industriais. O termo mineração também é utilizado em sentido amplo, a fim de incluir pedreiras, operações em poços, beneficiamento de minérios e outras formas de processamento realizadas nas regiões de lavra. Trata-se, portanto, de atividade originada a partir de recursos finitos e não renováveis (LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017; DI NOI; CIROTH, 2018).

No contexto dessa atividade, a geração e disposição de resíduos são fatores críticos para o sucesso e manutenção das organizações, apresentando importantes implicações financeiras, ambientais e sociais. Os principais resíduos gerados por empresas de mineração são chamados de estéril, rejeito e escória.



Considera-se como rejeitos de minas os produtos de operações de processamento que não contêm minerais valiosos, ou que os contêm em quantidades cuja recuperação não é economicamente viável no momento. A composição do rejeito depende da natureza dos minérios de interesse e das técnicas de separação utilizadas. Normalmente, os rejeitos estão na forma de partículas finas, variando de 1 a 600  $\mu\text{m}$ , misturadas com água de processo e reagentes químicos. Frequentemente, os rejeitos são descarregados como lamas em barragens no local da mina, a fim de permitir a separação das águas residuais por decantação (ARAYA *et al.*, 2021; HEFNI *et al.*, 2021; KINNUNEN *et al.*, 2021).

Conforme a Agência Nacional de Mineração (2020), estéril é o nome dado ao material descartado diretamente na operação de lavra, sem processamento, ao passo que o rejeito corresponde à porção antieconômica, gerada após o beneficiamento do mineral. A concentração de metais pode variar nas jazidas desde algumas gramas por tonelada, no caso dos elementos do grupo da platina e ouro, até taxas percentuais, no caso dos minerais básicos (cobre, chumbo, zinco, ferro, dentre outros).

Não obstante, a recuperação dos elementos nunca é completa, gerando volumes significativos de metais residuais, presentes nos rejeitos e escórias. Esta é a denominação dada aos resíduos minerais decorrentes de processamento e seleção posterior à extração, o qual gera rejeitos em menor volume e com maior complexidade química. A diferença entre escória e rejeito é que este é produzido durante a extração, enquanto aquela é separada do mineral de interesse após a lavra. Há ainda os resíduos de rocha, extraídos para acessar as jazidas. As taxas de material residual, presentes em escórias e rejeitos, depende da tecnologia utilizada (HUNT *et al.*, 2014; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018; HEFNI *et al.*, 2021).

#### **4.2.2. Utilização de Rejeitos na Construção Civil**

Como a produção de rejeitos é um fator crítico para a mineração, a adesão desta indústria a tecnologias mais sustentáveis pode ser avaliada, por exemplo,

a partir de um estudo exploratório, que visou a substituição de areia de construção por rejeitos da mineração de cobre no Zâmbia. Os autores avaliaram a relação custo- benefício da reciclagem de tais insumos, indicando que o uso de rejeitos na composição do concreto detém o potencial de oferecer redução de custos para a construção civil e melhora nos indicadores ambientais da atividade de mineração (NAGARAJ; SHREYASVI, 2017; MOHAJERANI *et al.*, 2019; MULEYA *et al.*, 2021).

No campo da remediação, a indústria de mineração tem aderido principalmente às tecnologias de mapeamento de resíduos; controle da mobilidade de sedimentos tóxicos; mitigação da dispersão de metais tóxicos; processos bioquímicos e de dissolução em resíduos sulfurosos; eliminação geoquímica de rejeitos submarinos; volatilização de elementos tóxicos; biorremediação, dentre outras (AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018; HOU *et al.*, 2020).

Fóruns como a Revisão das Indústrias Extrativas do Banco Mundial (2001-2004), a Iniciativa Global de Mineração (1999-2002) e o Conselho Internacional de Mineração e Metais (estabelecido em 2001), orientaram a indústria extrativista a se posicionar como um ativo relevante para a sustentabilidade em escala global. Nesta perspectiva, o desenvolvimento das minas deve ser acompanhado sincronicamente pela inovação da tecnologia de proteção ambiental, que gradativamente se constitui em um procedimento de padronização sistemática em todo o ciclo de vida das minas. A aceleração da cultura de consumo e a crescente demanda por energia e minerais, entretanto, levam os recursos superficiais a se esgotarem rapidamente, impelindo o extrativismo a passar para o estágio de mineração profunda, que apresenta novos riscos e oportunidades para o setor (DONG *et al.*, 2019).

O desenvolvimento, aplicação e normalização de tecnologias voltadas para a economia circular e reciclagem de rejeitos se apresentam como casos de reapropriação de custos ambientais, atitude necessária para que a indústria mineral reverta sua imagem negativa, avançando em direção a melhores níveis de governança corporativa, rumo à sustentabilidade (HUNT *et al.*, 2014), ou seja, à adoção da perspectiva de que os elementos minerais não se perdem durante o processamento, apenas passam para novos ciclos de industrialização. O ponto

crítico,entretanto, para alcançar tais objetivos é integrar a produção mineral como o tratamento de rejeitos, de forma a promover a sustentabilidade.

Conforme Kefeni, Msagati e Mamba (2017), uma forma assertiva de ampliar o ciclo de vida dos processos de mineração é o reaproveitamento de rejeitos, que permite recuperar produtos valiosos, os quais ordinariamente seriam despejados no ambiente. Alguns dos recursos comerciais mais abundantes recuperados em laboratório, a partir dos rejeitos de mineração, são o hidróxido férrico, ferrita, sulfato de bário, gesso, metais de terras raras, enxofre e ácido sulfúrico. Além deles, foi observada a possibilidade de recuperação de metais de interesse comercial, tais como Fe, Cu, Zn, Ni e Co a partir da reciclagem de rejeitos, a qual também permite o sequestro de metais tóxicos<sup>3</sup>. Estes são insumos industriais de alto interesse comercial, com potencial de fomentar a inserção de processos cíclicos nas plantas de mineração, ampliando a vida útil das jazidas e fornecendo melhores índices de sustentabilidade para a atividade.

No campo tecnológico da utilização de rejeitos para a produção de cimento sedestaca o reaterro de pasta de cimento, testado pela primeira vez na mina Bad Grund, na Alemanha, durante a década de 1970. Naquela ocasião, os rejeitos da mina foram misturados com ligantes hidráulicos (3 – 7% em peso) e água para preencher os vazios subterrâneos. Mineradoras australianas e canadenses têm aplicado a técnica com sucesso desde então. Apesar de seu custo, relativamente alto, a prática permite a minimização de desastres geológicos, além de conter um potencial significativo de sequestro de carbono (LI, 2021; MARUTHUPANDIAN; CHALIASOU; KANELLOPOULOS, 2021).

Além do reaterro de minas, a integração dos rejeitos de lavra à indústria de construção civil é a solução mais destacadas na literatura revisada. São propostas destinações que vão desde o uso de escória para a base de estradas e taludes, até a produção de telhas e argamassa para impressão 3D com os rejeitos de mineração. Ao menos 14 dos artigos revisados tratam diretamente de estudos empíricos voltados para a viabilização de aplicações dos rejeitos na construção civil (NTLHABANE *et al.*, 2018).

Como muitos desses insumos detêm potencial ácido, uma das

---

3 Dentre os metais tóxicos passíveis de sequestro estão As, Sb, Pb, Cd e Mn.

preocupações recorrentes para aplicação em construção civil é com a possibilidade de os mesmos corroerem as armações de metal utilizadas em estruturas de concreto, produzindo riscos para as obras a longo prazo (MARUTHUPANDIAN; CHALIASOU; KANELLOPOULOS, 2021; MOHAJERANI *et al.*, 2019). Por isto, assim como nas aplicações agrícolas, não existe uma solução genérica, mas cada proposta precisa de avaliação técnica específica, considerando-se as características químicas dos rejeitos e as particularidades da aplicação a que se destinam.

### **4.3. Modelagem Produtiva Integrada**

A noção de modelagem produtiva integrada é um conceito adaptado, a partir de indústrias de alta tecnologia, notadamente a automobilística e eletrônica, aqui desenvolvido na busca por integração entre cadeias de suprimento, a qual permite reduzir os custos com estoque e transporte, minimizando desperdícios e avançando na sustentabilidade da produção (HUNT *et al.*, 2014; SANTOS; ALVES, 2014). Embora não houvesse um consenso sobre a nomenclatura nos artigos revisados, observou-se uma tendência, em certas soluções apontadas, para a integração entre os processos de geração de resíduos da mineração e outros setores produtivos, principalmente na indústria de construção civil. Tal consenso foi destacado pela análise semântica automatizada, de forma a compor a terminologia modelagem produtiva integrada, aqui desenvolvida (NTLHABANE *et al.*, 2018).

Um dos interesses recorrentes nas pesquisas revisadas é a conversão dos rejeitos de lavra em insumos para outras indústrias, aspecto no qual a reciclagem e o reúso dos rejeitos se torna pertinente para avaliar o potencial de geração de divisas, oriundas de passivos ambientais. Um caso de destaque é a extração de alumínio, que já conta, em algumas plantas, com a integração de taxas próximas a 10% dos rejeitos em outras cadeias produtivas (LUO *et al.*, 2017; CAPASSO *et al.*, 2019; MEHTA *et al.*, 2020; BRASIL MINERAL, 2022).

O objetivo da produção integrada é reduzir desperdícios, de forma que tanto os produtos, quanto subprodutos de processos são vistos como partes de

um supersistema, no qual todos os recursos podem e devem ter destinação. Trata-se de uma mudança de perspectiva, na qual não há espaço para resíduos, apenas para recursos. O Sistema Toyota de Produção já vem trabalhando com esta perspectiva na indústria automotiva há várias décadas e, em função disto, ganha mercado, reduz custos e torna as organizações que o adotam mais sustentáveis a cada dia (MANZARDO *et al.*, 2014; NORTHEY *et al.*, 2016; VIVAN; ORTIZ; PALIARI, 2016; NTLHABANE *et al.*, 2018). Algumas das práticas referenciadas na literatura, que podem ser classificadas como modelagem integrada na produção mineral são: a recuperação de recursos oriundos da drenagem ácida (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017); a recuperação de elementos de terras raras (MORAN-PALACIOS *et al.*, 2019; DUSHYANTHA *et al.*, 2020) a produção de geopolímeros, concretos e aglomerantes para construção civil (NAGARAJ; SHREYASVI, 2017; REIS; COLLARES; REIS, 2018; DI CARLO *et al.*, 2019; MOHAJERANI *et al.*, 2019; ESMAEILI; ASLANI; ONUAGULUCHI, 2020; MEHTA *et al.*, 2020; ALMEIDA *et al.*, 2021b; ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2021; BAMIGBOYE *et al.*, 2021; CARVALHO EUGÊNIO *et al.*, 2021; INCE *et al.*, 2021; MARUTHUPANDIAN; CHALIASOU; KANELLOPOULOS, 2021; MULEYA *et al.*, 2021; ZHANG; HEDAYAT; BOLAÑOS SOSA; GONZÁLEZ CÁRDENAS; *et al.*, 2021; ZHANG; HEDAYAT; BOLAÑOS SOSA; TUPA; *et al.*, 2021a; 2021b); a recuperação do solo e de elementos por fitorremediação e bioextração (LUO *et al.*, 2017; HOU *et al.*, 2020; CASTELEIN *et al.*, 2021; VIMALA *et al.*, 2021); reciclagem de resíduos de arsênico e de metais pesados como serviço ecossistêmico (KYZAS; MATIS, 2016).

Embora não exaustiva, esta breve lista de aplicações, referenciadas na busca por integração produtiva dos rejeitos de mineração com outras cadeias de suprimento, oferece uma percepção da amplitude e profundidade do debate atual sobre as possibilidades para a utilização de tais insumos. Um exemplo prático, fundamentado em sustentabilidade, é a extração de gás hidrogênio ( $H_2$ ) e ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), a partir da lixiviação de pirita ( $FeS_2$ )<sup>4</sup>. Se abandonados no ambiente, tais rejeitos não passam de passivos ambientais, com grande potencial de destruição da biota e prejuízos para as partes interessadas. Se considerados

---

4 Vide equação 1.

como recursos, o gás é um combustível limpo, cuja queima possui alto potencial de redução de emissões de GEE, ao passo que o ácido é um insumo necessário para a produção de adubos minerais, além de recurso útil para diversos processos tecnológicos, desde a produção de acumuladores até a indústria bélica. A modelagem produtiva integrada considera, de forma sistêmica, a inclusão do que seria visto como rejeito em novos processos produtivos, os quais transcendem tanto a montante, quanto a jusante a planta de mineração (NTLHABANE *et al.*, 2018).

Estudos como os de Luo *et al.* (2017) evidenciam o potencial de recuperação de potássio e alumínio, através de lixiviação por gradiente de rejeitos de alunite. Atualmente, a recuperação de tais recursos, nos poucos casos em que ocorre, é feita por processos hidrometalúrgicos, os quais envolvem altos gastos de energia, devidos à necessidade de elevação de temperatura para acelerar as reações químicas, tratamento que leva à emissão de gases tóxicos. Tais dificuldades têm atrasado a adoção de práticas de reciclagem e recuperação de recursos em resíduos de minas, conduzindo a investigação para técnicas de recuperação de minerais menos agressivas, em termos energéticos, como a bioextração e fitomineração.

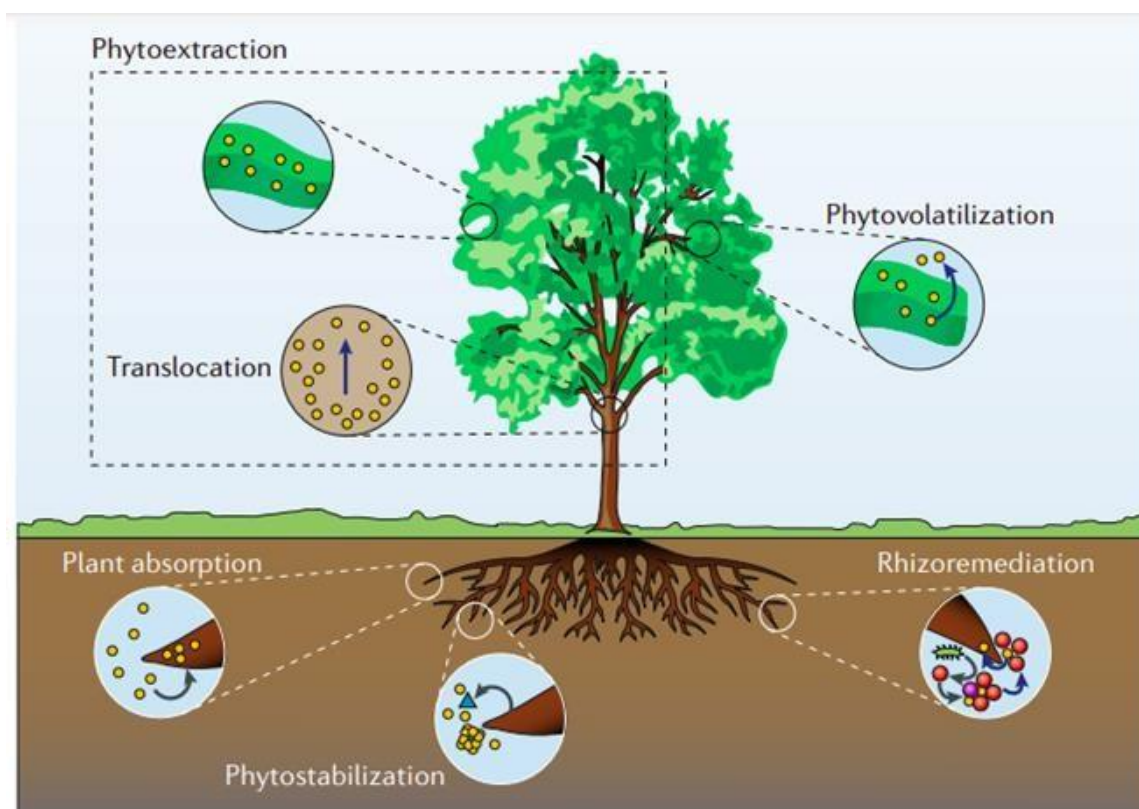
#### **4.4. Bioextração e Fitomineração**

A bioextração envolve um conjunto de métodos que recorrem a organismos vivos, geralmente bactérias, para retirar elementos minerais do solo, da água ou do ar, ao passo que a fitomineração é a aplicação de plantas para alcançar tal resultado. Conforme Gorakhki e Bareither (2017), há basicamente duas formas de cobertura para os resíduos de minas com baixo grau de contaminantes, a cobertura convencional, com camadas de solo de baixa permeabilidade e a cobertura por balanço hídrico, que recorre a um filme de água sobre os rejeitos, o qual permite o equilíbrio entre a entrada de efluentes e a lixiviação de chorume.

São nessas coberturas dos resíduos de minas que a bioextração e a fitomineração possuem maior potencial para recuperação de elementos de

interesse, assim como para redução dos impactos originados a partir da drenagem de efluentes da mineração, da erosão, contaminação e compactação do solo. Nesta perspectiva, Hou *et al.* (2020) propõem técnicas de biorremediação do solo, a fim de mitigar o impacto da contaminação deste por metais pesados, que pode ser abordada a partir de vegetais especializados, ou de ação microbiana, oferecendo alternativas às práticas de mitigação química e física para solos contaminados. Conforme os autores, a toxicidade dos metais pesados no solo está associada à sua biodisponibilidade, derivada da forma química do metal e do tipo de solo, principalmente no que se refere ao seu pH, teores de carbono orgânico disponível, redox, umidade, carbonato e sulfetos. Devido a essa complexidade bioquímica, cada projeto de biorremediação depende de avaliação técnica específica das condições locais, bem como dos micro-organismos e espécies de plantas disponíveis para biorremediação. A Figura 7 ilustra os mecanismos de fitoextração, fitorremediação e fitoestabilização de contaminantes na fisiologia das plantas.

**Figura 7.** Processo de fitorremediação na fisiologia dos vegetais.



Fonte: Hou *et al.* (2020, p. 6).

Como pode ser visualizado no esquema da Figura 7, a fisiologia das plantas detém o potencial de estabilizar contaminantes e absorvê-los por meio de seu sistema radicular. A seiva dos vegetais transloca os elementos para a parte aérea dos organismos, disponibilizando os metais e metaloides em forma de biomassa.

Conforme os autores, a descontaminação do solo por fitoextração se dá, principalmente, através da estabilização dos metais no sistema radicular e da fitovolatização, em decorrência da evapotranspiração das folhas. Usualmente, os metais de interesse são recuperados por meio de incineração da biomassa, cujos gases são sujeitos a processos de filtração e depuração, de forma a reter os metais pesados e metaloides. A biomassa pode ser aproveitada em caldeiras, usinas ou na produção de carvão vegetal, desde que respeitados os cuidados necessários para controle de emissões (POORNIMA; SUGANYA; SEBASTIAN, 2022).

Vimala *et al.* (2021) analisam a utilização de grama vetiver na descontaminação de solos expostos pela exploração mineral a altas cargas de metais pesados. Para a aplicação de tais tecnologias há que considerar-se a dispersão de material particulado no entorno da área degradada, bem como o estado de degradação física do solo, de forma a viabilizar o desenvolvimento inicial das plantas. Aspectos que favorecem a sustentabilidade da fitorremediação são a busca por variedades que favoreçam a reestruturação e estabilidade do solo, por meio de seu sistema radicular, além de minimizarem o transporte dos contaminantes para a parte aérea das plantas, de forma a favorecer o uso econômico das folhas, galhos, frutos e sementes.

As principais vantagens da biorremediação são a redução de custos para recuperação de solos degradados, menor risco de contaminação para os trabalhadores envolvidos, redução da pegada ambiental e aumento do ciclo de vida dos metais, metaloides e demais subprodutos de mineração, quando esta é comparada com outras técnicas de mitigação (HOU *et al.*, 2020).

A biorremediação microbiana é um conjunto de técnicas que aproveita a capacidade dos micro-organismos de sobreviverem e se reproduzirem em ambientes contaminados, mesmo em severas condições de estresse. Há uma



quantidade significativa de organismos reconhecidos na literatura pela capacidade de estabilizar metais pesados em formas químicas passíveis de tratamento industrial. As abordagens revisadas por Hou *et al.* (2020) são de dois tipos, a atenuação natural monitorada e a biorremediação microbiana projetada.

A utilização de glicolipídios (biossurfactantes microbianos) para lixiviação de materiais secundários de baixo teor, por exemplo, é uma técnica reconhecida e utilizada em escala industrial para a melhoria dos resultados em hidrometalurgia, principalmente no tratamento de cobre e zinco em lodos metalúrgicos e escórias de mineração, que convencionalmente seriam tratados com flotação, ataques ácidos, básicos e solventes fósseis onerosos e perigosos para o meio ambiente (CASTELEIN *et al.*, 2021).

Não obstante, as associações de micro-organismos com metais pesados são de natureza bioquímica altamente complexa, mas podem ser reduzidas às seguintes etapas: complexação; redução acoplada à absorção; microprecipitação; troca de íons; e absorção física. Neste processo, as bactérias acumulam metais nos espaços intracelulares, permitindo a extração por lixiviação de formas estáveis dos elementos químicos de interesse. Em ensaios de laboratórios com solos contaminados por diversos metais pesados, inoculados com bactérias especializadas, foram observadas lixiviações dos contaminantes da ordem de 74% para cobalto; 69% para cobre e manganês; e 68% para níquel, geralmente em forma de sulfetos estáveis (HOU *et al.*, 2020, p. 10).

Estes níveis de resultados, que possuem similaridade com o potencial de descontaminação de efluentes de mineração, oferecem um vislumbre das soluções ainda a desenvolver para a mitigação de impactos ambientais na mineração, bem como para a recuperação de minerais de interesse socioambiental, a partir do tratamento biológico de rejeitos de minas, com ampliação do ciclo de vida das minas e incremento da sustentabilidade no setor extrativista.

#### **4.5. Recuperação de terras Raras e outros Minerais**

Recentemente puderam ser observadas mudanças na governança da

indústria de mineração, as quais apontam para maior responsabilidade e transparência nos setores mais progressistas. Não obstante, o consumidor final, por enquanto, não tem conhecimento, ou domínio, sobre a origem do que está comprando, de modo que dificilmente a concorrência predatória, exercida por produtores que exploram regiões pouco reguladas, pode ser vencida através das forças de mercado. Esse fato exige o desenvolvimento e aplicação de padrões globais de governança na gestão mineral, os quais demandam, principalmente, verificabilidade e transparência em mineração, de forma a difundir as melhores práticas e tecnologias extrativistas.

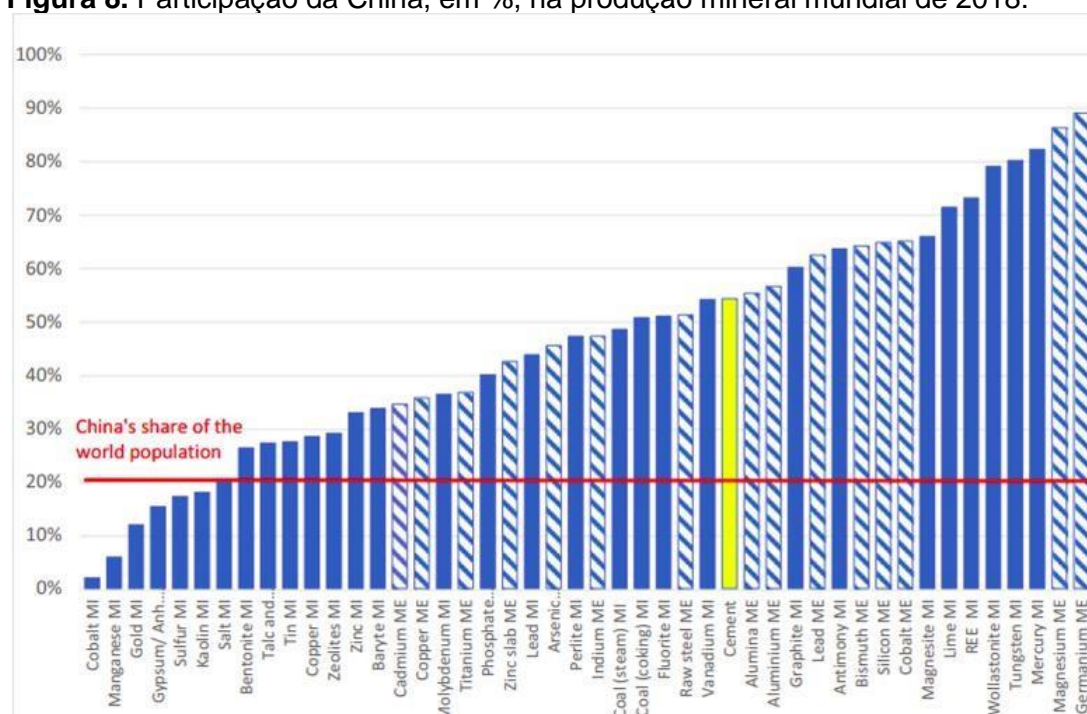
Conforme Christmann (2021), atualmente apenas a exploração em áreas internacionais é uniformemente regulamentada, a partir da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar. A exploração de recursos continentais, entretanto, está sujeita à política, legislação e fiscalização nacionais, que podem variar muito, permitindo a formação de cartéis e monopólios, como no caso da China, que detém aproximadamente 80% da produção mundial de tungstênio, mercúrio, magnésio, germânio e mais de 70% das terras raras (*Rare Earth Elements* - REE), monopolizando o acesso a recursos essenciais para o avanço tecnológico.

Os chamados elementos de terras raras (REE) são compostos por um grupo de 17 substâncias: ítrio, escândio e quinze lantanídeos. Estes minerais são importantes para indústria de tecnologia devido à característica peculiar de exibir raios atômicos decrescentes com o aumento dos números atômicos, peculiaridade conhecida como contração dos lantanídeos. Desafortunadamente, tal característica é tão importante para a produção de tecnologia eletrônica, de acumuladores e produtos militares, quanto a raridade de depósitos viáveis na crosta terrestre, cuja abundância é estimada entre 169 e 220 ppm, superior à de vários minerais industriais, como estanho e tungstênio. O túlio, por exemplo, o mais escasso dos elementos de terras raras (~0,5 ppm), é 200 vezes mais abundante do que a platina. Não obstante, a raridade dos elementos de terras raras se dá pelo fato de que, geralmente, eles não se encontram em jazidas economicamente viáveis, embora muitos dos elementos que compõem esse grupo mineral podem ser encontrados nos rejeitos de mineração, viabilizando a

reciclagem dos resíduos de lavra (MORAN-PALACIOS *et al.*, 2019; DUSHYANTHA *et al.*, 2020).

Dados de 2019 indicam que a China limitava a exportação de terras raras a 39.800 toneladas, menos de 10% do seu potencial. Esta estratégia leva muitas empresas de tecnologia a se instalarem no país, a fim de garantir fornecimento constante destes recursos minerais. A Figura 8 evidencia a concentração de disponibilidade de elementos terras raras e de outros minerais pela China em 2018, em relação à produção mundial (CHRISTMANN, 2021, p. 192).

**Figura 8.** Participação da China, em %, na produção mineral mundial de 2018.



Fonte: Christmann (2021, p. 192).

Como pode ser observado na Figura 8, há uma grande concentração da produção de terras raras e outros elementos indispensáveis para a indústria de alta tecnologia, como mercúrio e tungstênio, em um único país, fato que limita o desenvolvimento industrial de seus concorrentes. Ainda que países como a Rússia e a Austrália venham aumentando sua participação no mercado de REEs, segundo Moran-Palacios *et al.* (2019), esta concentração de mercado torna os resíduos de minas um conjunto de recursos promissores para o futuro, uma vez que neles se encontram depósitos alternativos de terras raras, as quais se tornam cada dia mais atraentes do ponto de vista econômico.

Dushyantha *et al.* (2020) consideram que, embora se faça necessário o desenvolvimento de técnicas economicamente viáveis para a exploração e reciclagem de rejeitos de mineração, essa é uma forma sustentável de reduzir a concentração de insumos de alta tecnologia e favorecer o alcance dos objetivos para o desenvolvimento sustentável das Nações Unidas. Um dos efeitos estratégicos da difusão dos elementos de terras raras é que eles são fundamentais para a produção de tecnologias verdes, como painéis de energia solar e acumuladores, de forma que a transição para a economia verde depende diretamente da disponibilidade de tais insumos em escala global.

Conforme os autores, a demanda por elementos de terras raras sofreu uma explosão a partir da invenção de televisores coloridos, ampliando o consumo da ordem de 1.000 toneladas por ano na década de 1950, para 125 mil ton. na atualidade. Em princípio, as maneiras de garantir a sustentabilidade do mercado de REE partem da redução no uso de tais elementos em produtos descartáveis, tendendo para o reuso, com ampliação do ciclo de vida, e posterior reciclagem dos equipamentos que utilizam tais tecnologias.

Alternativamente, uma abordagem que permite ampliar a disponibilidade dos REEs é a extração como subprodutos de mineração, processo que ainda está em desenvolvimento e encontra grandes desafios tecnológicos e de viabilidade financeira. Não obstante, com a tendência crescente de escassez dos elementos de terras raras tanto a reciclagem, quanto os processos de mineração de rejeitos tendem a se tornarem vantajosos economicamente, consolidando este como um nicho importante para a expansão e sustentabilidade da indústria de mineração.

Sobre tal aspecto, Moran-Palacios *et al.* (2019) defendem que os rejeitos de minério de ferro são especialmente adequados para a recuperação de REEs, uma vez que as lagoas de decantação dos rejeitos de ferro passam por processos de concentração e deposição de minérios que facilitam a obtenção dos REEs. Os estudos espectroscópicos realizados pelos autores evidenciam que os depósitos de rejeitos da lavra de ferro apresentam altas concentrações dos elementos de terras raras de maior densidade, evidenciando um grande potencial econômico, ainda inexplorado por alguns dos grandes produtores de ferro, como o Brasil.

#### 4.6. Uso e reciclagem das águas de mineração

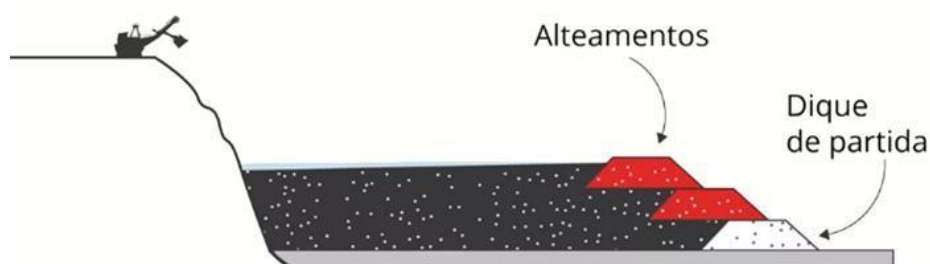
Além dos mencionados riscos e impactos sociais, econômicos e geopolíticos da mineração, destaca-se o uso recorrente de barragens para deposição de rejeitos de minas nas imediações das plantas de extração. São consideradas como grandes barragens aquelas com mais de 15 metros de altura, ou com potencial para conter mais de 3 milhões de metros cúbicos em seu reservatório. O principal uso para as mesmas é estocar água, embora também possam servir para outros destinos, tais como a retenção de chorume e rejeitos de mineração (KINNUNEN *et al.*, 2021; COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2022).

Os acidentes com barragens de mineração estão entre os maiores desastres ambientais já vivenciados no Brasil. Mello; Sandroni e Guidicini (2021, p. 69) relatam 166 barragens acidentadas no Brasil desde 1912, sendo o desastre de Brumadinho, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, o que envolveu o maior número de fatalidades (270 vítimas) e de impactos ambientais, sociais e econômicos negativos, os quais obrigaram a Agência Nacional de Mineração (ANM) a proibir a técnica de construção que utiliza alteamento a montante (quando a barragem é elevada no sentido contrário ao fluxo de água). A decisão levou à paralisação de obras, além de desativação e descomissionamento de barragens existentes com esse formato. A Figura 9 ilustra o método de alteamento a montante, amplamente utilizado em barragens de mineração.

**Figura 9.** Alteamento a montante.

##### **Montante**

Cresce por meio de degraus feitos com o próprio rejeito sobre o dique inicial. **É o método mais barato.**



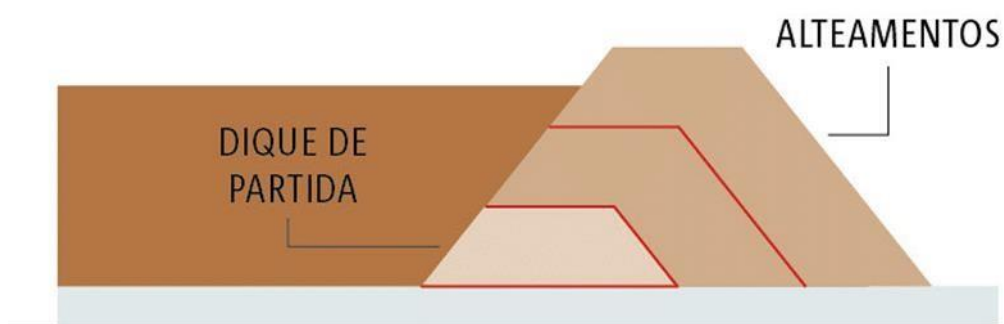
Fonte: Kael Gestão Comercial (2022).

No ano seguinte ao desastre de Brumadinho foi sancionada a Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), alterou a Política Nacional de Recursos Hídricos, bem como o Código de Mineração, além de dar outras providências para regulamentar o uso de barragens no Brasil. Conforme a nova legislação, foram estabelecidas responsabilidades sobre a fiscalização das estruturas; a obrigatoriedade de participação das comunidades afetadas no planejamento e operação das mesmas; proibição do alteamento a montante; exigência da institucionalização de guias de boas práticas como política para o setor; ampliação das sanções e multas aplicáveis para valores próximos a um bilhão de reais, destinadas aos operadores de barragens de rejeitos em desconformidade, dentre outras providências de ordem política, normativa e fiscalizatória (MELLO; SANDRONI; GUIDICINI, 2021, p. 158).

A nova PNSB é um marco importante no Brasil para a qualificação da atividade de mineração sob novos padrões de governança corporativa, uma vez que instrumentaliza o Estado, no que tange à fiscalização, e obriga as organizações a assumirem novos patamares de compromisso ambiental e de responsabilidade social, dentre os quais se destaca a necessidade de desenvolvimento e aplicação de técnicas alternativas para a disposição de rejeitos e para o controle da drenagem ácida, visto que o alteamento de barragens na mineração tem como principais motivações mitigar estes dois tipos de impactos negativos da atividade.

Como a nova legislação brasileira não coíbe o alteamento a jusante (a elevação da barragem por reforço no sentido do fluxo de água), então é provável que muitas das barragens em utilização sejam reformadas para serem adequadas e esta técnica de construção (Figura 10), de modo que o setor de mineração brasileiro tende a conviver ainda por muito tempo com a disposição de rejeitos em barragens e com todo o risco que isto implica.

**Figura 10.** Alçamento a jusante.



Fonte: Neo Ipsun - Soluções em Engenharia (2020).

A despeito da complacência da sociedade brasileira para com os impactos negativos da mineração, outras formas de regulação colocam o setor em alerta, como a fiscalização de entidades internacionais, tais como o órgão regulador do mercado de capitais dos Estados Unidos da América (EUA), que está processando a organização responsável pelo desastre de Brumadinho, acusando a empresa de enganar os governos locais, a sociedade como um todo e os investidores, ao atestar a segurança das barragens acidentadas por meio de certificação fraudulenta desde 2016. A empresa, que nega a responsabilidade, teria levantado mais de 1 bilhão de dólares na bolsa de valores dos EUA por meio de informações enganosas quanto aos padrões de governança adotados pela corporação, espalhando desta forma os prejuízos da irresponsabilidade social e ambiental para toda a economia daquele país. O caso é agravado pela recorrência deste tipo de acidente, visto que já havia sido devidamente documentado em 2015, na cidade de Mariana (ANGELO, 2022). Embora a empresa defendesse publicamente altos níveis de segurança em suas operações, era conhecido internamente o elenco das barragens com probabilidade de ruptura acima dos níveis aceitáveis, conforme exposto na Figura 11:

**Figura 11.** Probabilidade de rompimento de barragens e danos reconhecidos.

	Estrutura	Probabilidade	Consequência - Com Alerta	Modo de falha
1	Capitão do Mato	1E-02	R\$ 6.157.587.531,00	Galgamento
2	Taquaras	1E-03	R\$ 1.073.381.902,00	Instabilização
3	B	1E-03	R\$ 6.186.703.672,00	Galgamento
4	IV-A	5E-04	R\$ 4.252.491.238,00	Galgamento
5	Forquilha II	4E-04	R\$ 17.003.012.700,00	Liquefação
6	Laranjeiras	3E-04	R\$ 25.538.241.393,00	Erosão Interna
7	Menezes II	3E-04	R\$ 4.263.438.800,00	Erosão Interna
8	I	2E-04	R\$ 6.500.769.418,00	Erosão Interna
9	Forquilha I	2E-04	R\$ 17.003.012.700,00	Liquefação
10	Forquilha III	2E-04	R\$ 8.382.487.911,00	Liquefação

**PROBABILIDADE ACIMA DO LIMITE DE ACEITAÇÃO**



Fonte: Angelo (2022).

O documento (Figura 11), que expõe a análise de riscos de rompimento das barragens críticas sob responsabilidade da empresa, foi divulgado pelo Ministério Público de Minas Gerais em 21 de janeiro de 2020 e teria sido confeccionado pela mineradora seis meses antes do acidente. Na análise de riscos, a barragem de Brumadinho foi indicada pelo algarismo romano “I”, ela ocupa a oitava posição entre as maiores probabilidades de rompimento. A causa prevista para a tragédia seria “erosão interna” e o custo do acidente foi subestimado em 6,5 bilhões de reais (DURÃO, 2020; ANGELO, 2022).

Além das incalculáveis perdas humanas, os rompimentos de barragem deixam um rastro de destruição social e biológica, alterando de forma permanente os biotas, tanto aquáticos, quanto terrestres. A forma considerada adequada, do ponto de vista administrativo, para evitar tais impactos indesejados é o investimento sustentado na transição para melhores níveis de governança socioambientais, o que torna este o fator determinante para o desenvolvimento e adoção de boas práticas na mineração (HUNT *et al.*, 2014; LANGEFELD; BINDER, 2017; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018; DONG *et al.*, 2019; ALMEIDA *et al.*, 2021a; CHRISTMANN, 2021; HEFNI *et al.*, 2021).



#### 4.6.1. Mineração e Pegada Hídrica

Aproximadamente 4 bilhões de pessoas sofrem atualmente algum tipo de restrição ao uso da água e 1,7 bilhão vivem em regiões onde as águas subterrâneas estão sendo superexploradas. Este tipo de pressão antrópica demanda metodologias para quantificar e reduzir a pegada hídrica de regiões, produtos e processos. Dentre os principais desafios associados à pegada hídrica da mineração, destacam-se a gestão do balanço hídrico, a reabilitação local, as rupturas de barragem e a manutenção da qualidade da água. A concepção de pegada hídrica pretende revelar a demanda global dos recursos hídricos por atividades antrópicas, combinando a teoria da água virtualmente disponível e o método da pegada ecológica. A pegada hídrica pode ser definida como a quantidade de água necessária para uma determinada população produzir, ou consumir, determinados bens e serviços (NORTHEY *et al.*, 2016; DONG *et al.*, 2019).

Além da questão hídrica, vários reagentes utilizados na mineração detêm alto potencial de poluição do ar, tais como o alto consumo de combustíveis fósseis, que libera CO<sub>2</sub> e óxido de nitrogênio, bem como a liberação de SO<sub>2</sub> na neutralização de cianeto e a considerável emissão de partículas de poeira fugitiva, oriunda da utilização de maquinaria pesada e atividades de detonação. Entretanto, a principal questão ambiental do setor de mineração é a degradação da qualidade da água, uma vez que a sedimentação de rejeitos e a erosão do solo podem matar a vida aquática e inutilizar grandes porções de água para o consumo humano (ASIF; CHEN, 2016; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017).

Tradicionalmente, o foco do controle hídrico estava na medição de volumes de consumo de água. Métodos atuais, entretanto, colocam maior ênfase na relação entre consumo de água e seu potencial de impacto nos usuários finais e nos ecossistemas. Um passo significativo para consolidar tal visão foi o desenvolvimento da norma ISO 14046 para pegada hídrica, que alinha a disponibilidade de água com a avaliação do ciclo de vida de produtos e processos (FIGUEIREDO *et al.*, 2021).

Os métodos tradicionais de medição de consumo de água não são adaptados para abranger o impacto ambiental absoluto, associado a qualquer

instalação de processamento industrial, ou extrativista. Em vez disto, tais métodos foram concebidos para evidenciar o potencial relativo de impacto entre o consumo e as cadeias de abastecimento (FIGUEIREDO *et al.*, 2021). Não obstante, os resultados obtidos a partir de tais métodos de cálculo para a pegada hídrica, ou avaliação do ciclo de vida dos produtos, podem não ser necessariamente representativos do que está acontecendo no ambiente, particularmente quando envolvem a incerteza inerente, relacionada com os procedimentos de cálculo de impacto hídrico, combinada com as limitações atuais, relativas à disponibilidade de dados sobre o uso da água, derivados de métodos antiquados, orientados para a relação entre consumo e disponibilidade local. Por isto, recomenda-se a associação entre várias estratégias de proteção da água para a preservação dos recursos hídricos em todas as fases do ciclo de vida de uma mina, bem como para a indexação do consumo desse valioso recurso (NORTHEY *et al.*, 2016; DONG *et al.*, 2019; FIGUEIREDO *et al.*, 2021; KINNUNEN *et al.*, 2021).

Para reduzir o consumo de água doce no processamento de minerais, em geral, as águas residuais livres de sólidos são recicladas para as operações, ao passo que os sólidos são descartados em forma de rejeitos. Desta forma, os resíduos sólidos se acumulam ao longo da vida da mina, e seu gerenciamento apresenta muitos desafios em termos de armazenamento, estabilidade e segurança, os quais podem ser vencidos através da manutenção de altos níveis de governança socioambiental na planta de mineração (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; HEFNI *et al.*, 2021).

Observa-se, atualmente, um avanço no senso de responsabilidade e na conscientização social, em relação ao uso de recursos naturais. Tal estado de coisas leva à mineração problemas que não podem ser resolvidos apenas por meio de tecnologia, mas que dependem de estratégias exigentes, em termos de financiamento, de políticas públicas e estratégias organizacionais que considerem o aumento na quantidade de rejeito e a progressiva redução na produtividade das minas, bem como o impacto desses fatores na pegada hídrica do setor (LANGEFELD; BINDER, 2017; AZNAR-SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

Uma das principais dificuldades da mineração, em relação ao consumo de

água, é a lixiviação de águas ácidas, também conhecida como drenagem ácida, ou seja, a formação de chorume decorrente da oxidação de metais e do alto teor de sulfato presente em parte significativa dos rejeitos de minas, principalmente na extração de ouro e de carvão mineral. Conforme Kefeni, Msagati e Mamba (2017), uma vez iniciada a drenagem ácida em uma planta de mineração, sua reversão é muito onerosa. Além disto, são produzidos severos impactos negativos no solo, água e comunidades aquáticas.

A natureza corrosiva da drenagem ácida leva à dissolução de rochas e à consequente solubilização de metais com potencial tóxico para o ambiente, os quais se encontravam inertes antes da mineração. Cada jazida possui características físico-químicas específicas, que oferecem maior, ou menor potencial de acidificação da água, chegando a níveis críticos, como na mina de Murliden (Suécia), na qual o pH da drenagem alcançou 2,3, com altos teores de Zinco ( $\sim 460 \text{ mg L}^{-1}$ ) e Ferro ( $\sim 400 \text{ mg L}^{-1}$ ), cuja deposição no ambiente pode aniquilar o biota aquático da região (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017).

Uma das formas mais eficazes de prevenir a drenagem ácida é evitar o contato de minerais de sulfeto com o ar, água e bactérias. Ainda que dispendiosa, esta técnica é muito mais econômica do que o tratamento dos dejetos lixiviados, o qual envolve o sequestro dos contaminantes por meio de reações químicas, ou processos biológicos de difícil controle e aquisição onerosa. Quando o processo de lixiviação envolve a retenção dos rejeitos em grandes barragens, então a gestão de riscos se torna mais complexa, envolvendo o potencial de destruição ambiental e social em larga escala. Apesar disto, essa é uma técnica amplamente utilizada como forma de reduzir a difusão de oxigênio nos rejeitos de minas. Uma alternativa às barragens para evitar a drenagem ácida é o aterro de minas, entendido como forma de reutilização dos rejeitos, os quais são agregados por meio de mistura com cimento, ou com outros ligantes, a fim de estabilizar quimicamente os minerais de sulfeto, reduzindo o potencial de lixiviação e prevenindo a drenagem ácida (GORAKHKI; BAREITHER, 2017; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017; DONG *et al.*, 2019).

Para os autores revisados, a prevenção da drenagem ácida se tornou um pré-requisito para a implantação de atividades extrativistas minerais, além do que,

quando a mesma está instalada, faz-se mister a reversão imediata dos danos, buscando reduzir o acúmulo de elementos tóxicos no ambiente, mitigar os impactos ambientais negativos e internalizar os custos decorrentes dos mesmos. Esta perspectiva fomenta a implantação de um novo paradigma de reabilitação ambiental para o setor, focado na redução, reuso e reciclagem das águas, de maneira a viabilizar a sustentabilidade deste recurso a longo prazo.

Tal abordagem se consolida pela constatação de que em circunstâncias ambientais tais como as relatadas na mina de Murliden, assim como nas tragédias de Mariana, Brumadinho e similares, a reversão dos impactos negativos da mineração é economicamente inviável, de modo que apenas a boa gestão, ou seja, a manutenção de altos níveis de governança socioambiental nas plantas de extração, desde a fase de projetos, detém o potencial de prevenir danos e manter a atividade de forma aceitável para a comunidade e para os investidores.

De forma geral, pode-se concluir, no que diz respeito ao uso da água pelas atividades de mineração, que a restrição atual e crescente ao uso da água apresenta desafios dentre os quais se destacam a gestão do balanço hídrico; a reabilitação local; as rupturas de barragem; a manutenção da qualidade da água por meio da prevenção e mitigação de drenagem ácida. As abordagens revisadas convergem para considerações acerca da conservação do Ciclo de vida por meio da associação entre várias estratégias de governança ambiental. No capítulo seguinte são discutidos possíveis indicadores para orientar o avanço de práticas sustentáveis na mineração, discutidos a partir dos principais impactos negativos anteriormente apresentados.

## **5. ESCOLHA DOS ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO**

A fim de avaliar e comparar o potencial de sustentabilidade na indústria de mineração foram analisados alguns dos possíveis fatores quantitativos e qualitativos que possam servir à comparação entre práticas sustentáveis, principalmente no que se refere à redução de rejeitos na extração mineral. Os resultados da pesquisa permitiram destacar quatro categorias de indicadores, a partir de tipificação fitossociológica, ou seja, da análise de impactos negativos na biota e na comunidade com as quais a planta de mineração compartilha o mesmo bioma. Além desse, também foram selecionados indicadores físicos, químicos e microbiológicos do solo em áreas de mineração.

A terceira categoria de indicadores, abordada adiante, é focada na avaliação relativa de recuperação de áreas degradadas e a quarta categoria se refere a critérios de governança corporativa na mineração. O critério principal de escolha e classificação dos indicadores foi o nível de criticidade, em relação à sustentabilidade na mineração.

### **5.1. Indicadores de Desenvolvimento em Mineração**

O desenvolvimento e conservação das comunidades e da biota em uma região estão diretamente ligados à abundância, ou escassez de recursos naturais, principalmente água, solo e ar. Estes fatores foram escolhidos por se mostrarem indispensáveis, ou seja, críticos para o suporte da vida, tanto vegetal quanto humana. Conforme pode ser observado na Figura 4, que trata do processo de contaminação do solo agrícola por atividades antrópicas (HOU *et al.*, 2020, p. 4), a qualidade do ar pode ser medida indiretamente pelos indicadores de qualidade da água e do solo, uma vez que as partículas em suspensão são transportadas pelas intempéries, atingindo grandes áreas. Além disso, contaminantes voláteis, como o mercúrio, são de difícil detecção no ar, passados algumas horas da evaporação, visto que são transportados pelo vento. Devido a tais características, limitamos aqui a escolha dos indicadores fitossociais àqueles associados à qualidade da água e do solo, entendendo que estes, indiretamente e em conjunto, também evidenciam a qualidade do ar.

Na ordem de criticidade, conforme a literatura consultada, o principal impacto fitossocial negativo da mineração se dá sobre o recurso água, especificamente peladrenagem ácida, que inviabiliza a vida no meio aquático e reduz a potabilidade dosrecursos hídricos, colocando em competição pela sobrevivência as comunidades locais e inviabilizando outras atividades econômicas, tais como agricultura e indústria,grandes consumidores de água. Além da drenagem ácida, são fatores críticos para a sustentabilidade na mineração a deposição de arsênico nos efluentes, de metais pesados, óleos, graxas e combustíveis oriundos da maquinaria de mineração. Paramensuração dos impactos fitossociais há que se considerar tanto a qualidade das águas superficiais, quanto subterrâneas (KYZAS; MATIS, 2016; NWAILA *et al.*, 2021).

Além da água, o meio solo é essencial para o desenvolvimento da vida vegetal, conseqüentemente, das sociedades humanas e da biota local. Por isto, fatores como a contaminação por metais pesados, acidez, erosão, compactação, carbono orgânico disponível, disponibilidade de macro e micronutrientes servem como indicadores do impacto fitossocial da mineração nas regiões adjacentes às plantas de mineração.

### **5.1.1 Indicadores de Qualidade do Solo**

Os indicadores da qualidade do solo podem ser reduzidos a três categorias, a saber: físicos; químicos e microbiológicos. Dentre os indicadores físicos se destacama densidade e porosidade, que caracterizam o nível de compactação da área analisada. Os indicadores químicos mais utilizados em avaliações de qualidade do solo são o pH; carbono orgânico disponível; bases trocáveis (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>); teor de fósforo; acidez potencial (H + Al); a soma de bases; a capacidade de troca decátions; e a saturação por bases. Os pesquisadores geralmente utilizam como indicadores microbiológicos da qualidade do solo o teor de material orgânico particulado leve e as taxas de respiração edáfica, considerados como quocientes metabólicos da microfauna existente no solo (SILVA *et al.*, 2015; PAIVA *et al.*, 2022).

### 5.1.2 Indicadores Relativos de Recuperação de Áreas Degradadas

A degradação de áreas adjacentes às plantas de mineração é inevitável, haja vista a necessidade de trânsito, transporte e deposição de grandes quantidades de materiais, máquinas e trabalhadores por longos períodos de tempo. Não obstante, o esforço em mitigar tais impactos, por meio de atividades de remediação e conservação das áreas sob influência das jazidas, é mensurável e consiste em relevante serviço ambiental. Nesta perspectiva, nem sempre o empenho em mitigação pode ser comparado em termos quantitativos, uma vez que depende de arranjos locais, características ambientais, normas, sazonalidade e potencial econômico das atividades exercidas pela mineração em cada situação de lavra.

Uma indexação genérica, que permite avaliar a sustentabilidade das atividades de mineração é a análise comparativa dos indicadores socioambientais, do tipo a montante/a jusante, para efluentes, ou antes/depois para indicadores socioeconômicos e ecológicos. No tratamento de rejeitos, por exemplo, um indicador relativo que pode dizer muito sobre o comprometimento da organização com a sustentabilidade é a taxa de recuperação de elementos de interesse comercial em rejeitos de mineração. Trata-se de um índice de rendimento relativo da atividade, que pode ser comparado entre diversas plantas, em locais e condições díspares. Neste caso, por exemplo, comparando-se duas minas de alumínio, aquela que possuir a maior taxa de aproveitamento de rejeitos terá o melhor indicador relativo de sustentabilidade. Naturalmente, fatores absolutos, tais como qualidade da água a jusante e do solo nas imediações da planta são requisitos prévios para tais comparações.

Outra vantagem da utilização de indicadores relativos é a possibilidade de comparar os serviços ambientais e sociais prestados *in loco* pela planta de mineração. É possível, nesta abordagem, estimar o nível de atividade econômica, ou de desenvolvimento humano antes e depois da instalação de duas plantas de mineração, indicando aquela que prestou os melhores serviços à sociedade local, ou seja, a que possui maior comprometimento com a responsabilidade social. Da mesma forma, o registro da biodiversidade em uma região, anterior à abertura de

uma jazida, permite aos administradores e à comunidade local monitorar o impacto ecológico do empreendimento, bem como estabelecer metas de conservação, baseadas na estimativa demográfica da flora e da fauna local.

Torres *et al.* (2017), dedicados ao cálculo do sequestro de carbono em florestas, propõem como parâmetros de avaliação fitossociológica as seguintes funções demográficas e fitodistributivas: densidade; frequência; dominância; e valor de importância das espécies locais. Para os autores, os níveis de degradação estão inversamente correlacionados com a diversidade biológica, quando comparada com áreas preservadas. A ocorrência de espécies raras, ou relevantes para a dispersão de sementes, por seu turno, é um indicador qualitativo de preservação ecológica.

## **5.2. Índices aplicáveis à Governança em Mineração**

A busca por indicadores de governança corporativa, aplicáveis à gestão de rejeitos minerais, visa contribuir para a sustentabilidade do setor, pautando-se nos seguintes requisitos: inovação e eficiência; reuso e reciclagem; combate à obsolescência; ecologia industrial, ou produção integrada; e transparência (ALMEIDA *et al.*, 2021a; HEFNI *et al.*, 2021).

De forma genérica, a maneira mais simples de comparar os indicadores de governança de uma organização se dá por meio da proporção de recursos utilizadas em uma função administrativa. Por exemplo, pode-se comparar o potencial inovador de um processo, ou produto, a partir da fatia do orçamento da organização destinada à pesquisa e desenvolvimento. De forma similar, taxas de investimento em renovação de maquinário são indicadores de reuso e combate à obsolescência.

Não obstante, um dos assuntos com maior recorrência na literatura consultada, no que tange à governança em mineração, é a ecologia industrial, ou produção integrada, considerada principalmente a partir da reciclagem de rejeitos, evidenciando que esta é uma prática de gestão eminentemente sustentável, tanto do ponto de vista ambiental, quanto social e econômico.

A integração privilegiada pela maioria dos autores é orientada para a



construção civil, de forma que um índice relevante para a comparação entre níveis de governança corporativa na mineração seria aquele capaz de evidenciar o quanto dos rejeitos de uma jazida são destinados à integração com a construção civil (NTLHABANE *et al.*, 2018). Isto se deve ao alto potencial deste tipo de conexão para ampliar o ciclo de vida dos produtos, bem como aos impactos sociais e econômicos positivos dos subprodutos da mineração incluídos em tal cadeia produtiva, que detém alto potencial de geração de emprego e renda, além de fornecer produtos de baixa obsolescência.

Outros benefícios da integração produtiva para a governança são a melhoria do faturamento pela redução de custos e diversificação de produtos. Além disto, a produção integrada exige eficiência administrativa, investimentos em inovação e transparência para facilitar o engajamento de outros atores na assimilação industrial e social dos subprodutos de mineração (NTLHABANE *et al.*, 2018). Ou seja, a integração das plantas de mineração com a construção civil corrobora para os principais fatores de governança a serem comparados na avaliação de sustentabilidade de um empreendimento no setor de mineração.

### **5.3. Comparação entre as Práticas Sustentáveis na Mineração**

Para elaborar uma análise comparativa das práticas sustentáveis destacadas na literatura revisada, foram utilizados como critérios de avaliação os quatro marcadores apontados por Aznar-Sánchez *et al.* (2018) e Christmann (2021), os quais representam alto poder de impacto na sustentabilidade social, ambiental e de governança institucional, a saber: demografia; renda; urbanização; e pegada de carbono. A partir destes marcadores, foram avaliados o maior, ou menor potencial de contribuição de cada prática, em relação à melhoria na sustentabilidade do setor de mineração. Os resultados da análise seguem resumido no Quadro 4.

**Quadro 4.** Comparação entre práticas sustentáveis na mineração.

Prática sustentável	Marcador de sustentabilidade			
	Demog.	Renda	Urb.	GEE
Emprego de rejeitos na construção civil	+	+		+
Modelagem produtiva integrada	+	+	+	+
Bioextração e fitominação	+			+
Recuperação de terras raras e outros minerais		+		
Uso e reciclagem das águas de mineração	+		+	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para qualificar os marcadores de sustentabilidade, em cada prática sustentável, foi considerado o potencial de melhoria na pegada ambiental da atividade de mineração, quando aumentado o investimento em cada prática sustentável. Para o emprego de rejeitos na construção civil, considera-se que os impactos demográficos desta prática são relevantes e positivos em relação ao biota, visto que com o uso dos rejeitos há menor necessidade de extração de recursos minerais, como pedra, areia e cimento de outras regiões, fato que impacta positivamente também a geração de GEE. Além disto, a extração de insumos para a construção civil potencializa um ramo de atividade que é altamente exigente em mão-de-obra, favorecendo a geração de emprego e renda. Quanto ao marcador relativo à urbanização, considera-se que esta prática seja neutra, ou negativa em termos de sustentabilidade, uma vez que pode favorecer a concentração de pessoas e o aumento populacional nas imediações das jazidas pela redução no custo de insumos de construção.

Acerca da modelagem produtiva integrada, ou seja da inserção dos processos produtivos de mineração em outras cadeias de suprimentos com vistas à eliminação de desperdícios, considera-se que é uma prática de governança eficaz para as quatro dimensões consideradas, uma vez que reduz a necessidade de exploração de recursos em outras fontes; detém potencial considerável de geração de riquezas; favorece a melhor distribuição das populações humanas, reduzindo o impacto da urbanização; e otimiza o uso de energia com transporte e produção, minimizando a deposição de GEE.

Em relação à bioextração e fitominação são considerados pontos negativos, em relação à sustentabilidade na mineração, o seu potencial de aumentar os custos de produção e o aumento de demanda continuada de trabalhadores com baixa exigência de qualificação nos entornos das jazidas, gerando impactos potencialmente negativos na renda da atividade e na urbanização da região. São aspectos positivos desta prática sustentável o seu potencial de aumento da biodiversidade local, considerado como impacto demográfico positivo, assim como um grande potencial de sequestro de carbono.

Quanto à recuperação de terras raras e de outros minerais, por tratar-se de tecnologia ainda em germe, não é seguro precipitar conclusões. Por isto, cada caso deve ser avaliado especificamente. Não obstante, é possível prever que tanto os impactos em urbanização, quanto na emissão de GEE tanto podem ser positivos, quanto negativos, uma vez que a extração de REE pode exigir, assim com a fitominação, um acréscimo de trabalhadores com baixa qualificação e aumento na demanda energética das minas, ampliando a pegada ambiental e prejudicando a urbanização de áreas no entorno das minas que, de outra forma, permaneceriam isoladas. O aspecto que detém o melhor potencial de se tornar sustentável na extração de REE é a geração de renda, caso haja tecnologia para viabilizar a prática.

De forma similar, a reciclagem de águas de mineração detém o potencial negativo de reduzir a renda das minas, encarecendo os produtos, além de exigir mais energia e aumentar as emissões de GEE. Não obstante, em muitas localidades o recurso água é muito superior, em termos de necessidade e importância para o desenvolvimento social e para a manutenção da biota. Por isto, a despeito de outros impactos, a recuperação de águas de minas é essencial para a sustentabilidade da mineração em escala sistêmica e, especificamente, no que tange aos marcadores demográficos da biota; da comunidade e também para a solução de problemas urbanísticos.

#### **5.4. Análise de Viabilidade Ambiental, Social e Econômica**

A partir do conjunto de contextos, fatores, indicadores e condicionantes

anteriormente abordados, considera-se que a viabilidade ambiental das atividades de mineração estão, na atualidade, condicionadas à adoção sistemática de boas práticas de produção, voltadas principalmente para a integração dos processos produtivos com outras indústrias e cadeias de suprimentos, dentre as quais se destaca a construção civil. Este tipo de atitude gerencial permite a adoção de novos e melhores patamares de governança organizacional, conduzindo à implantação de projetos sustentáveis de diversas naturezas, com impactos potencialmente positivos na pegada hídrica, de GEE, nos indicadores demográficos da biota local e urbanísticos das regiões influenciadas pela planta de mineração.

A viabilidade social da mineração, por seu turno, está diretamente associada ao tratamento e reutilização das águas de minas, que se evidencia como um conjunto de práticas indispensáveis para a continuidade das atividades nesse setor, tendo em vista a concorrência crescente das comunidades locais e da biota por este recurso, essencial para a vida. Além disto, são impactos sociais pertinentes a se considerar, na adoção de projetos sustentáveis, o potencial de geração de emprego e renda, que deve ser potencializado, a fim de que a organização contribua assertivamente para o alcance dos ODS e para a redução dos riscos ESG em suas atividades. Há que se considerar ainda, no aspecto da sustentabilidade social, os impactos urbanísticos das práticas sustentáveis, as quais devem ser pautadas pela redução das concentrações de aglomerados humanos, fixação do homem no campo, respeito às tradições, hábitos, crenças e legislação das comunidades locais, a fim de atingir altos níveis de governança, engajamento e reconhecimento das ações ESG.

Por fim, mas não menos importante, dentre os muitos aspectos econômicos da sustentabilidade em mineração, considera-se o emprego de rejeitos na construção civil como uma alternativa viável de renda para as plantas, uma vez que a inserção de resíduos de mineração em modelos produtivos integrados conduz à redução de desperdícios e consistência no fornecimento e monetização de serviços ambientais. Além destes aspectos, um potencial de renda emergente é a extração de minerais de terras raras, cuja oferta se torna a cada dia mais escassa, em comparação com o crescimento da demanda, oriunda

da conversão para uma economia verde.

### 5.5. Síntese das práticas sustentáveis revisadas

As principais práticas sustentáveis destacadas pela literatura revisada estão divididas em seis categorias:

i) Governança ambiental: trata do respeito à legislação ambiental e aos interesses das partes envolvidas, sejam investidores, comunidade ou autoridades governamentais.

ii) Emprego na construção civil: os rejeitos se destacam pela variedade de aplicações que podem contribuir para baratear os insumos da construção civil, notadamente na produção de aglomerantes, escória pra fundação de rodovias e pastas argilosas para materiais terrosos, como tijolos e telhas.

iii) Modelagem produtiva integrada: este é um princípio de gestão que pressupõe que os processos produtivos de uma planta de mineração fazem parte de outros ciclos produtivos mais amplos, nos quais os subprodutos da mineração, tais como escórias e rejeitos são inseridos como insumos em outros processos industriais.

iv) Bioextração e fitomineração: estas práticas utilizam organismos vivos, sejam bactérias, fungos ou plantas para extrair e aproveitar recursos minerais em outros ciclos produtivos.

v) Recuperação de terras raras e outros minerais: esta é uma prática emergente na mineração e consiste em buscar insumos valiosos nos rejeitos, notadamente os minerais da classe dos lantanídeos, fundamentais para a indústria de alta tecnologia, e que foi desprezado nos últimos séculos de mineração.

vi) Reciclagem das águas: um dos impactos ambientais negativos mais prejudiciais da mineração é a contaminação das águas. Como se trata de um recurso altamente disputado pelas comunidades locais, a prática de purificar e reutilizar as águas residuais se torna essencial para índices aceitáveis de governança ambiental nas minas.

## **5.6. Contribuições da pesquisa**

Ao término desta dissertação chegamos à percepção de que algumas das principais contribuições são despertar uma visão crítica sobre os impactos ambientais negativos da mineração, mas sem esquecermo-nos de que esta é uma atividade essencial para o conforto e a qualidade de vida das populações contemporâneas. Por isso, faz-se mister divulgar e aplicar as boas práticas destacadas, a fim de prolongar o ciclo de vida das minas e esclarecer a populações sobre sua responsabilidade na demanda e conservação de recursos naturais.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Esta pesquisa buscou também revisar a dinâmica sobre geração de rejeitos na cadeia produtiva da mineração, momento em que ficou claro o volume insustentável de resíduos atualmente gerados, em decorrência da rápida redução de rendimento das minas e aumento no consumo de produtos de origem mineral. O crescimento da geração de rejeitos por volume mineral processado tende a amplificar os impactos negativos da atividade na água e no solo, os quais provocam a competição entre as plantas de mineração, as comunidades locais, a agricultura e a indústria por fatores críticos para a sobrevivência humana.

A análise das melhores práticas para o aproveitamento de rejeitos da mineração indica que a conservação da água e do solo são elementos estruturantes para a sustentabilidade em mineração. Além disto, o uso dos rejeitos em construção civil, reaterro de minas, bioextração e recuperação de elementos de terras raras se destacam como práticas sustentáveis, que ainda exigem investimentos e engajamentos consideráveis para se consolidarem como parte de um sistema integrado de produção mineral.

A busca por evidenciar as práticas que apresentam melhor viabilidade social, ambiental e econômica levou à proposição de quatro categorias de indicadores, que podem ser desenvolvidos para análise e comparação da sustentabilidade entre plantas de mineração. Trata-se da proposta de índices fitossociais, associados à qualidade da água e do solo, dentre os quais se

destacam a acidez, quantificação da contaminação por metais pesados e metaloides na água; erosão, compactação, carbono orgânico disponível, disponibilidade de macro e micronutrientes no solo.

Quanto aos indicadores de governança orientados para a sustentabilidade em mineração, a revisão mostra a necessidade de se considerar a integração produtiva dos rejeitos como um fator indispensável para o aumento no ciclo de vida das minas, bem como para a melhoria nos requisitos de eficiência administrativa, investimentos em inovação, transparência e combate à obsolescência, considerados como indicadores úteis para avaliar a governança em uma planta de mineração.

São consideradas como principais contribuições desta pesquisa a propagação de práticas sustentáveis na gestão mineral, com vistas ao aumento no ciclo de vida das minas. Além disto, a dissertação oferece aporte teórico para iniciativas orientadas para a diminuição no volume de rejeitos gerados pelo setor, bem como para o fomento a políticas públicas e iniciativas de sustentabilidade.

São fatores limitantes para as conclusões desta pesquisa a carência de dados empíricos a corroborar, ou refutar as hipóteses aqui levantadas; e a falta de profundidade na determinação dos indicadores quantitativos aventados, os quais precisam ser analisados e discutidos por especialistas mais qualificados, quanto às especificidades bioquímicas, agrônômicas, financeiras e ambientais. Devido a tais limitações sugere-se como caminhos possíveis para pesquisas futuras sobre a sustentabilidade na mineração a aplicação empírica dos indicadores propostos, bem como a comparação entre os resultados de governança socioambiental entre plantas de mineração que possuam indicadores diversos, além do acompanhamento sistemático da evolução destes e de outros índices de sustentabilidade na gestão de minas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM. **Análise de Impacto Regulatório -AIR: aproveitamento de rejeitos e estéril**, n. 01. [S. l.]: ANM, 2020. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/regulacao/analise-do-impacto-regulatorio-air/air\\_aproveitamento-de-esteril-rejeitos\\_02-2.pdf](https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/regulacao/analise-do-impacto-regulatorio-air/air_aproveitamento-de-esteril-rejeitos_02-2.pdf). Acesso em: 23 jan. 2022.
- ALMEIDA, Joana; MAGRO, Catia; P. MATEUS, Eduardo; RIBEIRO, Alexandra B. *LifeCycle Assessment of Electrodialytic Technologies to Recover Raw Materials from Mine Tailings*. **Sustainability**, v. 13, n. 7, p. 3915, 2021a. <https://doi.org/10.3390/su13073915>.
- ALMEIDA, Joana; FARIA, P.; RIBEIRO, A.B.; SANTOS SILVA, A. *Cement-based mortars production applying mining residues treated with an electro-based technology and a thermal treatment: Technical and economic effects*. **Construction and Building Materials**, v. 280, p. 122483, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122483>.
- ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ, Martina-Inmaculada; PRENDES-GERO, María-Belén; GONZÁLEZ-NICIEZA, Celestino; GUERRERO-MIGUEL, Diego-José; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, Juan Enrique. *Optimum Mix Design for 3D Concrete Printing Using Mining Tailings: A Case Study in Spain*. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1568, 2 fev. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13031568>.
- ARAYA, Natalia; RAMÍREZ, Yendery; CISTERNAS, Luis A.; KRASLAWSKI, Andrzej. *Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management*. **Applied Energy**, v. 303, p. 117626, dez. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117626>.
- ASIF, Zunaira; CHEN, Zhi. *Environmental management in North American mining sector*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 1, p. 167–179, jan.2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5651-8>.
- AZNAR-SÁNCHEZ, José; GARCÍA-GÓMEZ, José; VELASCO-MUÑOZ, Juan; CARRETERO-GÓMEZ, Anselmo. *Mining Waste and Its Sustainable Management: Advances in Worldwide Research*. **Minerals**, v. 8, n. 7, p. 284, 2 jul. 2018. <https://doi.org/10.3390/min8070284>.
- BAMIGBOYE, Gideon O.; BASSEY, Daniel E.; OLUKANNI, David O.; NGENE, Ben U.; ADEGOKE, Dunmininu; ODETOYAN, Abimbola O.; KAREEM, Mutiu A.; ENABULELE, David O.; NWORGU, Austin T. *Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability*. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124581, fev. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124581>.



BANCÁRIOS - PA. Rios, terras e alimentos contaminados: como vivem os afetados pelo garimpo ilegal. **Sindicato dos Empregados em Estabelecimentos Bancários**, Pará, seq. Gerais, p. 1, 30 mar. 2021. Disponível em: <https://bancariospa.org.br/rios-terras-e-alimentos-contaminados-como-vivem-os-afetados-pelo-garimpo-ilegal/>. Acesso em: 28 fev. 2022.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. trad. Luíss Antero Reto; Augusto Pinheiro. Lisboa: Edições 70, 2000.

BHAGWAT, Kishor; DELHI, Venkata Santosh Kumar. *A systematic review of construction safety research: quantitative and qualitative content analysis approach*. **Built Environment Project and Asset Management**, v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 14 out. 2021. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-04-2021-0068>.

BITENCOURT, Dioni Glei Bonini; PINTO, Luiz Fernando Spinelli; PAULETTO, Eloy Antonio; SILVA, Mariana Tavares; GARCIA, Gabriel Furtado. Geração de drenagem ácida e de contaminação por metais pesados em perfis de solos construídos em área de mineração de carvão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1821–1834, dez. 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140810>.

BRASIL MINERAL. RHI Magnesita reaproveita 42 mil t na produção. 4 fev. 2022. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/rhi-magnesita-reaproveita-42-mil-t-na-producao>. Acesso em: 28 fev. 2022.

CAPASSO, I.; LIRER, S.; FLORA, A.; FERONE, C.; CIOFFI, R.; CAPUTO, D.; LIGUORI, B. *Reuse of mining waste as aggregates in fly ash-based geopolymers*. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 65–73, maio 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.164>.

CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Portal .periodicos. CAPES - Quem somos. 11 jan. 2022. Disponível em: <https://www.periodicos-capes.gov.br/ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php/sobre/quem-somos.html>. Acesso em: 11 jan. 2022.

CAPRARO, Ana Paula; MEDEIROS, Marcelo H. F.; CALVO, Analiet; PIERALISI, Ricardo. Concretos contaminados por pirita: corrosão e formação de película passivadora do aço. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2020. >**Congresso Brasileiro de Patologia das Construções** [...]. [S. l.]: Associação Brasileira de Patologia das Construções, 2020. p. 2996–3007. <https://doi.org/10.4322/CBPAT.2020.289>.

CARVALHO EUGÊNIO, Tony Matheus; FRANCISCO FAGUNDES, Jefferson;

SANTOS VIANA, Queilla; PEREIRA VILELA, Alan; FARINASSI MENDES, Rafael.

*Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles.* **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122484>.

CASTELEIN, Martijn; VERBRUGGEN, Florian; VAN RENTERGHEM, Lisa; SPOOREN, Jeroen; YURRAMENDI, Lourdes; DU LAING, Gijs; BOON, Nico; SOETAERT, Wim; HENNEBEL, Tom; ROELANTS, Sophie; WILLIAMSON, Adam J.

*Bioleaching of metals from secondary materials using glycolipid biosurfactants.*

**Minerals Engineering**, v. 163, p. 106665, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106665>.

CHEMICALAID.  $\text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$  - Equação de Balanço Químico.

7 ago. 2022. **ChemicalAid**. Disponível em:

<https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation=FeS2+%2B+H2O+%3D+Fe2O3+%2B+H2+%2B+H2SO4>. Acesso em: 7 ago. 2022.

CHRISTMANN, Patrice. *Mineral Resource Governance in the 21st Century and a sustainable European Union.* **Mineral Economics**, v. 34, n. 2, p. 187–208, jul. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13563-021-00265-4>.

CLARIVATE. Pesquisa de documento - Coleção principal da *Web of Science*. 2021.

**Web of Science**. [Buscador]. Disponível em: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>. Acesso em: 23 jan. 2022.

COELHO, Tatiane Perusse; REZENDE, Cristiane de Paula; SOUSA, Maria do Carmo Vilas Boas; PEREIRA, Carlos Eduardo de Oliveira; MENDONÇA, Simone de Araújo Medina. Comparação e análise do uso de revisão sistemática e revisão de escopo na área do cuidado ao paciente na Farmácia. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e08101219915, 12 set. 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.19915>.

CUI, Chao-qun; WANG, Bing; ZHAO, Yi-xin; ZHANG, Yong-Jin; XUE, Li-ming. *Risk management for mine closure: A cloud model and hybrid semi-quantitative decision method.* **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 27, n. 8, p.1021–1035, ago. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2002-7>.

DE VILLIERS, Johan P.R. *How to Sustain Mineral Resources: Beneficiation and Mineral Engineering Opportunities.* **Elements**, v. 13, n. 5, p. 307–312, 1 out. 2017. <https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.307>.

DE-LA-TORRE-UGARTE-GUANILO, Mônica Cecilia; TAKAHASHI, Renata Ferreira; BERTOLOZZI, Maria Rita. Revisão sistemática: noções gerais. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, v. 45, n. 5, p. 1260–1266, out. 2011. <https://doi.org/10.1590/S0080-62342011000500033>.

DI CARLO, E.; CHEN, C. R.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R.; COURTNEY, R. *Soil quality and vegetation performance indicators for sustainable rehabilitation of bauxite residue disposal areas: a review*. **Soil Research**, v. 57, n. 5, p. 419, 2019. <https://doi.org/10.1071/SR18348>.

DI NOI, Claudia; CIROTH, Andreas. *Environmental and Social Pressures in Mining. Results from a Sustainability Hotspots Screening*. **Resources**, v. 7, n. 4, p. 80, 1 dez.2018. <https://doi.org/10.3390/resources7040080>.

DIAS, Genebaldo Freire. **Educação ambiental: princípios e práticas**. 9. ed. São Paulo, S.P: Editors Gaia, 2004.

DONG, Longjun; TONG, Xiaojie; LI, Xibing; ZHOU, Jian; WANG, Shaofeng; LIU, Bing. *Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines*. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1562–1578, fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.291>.

DUSHYANTHA, Nimila; BATAPOLA, Nadeera; ILANKOON, I.M.S.K.; ROHITHA, Sudath;PREMASIRI, Ranjith; ABEYSINGHE, Bandara; RATNAYAKE, Nalin; DISSANAYAKE, Kithsiri. *The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production*. **Ore Geology Reviews**, v. 122, p. 103521, jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>.

ESMAEILI, Jamshid; ASLANI, Hossein; ONUAGULUCHI, Obinna. *Reuse Potentials of Copper Mine Tailings in Mortar and Concrete Composites*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 5, p. 04020084, maio 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003145).

FIGUEIREDO, Ricardo A.M.; SILVEIRA, Ana B.M.; MELO, Eduardo L.P.; COSTA, Gabriel Q.G.; BRANDÃO, Paulo R.G.; AGUILAR, Maria T.P.; HENRIQUES, Andréia B.; MAZZINGHY, Douglas B. *Mechanical and chemical analysis of one-part geopolymers synthesised with iron ore tailings from Brazil*. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 14, p. 2650–2657, set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.153>.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Mauricio Gomes. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 23, n. 1, p. 183–184, mar. 2014. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742014000100018>.

GANDHI, Indira. *Indira Gandhi's Speech at the Stockholm Conference in 1972*. 1972. **Achievements of UDF Government in Kerala**. Disponível em: <https://countryawake.blogspot.com/2016/04/achievements-of-udf-government-in.html>. Acesso em: 17 abr. 2022.

GOMES, Luiz Flávio. Crimes contra a Humanidade: Conceito e Imprescritibilidade(Parte II). 2009. **Jusbrasil**. Disponível em: <https://fg.jusbrasil.com.br/noticias/1633577/crimes-contra-a-humanidade-conceito-e-imprescritibilidade-parte-ii>. Acesso em: 7 ago. 2022.

GORAKHKI, Mohammad; BAREITHER, Christopher. *Sustainable Reuse of Mine Tailings and Waste Rock as Water-Balance Covers*. **Minerals**, v. 7, n. 7, p. 128, 24 jul.2017. <https://doi.org/10.3390/min7070128>.

HEFNI, Mohammed; AHMED, Hussin A. M.; OMAR, Ebaa Shaikh; ALI, Maaz A. *The Potential Re-Use of Saudi Mine Tailings in Mine Backfill: A Path towards Sustainable Mining in Saudi Arabia*. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6204, 31 maio 2021. <https://doi.org/10.3390/su13116204>.

HOU, Deyi; O'CONNOR, David; IGALAVITHANA, Avanthi D.; ALESSI, Daniel S.; LUO, Jie; TSANG, Daniel C. W.; SPARKS, Donald L.; YAMAUCHI, Yusuke; RINKLEBE, Jörg; OK, Yong Sik. *Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability*. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 7, p. 366–381, jul. 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>.

HUNT, Andrew J.; ANDERSON, Christopher W.N.; BRUCE, Neil; GARCÍA, Andrea Muñoz; GRAEDEL, Thomas E.; HODSON, Mark; MEECH, John A.; NASSAR, Nedal T.; PARKER, Helen L.; RYLOTT, Elizabeth L.; SOTIRIOU, Konstantina; ZHANG, Qing; CLARK, James H. *Phytoextraction as a tool for green chemistry*. **Green Processing and Synthesis**, v. 3, n. 1, 1 jan. 2014. <https://doi.org/10.1515/gps-2013-0103>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE | Séries Estatísticas & Séries Históricas. 2015. **Séries Estatísticas & Séries Históricas**. Disponível em: <https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=7&op=0&vcodigo=PD295>. Acesso em: 14 out. 2022.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. Exportação de minérios foi crucial para manter saldo da balança comercial positivo em 2021. 1 fev. 2022. **IBRAM**. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/exportacao-minerios-saldo-balancacomercial-positivo-2021>. Acesso em: 28 fev. 2022.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. Releases - Mineração tem grande influência no saldo comercial brasileiro. 2021. **IBRAM - Mineração do Brasil**. Disponível em: <https://ibram.org.br/release/mineracao-tem-grande-influencia-no->

[saldo-comercial-brasileiro](#). Acesso em: 28 fev. 2022.

IN THE MINE. Geração de empregos na mineração. 2020. **Revista In The Mine**. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/geracao-de-empregos-na-mineracao>. Acesso em: 28 fev. 2022.

INCE, Ceren; DEROGAR, Shahram; GURKAYA, Koray; BALL, Richard James. *Properties, durability and cost efficiency of cement and hydrated lime mortars reusing copper mine tailings of Lefke-Xeros in Cyprus*. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121070, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121070>.

INSTITUTO MINERE. Empilhamento de rejeito à seco: alternativa à disposição em barragens. 10 ar. 2019. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/empilhamento-de-rejeito-a-seco-alternativa-a-disposicao-em-barragens>. Acesso em: 28 fev. 2022.

KEFENI, Kebede K.; MSAGATI, Titus A.M.; MAMBA, Bhekhe B. *Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review*. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 475–493, maio 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>.

KINNUNEN, Päivi; OBENAU-EMLER, Robert; RAATIKAINEN, Jukka; GUIGNOT, Sylvain; GUIMERA, Jordi; CIROTH, Andreas; HEISKANEN, Kari. *Review of closed water loops with ore sorting and tailings valorisation for a more sustainable mining industry*. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123237, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123237>.

KYZAS, George Z.; MATIS, Kostas A. *Methods of arsenic wastes recycling: Focus on flotation*. **Journal of Molecular Liquids**, v. 214, p. 37–45, fev. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.11.028>.

LANGFELD, Oliver; BINDER, Angela. *Blue Mining – Today's Mine Planning for Future Mines*. **Geo-Resources Environment and Engineering**, v. 2, 2017. <https://doi.org/10.15273/gree.2017.02.001>.

LÈBRE, Éléonore; CORDER, Glen D.; GOLEV, Artem. *Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource*. **Minerals Engineering**, v. 107, p. 34–42, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004>.

LI, Yan. *Comprehensive Benefit Evaluation of Cemented Paste Backfill in the Mining Industry*. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1–9, 10 mar. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6646671>.

LUO, Mengjie; LIU, Chenglin; JIANG, Youfa; XUE, Jin; LI, Ping; YU, Jianguo. *Green recovery of potassium and aluminum elements from alunite tailings using gradient leaching process*. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1080–

1090, dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.090>.

MANZARDO, Alessandro; REN, Jingzheng; PIANTELLA, Antonio; MAZZI, Anna; FEDELE, Andrea; SCIPIONI, Antonio. *Integration of water footprint accounting and costs for optimal chemical pulp supply mix in paper industry*. **Journal of Cleaner Production**, v. 72, p. 167–173, jun. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.014>.

MARUTHUPANDIAN, S.; CHALIASOU, A.; KANELLOPOULOS, A. *Recycling mine tailings as precursors for cementitious binders – Methods, challenges and future outlook*. **Construction and Building Materials**, v. 312, p. 125333, dez. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125333>.

MEHTA, Neha; DINO, Giovanna; PASSARELLA, Iride; AJMONE-MARSAN, Franco; ROSSETTI, Piergiorgio; DE LUCA, Domenico. *Assessment of the Possible Reuse of Extractive Waste Coming from Abandoned Mine Sites: Case Study in Gorno, Italy*. **Sustainability**, v. 12, n. 6, p. 2471, 21 mar. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12062471>.

MOHAJERANI, Abbas; SUTER, David; JEFFREY-BAILEY, Tristan; SONG, Tianyang; ARULRAJAH, Arul; HORPIBULSUK, Suksun; LAW, David. *Recycling waste materials in geopolymers concrete*. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, n. 3, p. 493–515, abr. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-01660-2>.

MORAN-PALACIOS, Henar; ORTEGA-FERNANDEZ, Francisco; LOPEZ-CASTAÑO, Raquel; ALVAREZ-CABAL, Jose V. *The Potential of Iron Ore Tailings as Secondary Deposits of Rare Earths*. **Applied Sciences**, v. 9, n. 14, p. 2913, 21 jul. 2019. <https://doi.org/10.3390/app9142913>.

MULEYA, Franco; MULENGA, Bodwin; ZULU, Sambo Lyson; NWAUBANI, Sunday; TEMBO, Chipozya Kosta; MUSHOTA, Henry. *Investigating the suitability and cost-benefit of copper tailings as partial replacement of sand in concrete in Zambia: an exploratory study*. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 19, n. 4, p. 828–849, 21 jun. 2021. <https://doi.org/10.1108/JEDT-05-2020-0186>.

NAGARAJ, H.B.; SHREYASVI, C. *Compressed Stabilized Earth Blocks Using Iron Mine Spoil Waste - An Explorative Study*. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1203–1212, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.281>.

NORTHEY, Stephen A.; MUDD, Gavin M.; SAARIVUORI, Elina; WESSMAN-JÄÄSKELÄINEN, Helena; HAQUE, Nawshad. *Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities?* **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1098–1116, nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.024>.

NTLHABANE, S.; BECKER, M.; CHARIKINYA, E.; VOIGT, M.; SCHOUWSTRA,

R.;

BRADSHAW, D. *Towards the development of an integrated modelling framework underpinned by mineralogy*. **Minerals Engineering**, v. 116, p. 123–131, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.09.013>.

NWAILA, Glen T.; GHORBANI, Yousef; ZHANG, Steven E.; FRIMMEL, Hartwig E.; TOLMAY, Leon C.K.; ROSE, Derek H.; NWAILA, Phumzile C.; BOURDEAU, Julie E.

*Valorisation of mine waste - Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand gold mines (South Africa) as an example*. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113013, out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113013>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Com queda de investimento estrangeiro, financiamento dos ODS cai no mundo: as Nações Unidas no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/132549-com-queda-de-investimento-estrangeiro-financiamento-dos-ods-cai-no-mundo>. Acesso em: 17 abr. 2022.

PAIVA, Aparecida Barbosa de; TANIGUCHI, Carlos Alberto Kenji; ROMERO, Ricardo Espindola; GARRUTI, Deborah dos Santos; PAGANO, Marcela Claudia; WEBER, Olmar Baller. *Chemical and microbiological attributes of sandy soil fertilized with crushed green coconut shell*. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 53, 2022. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220007>.

POORNIMA, Ramesh; SUGANYA, Kathirvel; SEBASTIAN, Selvaraj Paul. *Biosolids towards Back-To-Earth alternative concept (BEA) for environmental sustainability: a review*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 3, p. 3246–3287, jan. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16639-8>.

RAMOS, Alan Robson Alexandrino; OLIVEIRA, Keyty Almeida de; RODRIGUES, Francilene dos Santos. *Mercury-Based Mining in Yanomami Indigenous Lands and Accountabilities*. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, p. e03262, 2020. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20180326r2vu202015ao>.

REIS, Maria José; COLLARES, Eduardo Goulart; REIS, Fernanda Medeiros Dutra. *Technological assessment of tailings from quartzite mining sites in Alpinópolis (Minas Gerais–Brazil) as aggregates in concrete block paving (CBP)*. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 77, n. 4, p. 1623–1637, nov. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1015-6>.

SANTOS, Reinaldo Fagundes dos; ALVES, João Murta. *Proposta de um modelo de gestão integrada da cadeia de suprimentos: aplicação no segmento de eletrodomésticos*. **Production**, v. 25, n. 1, p. 125–142, 21 mar. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132014005000013>.

SANTOS, Venússia Eliane dos; GOMES, Marília Fernandes Maciel; BRAGA, Marcelo José; SILVEIRA, Suely de Fátima Ramos. *Análise do setor de produção*

e processamento de café em Minas Gerais: uma abordagem matriz insumo-produto. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 47, n. 2, p. 363–388, jun. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032009000200003>.

SELEBALO, Itumeleng M; SCHOLLES, Mary C; CLIFFORD-HOLMES, Jai K. *A Systemic Analysis of the Environmental Impacts of Gold Mining within the Blyde River Catchment, a Strategic Water Area of South Africa*. **Water**, v. 13, n. 3, p. 301, 26 jan.2021. <https://doi.org/10.3390/w13030301>.

SILVA, Edna Lúcia; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/312125489\\_Metodologia\\_da\\_Pesquisa\\_e\\_Elaboracao\\_de\\_Dissertacao](https://www.researchgate.net/publication/312125489_Metodologia_da_Pesquisa_e_Elaboracao_de_Dissertacao). Acesso em: 20 ago. 2022.

SILVA, Gerônimo Ferreira Da; SANTOS, Djail; SILVA, Alexandre Paiva Da; SOUZA, Jeorge Medeiros De. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de usona mesorregião do agreste paraibano. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 3, p. 25–35, set. 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n303rc>.

SOUZA, Juliana M. O.; CARNEIRO, Maria F. H.; PAULELLI, Ana Carolina C.; GROTTTO, Denise; MAGALHÃES JÚNIOR, Ariano M.; BARBOSA JÚNIOR, Fernando; BATISTA, Bruno L. *Arsenic and rice: toxicity, metabolism, and food safety*. **QuímicaNova**, 2014. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140279>.

SRIRAMOJU, S.K.; KUMAR, D.; MAJUMDAR, S.; DASH, P.S.; SHEE, D.; BANERJEE, R. *Sustainability of coal mines: Separation of clean coal from the fine-coal rejects by ultra-fine grinding and density-gradient-centrifugation*. **Powder Technology**, v. 383, p.356–370, maio 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.061>.

SUPPES, Rudolf; HEUSS-ASSBICHLER, Soraya. *How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part II: A Practical UNFC-Compliant Approach to Assess Project Sustainability with On-Site Exploration Data*. **Resources**, v. 10, n. 11, p. 110, 29 out. 2021. <https://doi.org/10.3390/resources10110110>.

TORRES, Carlos Moreira Miquelino Eleto; JACOVINE, Laércio Antônio Gonçalves; OLIVEIRA NETO, Silvio Nolasco de; SOUZA, Agostinho Lopes de; CAMPOS, Rogerio Assunção; SCHETTINI, Bruno Leão Said. Análise Fitossociológica e Valor de Importância em Carbono para uma Floresta Estacional Semidecidual. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n. 0, 17 ago. 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.099714>.

UNIVERSIDADE DE LEIDEN. **VOSviewer - Visualizing scientific landscapes**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 23 jan. 2022. VIMALA, Yerramilli; LAVANIA, Umesh Chandra; BANERJEE, Ritesh; LAVANIA, Seshu; MUKHERJEE, Anita. *Vetiver Grass Environmental Model for Rehabilitation of Iron Overburden Soil: An Ecosystem Service Approach*.



**National Academy Science Letters**, 18 nov. 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s40009-021-01087-2>.

VIVAN, André Luiz; ORTIZ, Felipe Alfonso Huertas; PALIARI, José Carlos. Modelo para o desenvolvimento de projetos kaizen para a indústria da construção civil. **Gestão & Produção**, v. 23, n. 2, p. 333–349, 14 maio 2016.  
<https://doi.org/10.1590/0104-530x2102-15>.

ZHANG, Nan; HEDAYAT, Ahmadreza; BOLAÑOS SOSA, Héctor Gelber; TUPA, Néstor; YANQUI MORALES, Isaac; CANAHUA LOZA, Reynaldo Sabino. *Crack evolution in the Brazilian disks of the mine tailings-based geopolymers measured from digital image correlations: An experimental investigation considering the effects of class F fly ash additions*. **Ceramics International**, v. 47, n. 22, p. 32382–32396, nov.2021a. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.138>.

ZHANG, Nan; HEDAYAT, Ahmadreza; BOLAÑOS SOSA, Héctor Gelber; TUPA, Néstor; YANQUI MORALES, Isaac; CANAHUA LOZA, Reynaldo Sabino. *Mechanical and fracture behaviors of compacted gold mine tailings by semi-circular bending tests and digital image correlation*. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 12