

RECURSOS HÍDRICOS NA MINERAÇÃO: IMPACTOS, TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E ESTRATÉGIAS DE GESTÃO AMBIENTAL

WATER RESOURCES IN MINING: IMPACTS, TREATMENT TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT STRATEGIES

Vicente Lorenzoni Montibeler - Graduando em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Espírito Santo. <vicente.montibeler@edu.ufes.br>

Prof. Dr. Rodrigo Randow de Freitas - Doutor em Aquicultura - Universidade Federal do Espírito Santo. <rodrigo.r.freitas@ufes.br>

Resumo

A relação entre os recursos hídricos e a mineração é frequentemente compreendida de forma multidisciplinar, abrangendo temas relacionados à gestão, ao reuso, ao tratamento e aos impactos ambientais. Este estudo teve como objetivo analisar a literatura existente por meio de uma revisão bibliométrica, buscando reunir informações fragmentadas e gerar insights sobre as publicações relacionadas ao tema. A metodologia baseou-se nas etapas de seleção do portfólio bibliográfico do método Knowledge Development Process Constructivist (ProKnow-C), adotando uma abordagem quantitativa e qualitativa. Conclui-se que a pesquisa forneceu informações relevantes que podem subsidiar estudos futuros de caráter mais aplicado, especialmente aqueles voltados à avaliação da eficácia, em longo prazo, de medidas consideradas sustentáveis.

Palavras-chave: Mineração; Recursos Hídricos; Impactos Ambientais; Inovação.

Abstract

The relationship between water resources and mining is often understood from a multidisciplinary perspective, encompassing issues related to management, reuse, treatment, and environmental impacts. This study aimed to analyze the existing literature through a bibliometric review, seeking to consolidate fragmented information and generate insights into publications related to the topic. The

methodology was based on the stages of bibliographic portfolio selection of the ProKnow-C method (Knowledge Development Process – Constructivist), adopting both quantitative and qualitative approaches. The results indicated a peak in publications between 2020 and 2024, highlighting that technological innovation has been the main resilience factor of the sector in the face of water scarcity and increasing regulatory pressures. It is concluded that the research provides relevant information that may support future studies of a more applied nature, particularly those focused on the long-term effectiveness of measures considered sustainable.

Keywords: Mining; Water Resources; Environmental Impacts; Innovation.

1. Introdução

A água constitui um recurso essencial para a manutenção da vida, para a produção agrícola, para a geração de energia e para o desenvolvimento das atividades industriais, assumindo papel estratégico nas dinâmicas econômicas e sociais contemporâneas (WWAP, 2016). Quando considerada sob a perspectiva de uso, gestão e valor econômico, a água é tratada como recurso hídrico, tema que tem ganhado destaque global em função do crescimento populacional, da intensificação das atividades produtivas e das pressões sobre a disponibilidade e qualidade desse recurso (Cantelle; Lima; Borges, 2018).

O setor industrial destaca-se entre os grandes consumidores de água e, simultaneamente, como potencial gerador de impactos ambientais, seja pelo lançamento de efluentes, seja pela alteração de ecossistemas aquáticos. Além disso, a escassez hídrica, a degradação da qualidade da água e as mudanças climáticas configuram riscos operacionais relevantes e abrangentes, capazes de comprometer cadeias produtivas e a estabilidade de diversos setores econômicos. As empresas têm se mostrado cada vez mais interessadas em entender como estes riscos estão relacionados e como podem afetar todo seu ecossistema (UNESCO, 2024; Pires et al., 2018).

Entre as atividades industriais, a mineração apresenta elevado potencial de impacto sobre os recursos hídricos. Processos como lavra, beneficiamento mineral,

disposição de rejeitos e uso de insumos químicos podem ocasionar erosão, assoreamento, contaminação de águas superficiais e subterrâneas e alterações nos ecossistemas locais (Custódio, 2000; Virgili; Vianna, 2000; Hudson, 2012; Dasgupta, 2012; Pedrozo-Acuña et al., 2025; Yin et al., 2025). Episódios de grande magnitude, como o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (Minas Gerais - MG), evidenciam a dimensão dos riscos associados à gestão inadequada de rejeitos minerais (Fongaro et al., 2019).

Silva e Silva (2021) dissertam sobre os impactos da mineração na vegetação e, conseqüentemente, em todo o ecossistema, destacando o elevado potencial destrutivo dessas atividades nos locais onde são desenvolvidas. Assim, os autores concluem que a mineração gerou mudanças no ecossistema da região de estudo. Pereira, Costa e Borges (2017) citam que as consequências negativas da mineração podem afetar diretamente o equilíbrio do ecossistema, destruindo habitats, afugentando a fauna, contribuindo com o processo de extinção de muitas espécies, interrompendo o fluxo gênico e a movimentação da biota.

Estudos apontam que a contaminação dos recursos hídricos decorrente de atividades industriais está relacionada ao aumento da diversidade de substâncias químicas presentes em efluentes, muitas das quais apresentam elevada persistência ambiental (Mierzwa; Hespanhol, 2005; Akaninwor et al., 2025). Pesquisas de caráter local também demonstram a influência antrópica na degradação de aquíferos em áreas industriais, associando a disposição inadequada de resíduos à contaminação de águas subterrâneas (Cembranel et al., 2019).

Apesar da relevância do tema, os estudos sobre a relação entre mineração e recursos hídricos encontram-se dispersos na literatura, dificultando a consolidação do conhecimento e a identificação de tendências, lacunas e abordagens predominantes. Nesse contexto, revisões estruturadas da literatura tornam-se fundamentais para organizar o conhecimento existente e identificar tendências, lacunas e oportunidades de aprimoramento.

Diante disso, este artigo tem como objetivo analisar a produção científica sobre a relação entre mineração e recursos hídricos por meio de uma revisão estruturada da literatura baseada no método ProKnow-C.

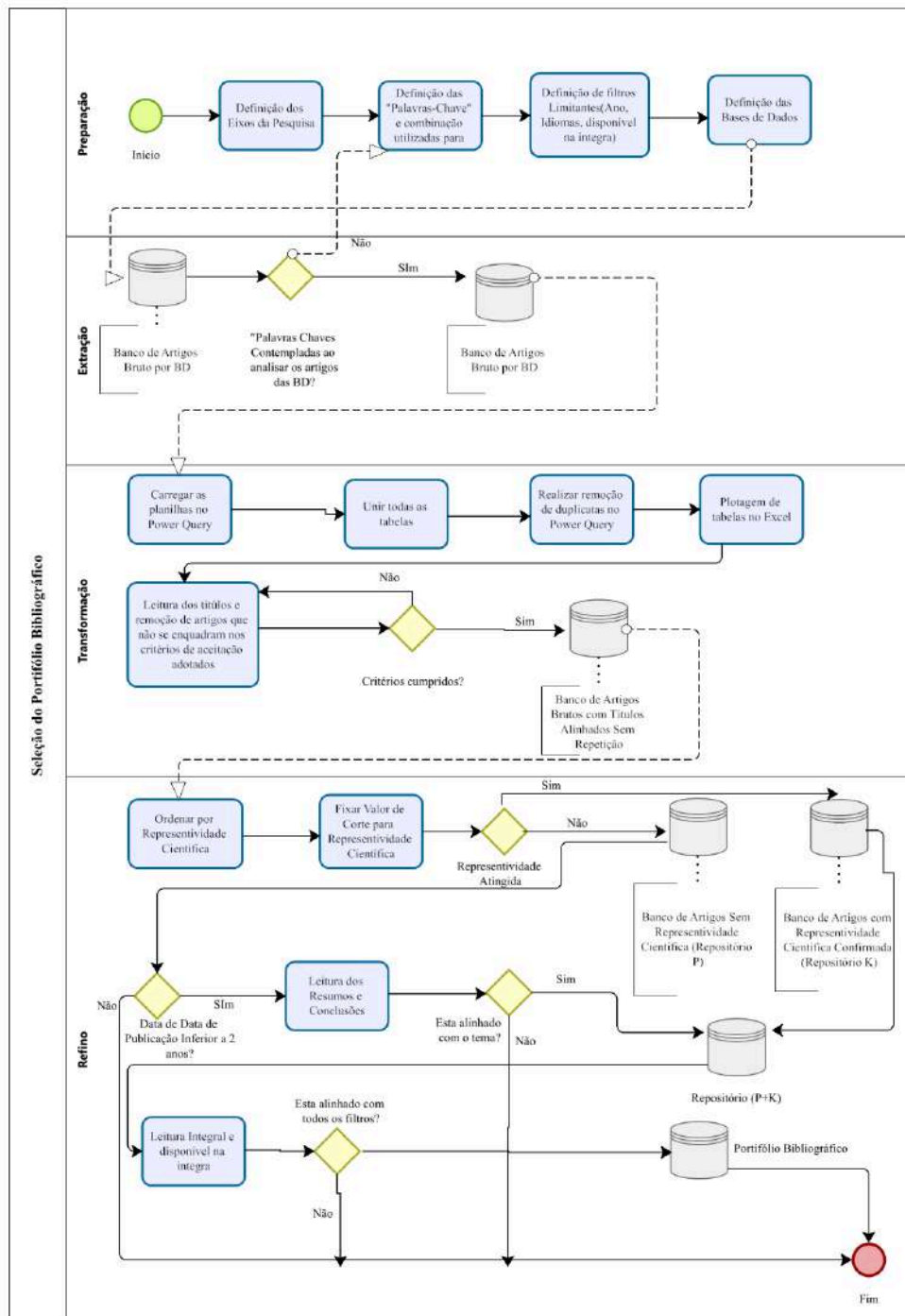
2. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma revisão estruturada da literatura, com natureza aplicada, abordagem qualitativa-quantitativa e objetivo exploratório-descritivo, uma vez que busca sistematizar o conhecimento existente sobre o uso de recursos hídricos na mineração e identificar padrões, tendências e lacunas científicas.

O procedimento metodológico adotado foi baseado no ProKnow-C, desenvolvido no LabMCDA/UFSC, amplamente utilizado na Engenharia de Produção para construção de portfólios bibliográficos e análise estruturada da literatura (Ensslin et al., 2015; Lacerda, Ensslin & Ensslin, 2012).

A busca foi realizada nas bases Scopus, Web of Science e Lens, utilizando combinações de palavras-chave associadas aos eixos temáticos, por meio de operadores booleanos. Sendo que o processo de refinamento seguiu as seguintes etapas do ProKnow-C (Figura 1).

Figura 1 - Processo metodológico utilizado para obtenção do portfólio bibliográfico.



Fonte: Autores (2026).

A definição prévia dos eixos temáticos constituiu uma etapa central da pesquisa, sendo adotada como estratégia para delimitar o escopo da análise bibliométrica e assegurar coerência temática na seleção das publicações, bem como organizar a

distribuição das palavras chaves utilizadas para o estudo (Tabela 1). Considerando o caráter multidimensional da relação entre mineração e recursos hídricos, foram definidos quatro eixos analíticos: (i) Mineração, voltado aos processos de beneficiamento mineral com uso direto de água; (ii) Recursos Hídricos, abrangendo estudos sobre uso, gestão, tratamento e reuso da água na atividade minerária; (iii) Impactos Ambientais e Perspectivas, direcionado à análise dos efeitos da mineração sobre corpos hídricos; e (iv) Gestão Estratégica, contemplando abordagens relacionadas à incorporação da gestão da água em estratégias corporativas, instrumentos regulatórios e práticas de sustentabilidade.

Tabela 1 - Palavras Chaves utilizadas na pesquisa.

Eixos Temáticos	Palavras chaves utilizadas
Impactos Ambientais	<i>("environmental impacts" OR "hydrological impacts" OR "impacts on water bodies" OR "water pollution" OR "mine water contamination" OR "aquatic ecosystem impacts" OR "tailings dam failure" OR "tailings dam impacts" OR "acid mine drainage" OR "water scarcity" OR "surface water contamination" OR "groundwater contamination" OR "sediment contamination") AND ("mining industry" OR "mineral processing" OR "mineral industry" OR "extractive industry")</i>
Recursos Hídricos	<i>("water reuse" OR "water recycling" OR "effluent treatment" OR "mine water management" OR "tailings water recovery") AND ("mining industry" OR "mineral industry" OR "mineral processing" OR "extractive industry")</i>
Gestão estratégica	<i>("ESG" OR "environmental social governance" OR "corporate sustainability" OR "sustainable management") AND ("mining industry" OR "mineral industry" OR "mineral processing" OR "extractive industry")</i>
Mineração	<i>("water efficiency" OR "efficient water use" OR "water consumption reduction" OR "water use optimization" OR "water saving" OR "sustainable water use" OR "water management") AND ("mining industry" OR "mineral industry" OR "mineral processing" OR "extractive industry")</i>

Fonte: Autores (2026)

2.1 Tratamento de Dados

A preparação adequada dos dados é considerada uma etapa crítica na seleção do portfólio bibliográfico, uma vez que falhas no processo de limpeza podem comprometer a interpretação de análises de co-ocorrência e de padrões de citação, influenciando diretamente os indicadores e as visualizações subsequentes. O tratamento dos dados consiste na organização e padronização das informações bibliográficas, com o objetivo de viabilizar sua utilização em softwares capazes de gerar insights a partir dos dados coletados durante a etapa de extração (Nowakowska, 2025).

Para realizar o afunilamento dos dados, foram adotados filtros iniciais dispostos em conjunto com as palavras chaves sendo o idioma dos artigos (inglês, português ou espanhol), período de publicação (2000 a 2025) e disponibilidade de acesso gratuito. Os dados foram organizados e manipulados no software Power Query, no qual as bases de dados foram unificadas em uma única tabela e os registros duplicados foram excluídos com base no número DOI. Em seguida, procedeu-se à leitura e ao alinhamento dos títulos, eliminando-se estudos desalinhados ao escopo da pesquisa, que passaram dos primeiros filtros.

Posteriormente, foi calculada a métrica de impacto relativo, definida como a razão entre o número de citações de cada artigo e o tempo decorrido desde sua publicação, considerando-se como referência o ano de 2025. Essa métrica, também denominada citações por ano (*cites per year*), tem sido utilizada em estudos bibliométricos ou em relatórios de citações na Web of Science como forma de reduzir o viés temporal inerente às contagens absolutas de citações, uma vez que artigos mais antigos tendem a acumular um maior número de citações simplesmente por terem mais tempo de existência (Bragg et al., 2021). A partir do impacto relativo obtido, definiu-se um critério de corte correspondente a 80 % do valor total de representatividade acumulada, selecionando-se, assim, o conjunto de artigos que, em conjunto, concentram 80 % do impacto relativo total da amostra analisada (Ensslin et al., 2015; Lacerda; Ensslin; Ensslin, 2012). A partir da representatividade acumulada, aplicou-se um critério de corte para a definição de

dois repositórios: o Repositório K, composto pelos artigos com maior relevância científica, e o Repositório P, formado pelos demais estudos.

Por fim, realizou-se a validação temática por meio da leitura parcial dos artigos do Repositório K e da reavaliação dos artigos recentes do Repositório P (publicados a menos de 2 anos), culminando na integração dos repositórios e na leitura exploratória final dos artigos selecionados, realizando a última filtragem a fim de se obter o portfólio bibliográfico.

2.2 Análise Bibliométrica

Foi realizada uma análise bibliométrica para caracterizar a evolução temporal das publicações, periódicos de origem, classificação por quartis e distribuição geográfica dos estudos. Adotando-se a métrica de impacto relativo (citações/idade do artigo).

Os dados foram analisados por meio do software Excel em conjunto com o Integrated Development Environment (IDE) R Studio com objetivo de gerar gráficos, mapas a partir dos dados coletados.

2.3 Análise Temática, Análise de Relacionamentos e Síntese Temática

Os artigos do portfólio foram submetidos a categorização temática, permitindo identificar a frequência e a inter-relação entre os eixos. Aplicou-se assim a síntese cruzada, relacionando impactos ambientais, tecnologias de tratamento e estratégias de gestão hídrica. Os achados também foram organizados em uma matriz, conectando tipos de impactos às tecnologias e práticas mitigadoras descritas, onde foi possível se realizar uma análise temática de frequência sobre os estudos. A síntese foi redigida com auxílio da IA NotebookLM, uma poderosa ferramenta capaz de analisar grandes volumes de dados e informações textuais. Todas as informações observadas por ela foram verificadas e confirmadas durante a redação do texto.

Como ferramenta auxiliar, as palavras chaves de todos os artigos foram coletadas com o objetivo de gerar uma WordCloud no site www.wordclouds.com. As nuvens de palavras são uma ferramenta visual valiosa para a apresentação de grandes conjuntos de termos, permitindo identificar de forma rápida e intuitiva os termos

mais frequentes e relevantes em um corpus de textos, o que contribui para a compreensão dos principais temas e tendências no domínio estudado (Herold et al., 2019).

Para a análise dos relacionamentos entre os artigos selecionados, utilizou-se a ferramenta LitMaps, que permite a visualização e o mapeamento das conexões bibliográficas a partir de citações e co-ocorrências. A plataforma foi empregada para identificar redes de influência e proximidade temática entre os estudos, auxiliando na organização do portfólio bibliográfico. Adicionalmente, foram utilizadas tags para classificar os artigos conforme os eixos temáticos definidos na pesquisa, possibilitando uma análise estruturada e comparativa dos conteúdos e de suas inter-relações.

2.4 Identificação de Lacunas

A identificação de lacunas de pesquisa é fundamental para guiar futuros estudos, evitando duplicações, estimulando inovações e fortalecendo a contribuição científica de uma revisão (Hassan, 2025).

Neste estudo, as lacunas de pesquisa foram identificadas ao fim do processo metodológico a partir da verificação de temas pouco recorrentes, limitações relatadas nos estudos, ausência de abordagens integradas. As lacunas de pesquisa em especial no método Proknow C são elucidadas em conjunto com perguntas da pesquisa (Ensslin et al., 2015).

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização do Portfólio Bibliográfico

A construção do portfólio bibliográfico seguiu as diretrizes do método ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist), a partir da seleção das bases de dados Scopus, Web of Science e Lens. A busca inicial nessas bases resultou em 3.193 registros. Após a junção das bases e a remoção de duplicatas, obteve-se um conjunto consolidado de 2.317 artigos únicos.

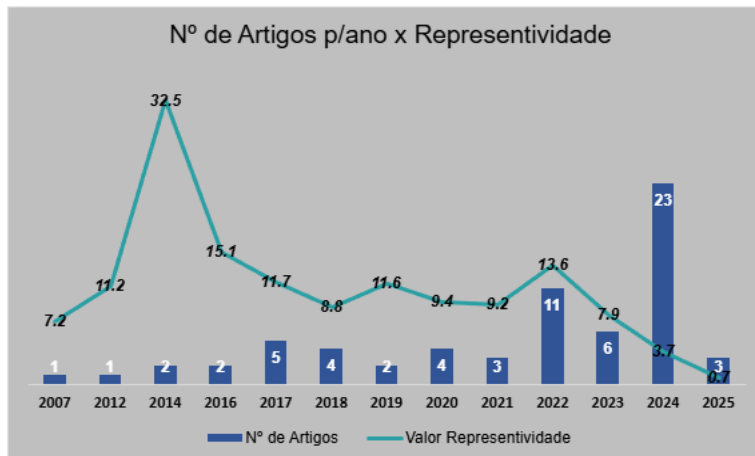
Em seguida, realizou-se a análise de alinhamento temático com base na leitura de títulos, resumos e palavras-chave, o que reduziu o conjunto para 577 artigos. Posteriormente, aplicou-se o critério de representatividade científica, considerando os estudos responsáveis por aproximadamente 80% do total de citações, resultando em 170 artigos. Após novo refinamento quanto à aderência temática, obteve-se o Repositório K, composto por 107 artigos.

Paralelamente, artigos recentes (com menos de dois anos de publicação) excluídos pelo critério de representatividade, mas considerados aderentes ao tema, foram reavaliados, originando o Repositório P, com 37 artigos. Por fim, a combinação dos repositórios K e P, seguida de uma leitura exploratória dos textos completos, resultou em um portfólio bibliográfico final de 67 artigos (Apêndice A), que fundamentam a análise e discussão dos resultados desta pesquisa.

A análise temporal das publicações demonstra crescimento gradual do interesse científico no tema, com maior concentração de estudos a partir da última década. Esse comportamento está associado ao aumento da pressão regulatória, à maior visibilidade de desastres ambientais envolvendo rejeitos minerais e à incorporação de práticas de sustentabilidade na indústria extrativa.

Observa-se que o número de publicações é mais elevado nos anos recentes, especialmente a partir de 2022. Entretanto, 2014 com 2 artigos publicados se destaca significativamente em representatividade, segundo a métrica adotada. Os demais anos apresentam taxa média relativamente constante, enquanto os valores observados nos anos mais recentes são inferiores, o que pode ser explicado pelo menor tempo decorrido desde a publicação (a partir de 2023), derivando em número reduzido de citações (Figura 2).

Figura 2 - Impacto relativo e nº de artigos ao longo dos anos.



Fonte: Autores (2026)

Dentro da amostra estudada, a predominância de editoras de referência global é notória, abarcando 43 dos 67 artigos selecionados. Destacam-se os grupos Elsevier (com ênfase nos periódicos *Minerals Engineering* e *Resources Policy*) e Springer (*Mine Water and the Environment*). Nota-se a relevância da MDPI (destaque para as revistas *Water* e *Minerals*), editora marcada por aliar rigor científico à agilidade nos processos de publicação contemporâneos.

A excelência do material coletado é atestada pela classificação de quartis, cujos dados foram extraídos do *Journal Citation Reports (JCR)* da Clarivate, ferramenta de referência global para métrica de periódicos (Clarivate, 2026). Observou-se assim uma expressiva concentração situados no primeiro Quartil (Q1). Essa categorização indica que as revistas utilizadas se situam entre as 25% mais influentes e citadas do mundo em suas áreas. Ademais, figuram periódicos do segundo Quartil (Q2), que representam o estrato de 25% a 50% das mais respeitadas de cada segmento científico.

Tabela 2 - Distribuição dos artigos por periódico, editora, área principal de estudo da revista e quartil SJR.

Periódico (<i>journal</i>)	Artigos	Editora	Ramo de estudo principal	Quartil (SJR)
Water	6	MDPI	Recursos Hídricos	Q1
Minerals Engineering	5	Elsevier	Engenharia de Processos	Q1
Minerals	4	MDPI	Mineração e Geologia	Q2
The Extractive Industries and Society	4	Elsevier	Ciências Sociais e Mineração	Q1

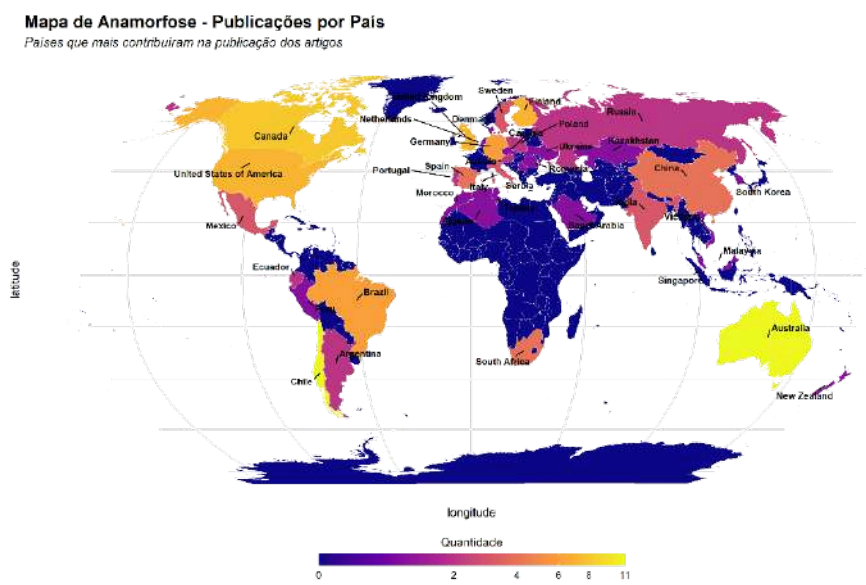
Sustainability	3	MDPI	Ciência Ambiental	Q2
Mine Water and the Environment	3	Springer	Hidrogeologia Mineira	Q2
Environ. Science and Pollution Research	3	Springer	Contaminação e Remediação	Q1
Resources Policy	2	Elsevier	Economia e Política Mineral	Q1
Environmental Sciences Europe	2	Springer	Políticas Ambientais	Q1
Water Resources and Industry	2	Elsevier	Gestão de Água Industrial	Q1
Applied Geochemistry	1	Elsevier	Geoquímica	Q1
Applied Water Science	1	Springer	Ciência das Águas	Q2
Cleaner Engineering and Technology	1	Elsevier	Engenharia Sustentável	Q2
Construction and Building Materials	1	Elsevier	Engenharia Civil	Q1
Energy Conversion and Management	1	Elsevier	Energia	Q1
Environmental Science & Policy	1	Elsevier	Política Ambiental	Q1
International J. of Coal Sci. & Tech.	1	Springer	Ciência do Carvão	Q1
Journal of Cleaner Production	1	Elsevier	Gestão e Sustentabilidade	Q1
Scientific Reports	1	Nature Group	Multidisciplinar	Q1
Outros (24 periódicos diversos)	24	Diversas	Diversos	Var.
TOTAL	67	--	--	--

Fonte: Autores (2026).

Quanto às áreas de estudo dos periódicos, nota-se uma considerável variedade que corrobora com a divisão dos eixos temáticos proposta no início da pesquisa. Essa interdisciplinaridade abrange desde a Engenharia de Processos e Geologia até Economia Mineral e Ciências Sociais. O amplo número de áreas observadas indica que a mineração deve ser entendida como um fenômeno complexo que exige uma gestão integrada entre recursos naturais e impactos socioeconômicos.

Uma vez verificada a robustez das fontes editoriais, partiu-se para análise geográfica, sobre quais países contribuíram para publicação dos artigos do portfólio. Ao avaliar o Mapa de Anamorfose (Figura 3), observou-se que o número de publicações está fortemente relacionado à dependência econômica ao setor mineral.

Figura 3 - Publicações por países.



Fonte: Autores (2026)

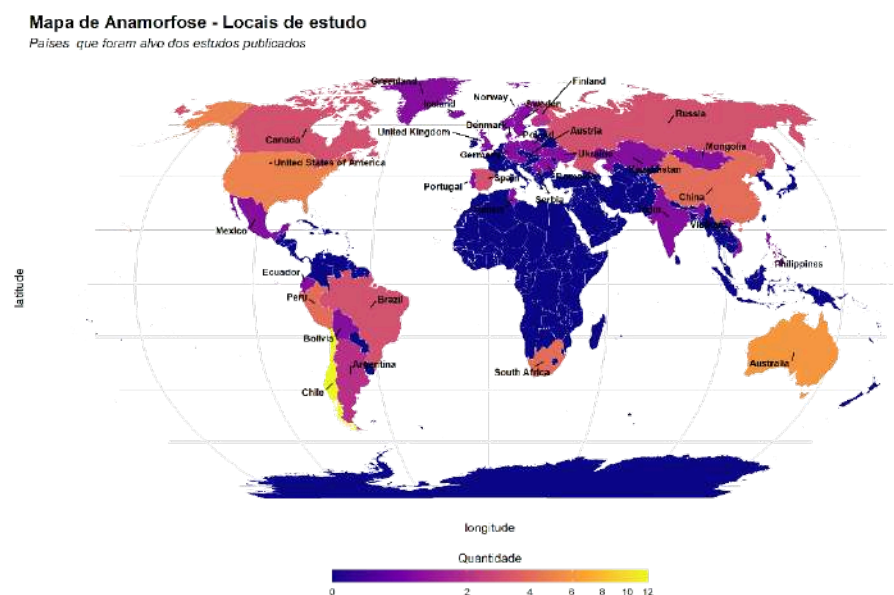
A distribuição geográfica das publicações reflete a relevância minerária de cada região. Na América, destacam-se Chile e Peru, grandes produtores de cobre, com pesquisas fortemente associadas ao estresse hídrico, enquanto o Brasil destaca tanto pela produção de minério de ferro, quanto pelo impacto recente de desastres ambientais. Na Ásia, a China lidera em volume e diversidade mineral, seguida por Índia e Cazaquistão como polos regionais emergentes. Na Europa, Suécia e Finlândia concentram a mineração metálica, enquanto a Austrália se destaca na Oceania pela liderança na produção de lítio e minério de ferro. No continente africano, África do Sul tem protagonismo acadêmico associado às suas expressivas reservas minerais (World Mining Data, 2023).

Quando analisamos os locais alvo dos estudos, observou-se que 17 artigos envolveram abrangência global, seja por revisões sistemáticas de literatura, análise de dados de múltiplos países ou pela impossibilidade em se identificar o local específico do estudo a partir da leitura do texto. Todavia, em 50 artigos foi possível identificar o local do estudo. Nos países identificados (Figura 4), foi notado uma relação consistente entre o local de origem dos pesquisadores e os alvos de seus estudos, com destaque aos grandes países produtores minerais como mencionado anteriormente (Figura 3). Países como Chile, Brasil, Argentina, Peru e África do Sul,

China, Índia concentram pesquisas voltadas aos seus próprios territórios, abordando desafios locais como gestão hídrica, contaminação, rejeitos e impactos ambientais. O Chile em especial a região do Deserto do Atacama que abrange também partes de Peru e Bolívia se apresenta como grande local de interesse dos pesquisadores, com presença de autores oriundos da Austrália.

Países como Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Itália, Finlândia, Austrália e Suécia lideram redes colaborativas com participação em pesquisas em outros países e produção de revisões ou frameworks globais. Demonstrando sua importância na colaboração na disseminação de conhecimento internacional em parceria com países de economia emergente.

Figura 4 - Países que foram alvo dos estudos publicados.



Fonte: Autores (2026).

3.2 Distribuição Temática dos Estudos

A categorização dos artigos com base nos eixos analíticos definidos na metodologia permitiu identificar a frequência dos principais focos de pesquisa. Observou-se predominância de estudos voltados aos impactos ambientais, especialmente contaminação de corpos hídricos, drenagem ácida de mina e mobilização de metais pesados. Em seguida, destacam-se pesquisas relacionadas a tecnologias de

tratamento de efluentes e reuso de água, evidenciando a preocupação científica com soluções técnicas para mitigação dos danos ambientais. Foi observado também uma grande interação entre os temas estudados, destacando principalmente a grande multidisciplinaridade do tema proposto (Tabela 3).

Tabela 3 - Distribuição de Frequência dos Artigos por eixo de estudo.

(Continua)	
Eixo relacionado	Nº de Artigos
Gestão Estratégica	11
Impactos Ambientais	11
Manejo de Recursos Hídricos	9
Mineração	9
Impactos Ambientais e Manejo de Recursos Hídricos	9
Gestão Estratégica e Manejo de Recursos Hídricos	5
Gestão Estratégica e Impactos Ambientais	4
Manejo de Recursos Hídricos e Mineração	3
Impactos Ambientais, Manejo de Recursos Hídricos e Gestão Estratégica	3
Impactos Ambientais, Manejo de Recursos Hídricos e Mineração	3
Total Geral	67

Fonte: Autores (2026).

Os resultados demonstram que os eixos de Impactos Ambientais e Recursos Hídricos são as áreas mais proeminentes, tanto em ocorrências individuais quanto em combinações com outros temas. O eixo Impactos Ambientais está presente em 30 dos 67 do portfólio, o que representa aproximadamente 44,8% da amostra. Quase na mesma proporção, o eixo Recursos Hídricos é abordado em 29 artigos, perfazendo 43,3% do total.

Em posição secundária, a Gestão Estratégica figura como um tema de importância intermediária, sendo identificada em 22 artigos (32,8%). Por fim, o eixo de Mineração é o de menor frequência entre os quatro focos, aparecendo em 15 artigos (22,4%).

3.3 Principais Impactos Hídricos Associados à Mineração

A análise dos artigos do portfólio revelou convergência quanto aos principais impactos da mineração sobre os recursos hídricos. Assim, destacam-se a contaminação por metais pesados e elementos potencialmente tóxicos, geração de

drenagem ácida de mina, aumento da turbidez e sedimentação, alteração do regime hidrológico local, riscos associados ao armazenamento de rejeitos.

Esses impactos estão diretamente relacionados às etapas de lavra e beneficiamento mineral, bem como ao manejo inadequado de resíduos e efluentes. A literatura também aponta que eventos extremos, como o rompimento de barragens de rejeito, ampliam significativamente a escala dos danos, afetando bacias hidrográficas inteiras.

3.4 Tecnologias de Tratamento e Mitigação

A literatura analisada demonstra predominância de abordagens tecnológicas voltadas à redução da carga poluente e à recuperação de água nos processos minerários. Observa-se convergência em três grandes grupos tecnológicos:

a) Tecnologias físico-químicas convencionais e avançadas: Estudos destacam a aplicação de filtração por membranas (micro, ultra, nano e osmose reversa), eletrocoagulação e adsorção como soluções amplamente empregadas para remoção de metais e redução de turbidez. Essas tecnologias apresentam elevada eficiência, porém com limitações relacionadas ao custo energético e geração de rejeitos secundários.

b) Tecnologias emergentes e química verde: Verifica-se crescimento recente de pesquisas sobre reagentes bio-baseados, biossurfactantes, coagulantes naturais e processos de mineralização assistida por CO₂. Essas soluções buscam reduzir a toxicidade dos reagentes convencionais, promovendo alinhamento com princípios de produção mais limpa.

c) Recuperação de recursos e economia circular: Os estudos indicam tendência de transição do paradigma “tratamento de efluentes” para “valorização de resíduos”, com recuperação de metais, reutilização de água e reaproveitamento de rejeitos como insumos industriais.

3.5 Estratégias de Gestão e Governança Hídrica

Os resultados apontam que a gestão hídrica na mineração evolui de uma abordagem operacional para uma perspectiva estratégica, incorporando:

governança regional de recursos hídricos; integração aos critérios ESG; fortalecimento da Licença Social para Operar (SLO); transparência e engajamento comunitário. Assim haverá consenso de que a gestão eficiente depende da articulação entre empresas, comunidades e órgãos reguladores, especialmente em regiões de estresse hídrico.

3.6 Integração entre Impactos, Tecnologias e Gestão

A análise cruzada dos estudos indica que soluções tecnológicas isoladas não garantem sustentabilidade hídrica. A literatura converge para a necessidade de modelos integrados, combinando: impacto ambiental - tecnologia de mitigação - governança - monitoramento contínuo.

3.7 Lacunas da Literatura

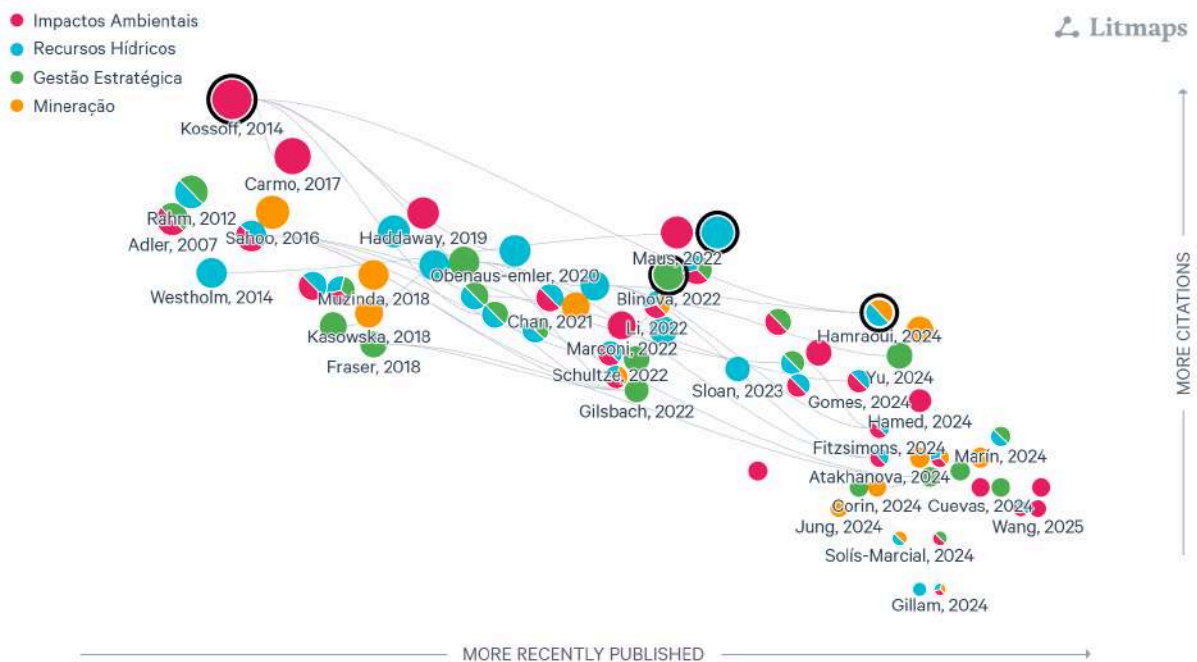
Foram identificadas cinco lacunas principais:

1. - Baixa integração entre tecnologias e estratégias de governança.
2. - Poucos estudos de longo prazo sobre eficácia de soluções baseadas na natureza.
3. - Carência de análises econômicas comparativas entre soluções convencionais e verdes.
4. - Escassez de dados sobre países emergentes que não possuem a mineração como atividade chave em seu portfólio econômico.
5. - Deficiência de métricas padronizadas para desempenho hídrico.

3.8 Análise Relacional (Mapa da Literatura)

A análise relacional presente no grafo (Figura 5) busca compreender o comportamento dos artigos ao longo do tempo, considerando a evolução do número de publicações e o panorama geral de suas pesquisas. O grafo, gerado no programa Litmaps, destaca no eixo X o tempo e no eixo Y o número de citações, evidenciando que artigos mais antigos continuam sendo citados por trabalhos mais recentes dentro da mesma amostra.

Figura 5 - Grafo de conexões entre artigos obtido por meio da ferramenta LitMaps



Fonte: Autores (2026).

Observa-se a interseção entre os temas destacados nos eixos de pesquisa e como eles se relacionam mutuamente. Entre eles, os eixos temáticos voltados aos impactos ambientais e ao tratamento de recursos hídricos são os que mais se entrelaçam no portfólio estudado, funcionando como elo relacional com os demais temas levantados.

A partir de 2022, nota-se que alguns artigos passam a abordar até três eixos temáticos, reforçando a tendência multidisciplinar deste estudo. O portfólio inicia com maior ênfase nos impactos ambientais, destacando os trabalhos de Kossoff (2014) e Carmo (2017) como pontos focais de maior representatividade. Com o passar dos anos, o caráter multidisciplinar torna-se cada vez mais evidente.

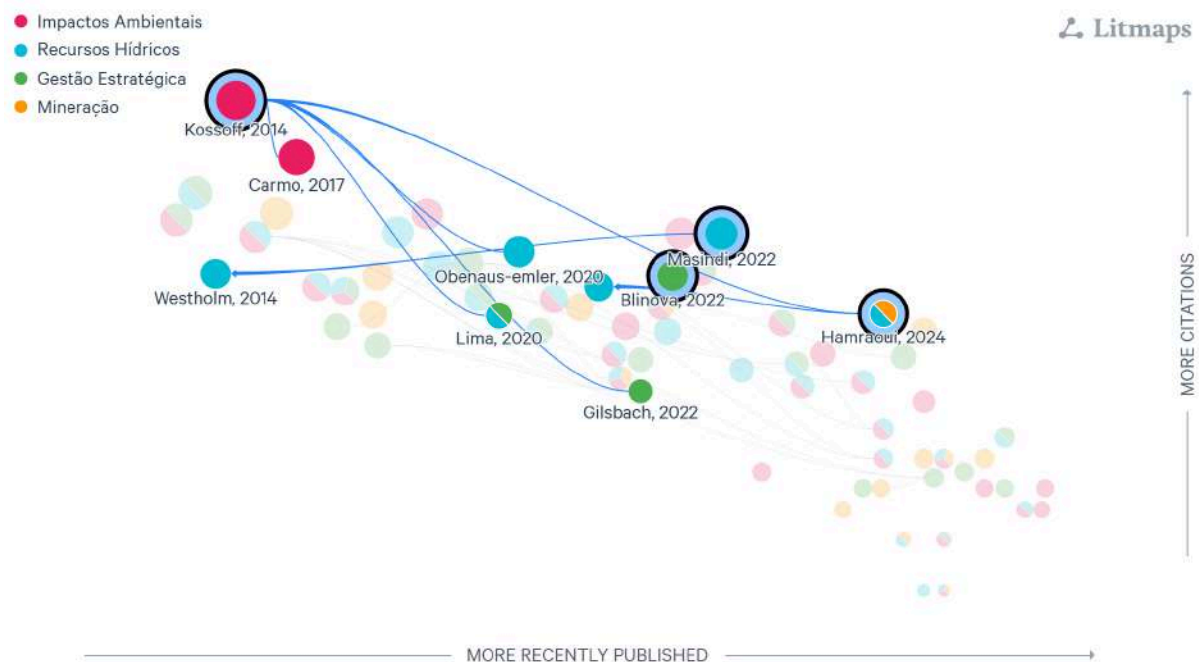
Os temas que tratam exclusivamente de estudos técnicos sobre mineração surgem de forma isolada e, em sua maioria, não se relacionam diretamente com outros. Isso pode ser explicado pela natureza específica de cada pesquisa. Ainda assim, o eixo da mineração aparece diluído em outros trabalhos, reafirmando o caráter interdisciplinar que se consolidou ao longo do tempo.

Ao analisar os artigos mais representativos de cada eixo, destaca-se a relevância de Kossoff et al. (2014), ainda citado mais de uma década depois por Hamraouid et al. (2024). O estudo apresenta uma revisão abrangente sobre barragens de rejeitos, seus impactos ambientais e possíveis técnicas de remediação, sendo sua expressiva repercussão acadêmica possivelmente associada ao aumento da atenção internacional aos riscos relacionados a essas estruturas, especialmente após desastres como o rompimento das barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos em Minas Gerais, Brasil. Eventos que intensificaram o debate sobre segurança nas operações de deposição de rejeitos e impulsionaram pesquisas voltadas à mitigação de riscos e ao reaproveitamento de rejeitos, consolidando o artigo como referência para diversos estudos subsequentes na área.

O destaque para Kossoff et al. (2014) também complementa a análise realizada a partir da métrica de impacto relativo (Figura 2), uma vez que a elevada representatividade desse ano específico pode ser atribuída, em grande medida, a um dos dois artigos publicados em 2014, evidenciando como uma produção pontual, porém altamente citada, é capaz de influenciar de forma significativa os indicadores bibliométricos do período.

De maneira complementar, percebe-se que os artigos se conectam de maneira multidisciplinar, indicando a continuidade do viés observado durante a pesquisa. O tema técnico da mineração também surge agregado a outros eixos temáticos, reforçando novamente sua inserção em abordagens interdisciplinares.

Figura 6 - Grafo de conexões entre artigos obtido por meio da ferramenta LitMaps com destaque para os artigos mais representativos de cada eixo.



Fonte: Autores (2026)

No que diz respeito à autoria das obras, observou-se uma alta fragmentação no portfólio estudado. A frequência de aparição de autores específicos é baixa, com raras ocorrências de pesquisadores ou grupos vinculados a mais de dois artigos diferentes. Essa característica revela que o conhecimento sobre o tema é construído de forma pulverizada por uma vasta rede de especialistas, em vez de estar concentrado em núcleos fechados de pesquisa.

Dessa forma, a identificação de "autores de destaque" ou líderes de pensamento requer uma investigação além da observação da métrica de frequência, envolvendo análises de redes de citações e cooperação técnica que fogem ao escopo desta caracterização inicial. Contudo, essa multiplicidade de autores únicos é positiva para o presente estudo, pois garante que as sínteses qualitativas aqui apresentadas derivam de uma ampla diversidade de perspectivas e experiências acadêmicas globais. A presença de publicações em diferentes países do mundo também pode contribuir com esse fato, além da própria amplitude dada a natureza do tema exposto.

3.9 Análise de Palavras-chave

Foi observado uma grande presença de palavras chaves que remetem aos temas relacionados a contaminação de águas, recuperação e remoção de metais, escassez hídrica e drenagem ácida de mina, confirmando aquilo que foi descrito nos temas discutidos (Figura 6).

Figura 7 - Nuvem de Palavras fornecida a partir do portfólio bibliográfico.



Fonte: Autores (2026).

3.10 Análise Sistemática

A partir da análise dos artigos referente a cada eixo temáticos, os autores estudados discorreram sobre os seguintes assuntos:

3.10.1 Governança, ESG e pressões regulamentares

Os estudos analisados indicaram uma convergência crescente entre a atividade mineradora e a necessidade de fortalecimento da governança hídrica, especialmente sob a ótica dos princípios Ambientais, Sociais e de Governança (ESG). Observou-se que a literatura enfatiza a superação de abordagens restritas apenas a projetos individuais, apontando a gestão estratégica e a regulação em

escala regional como fundamentais para a proteção ambiental coletiva (RAHM & RIHA, 2012; ROBERTSON, CÔTE & STEVENS, 2019).

É recorrentemente citado uma lacuna entre os relatórios corporativos de sustentabilidade e as demandas efetivas de stakeholders locais, particularmente no que se refere à qualidade da água, ao gerenciamento de rejeitos e à transparência das ações implementadas. Embora os relatórios tenham apresentado avanços ao longo do tempo, a literatura aponta limitações quanto aos detalhes de aspectos críticos relacionados ao descarte de resíduos e à colaboração com comunidades locais (GILSBACH, SCHUTTE & FRANKEN, 2022; NORTHEY et al., 2023; ROBERTSON, CÔTE & STEVENS, 2019).

No que se refere à avaliação de riscos, os estudos evidenciaram a predominância de operações minerárias situadas em contextos de elevado risco hídrico e social, especialmente em regiões áridas ou semiáridas. Análises aplicadas ao Chile e ao chamado “Triângulo do Lítio” revelaram que a fragmentação da governança, a escassez de dados sobre o ciclo da água e o baixo envolvimento comunitário contribuem para o surgimento de conflitos socioambientais, reforçando a necessidade de estratégias integradas de mitigação e de maior participação social (GARCIA-ZAVALA et al., 2023; PETAVRATZI et al., 2022).

Adicionalmente, a literatura reforça a compreensão de que abordagens puramente técnicas são insuficientes para a gestão sustentável da água na mineração. Foi identificado um padrão de valorização de modelos de governança baseados em valores sociais, nos quais a desconsideração de dimensões culturais e sociais tende a intensificar conflitos locais e impactos sobre sistemas socioecológicos, especialmente em contextos envolvendo comunidades tradicionais e indígenas (SHALSI et al., 2024; HADDAWAY et al., 2019).

Quanto ao arcabouço regulatório, os estudos apontaram um aumento progressivo das dificuldades na obtenção de licenças de uso da água, sobretudo em cenários de escassez hídrica e poluição. Análises comparativas de diferentes países indicaram que regulações frágeis, associadas ao crescimento do consumo hídrico pela mineração, ampliam os riscos territoriais, destacando o papel central das instituições públicas no fortalecimento dos mecanismos de controle e fiscalização

(THOMASHAUSEN, MAENNLING & MEBRATU-TSEGAYE, 2018; ATAKHANOVA, MEIRAMBAYEVA & BAIGALIYEVA, 2024).

Por fim, a literatura associa práticas eficazes de gestão ESG à construção de valor de longo prazo, baseada na confiança entre empresas, comunidades e demais partes interessadas. Estudos empíricos indicaram que a falta de transparência e de envolvimento comunitário compromete a percepção social da mineração, mesmo em contextos de investimentos tecnológicos em eficiência hídrica, enquanto iniciativas colaborativas e instrumentos de avaliação centrados na comunidade tendem a reduzir assimetrias de poder e fortalecer a legitimidade das operações minerárias (ARENAS-COLLAO et al., 2024; FRASER & KUNZ, 2018; PARK et al., 2023; YU et al., 2024; BLINOVA, PONOMARENKO & KNYSH, 2022).

3.10.2 Economia Circular e valorização de Resíduos

Os estudos analisados indicaram uma tendência consistente de transição dos passivos ambientais da mineração para potenciais ativos, alinhada aos princípios da economia circular. Observou-se que soluções tecnológicas voltadas à gestão de rejeitos, especialmente aquelas associadas à secagem avançada como destacado por Hamroui et al., (2024), desempenham papel central na recuperação de água e na redução de riscos ambientais, configurando-se como estratégias relevantes para a sustentabilidade da atividade mineradora.

Existe também um grande destaque a Drenagem Ácida de Mina (DAM) que constitui uma das principais ameaças aos recursos hídricos em áreas minerárias, porém relatam que a mesma pode ser mitigada por meio de abordagens integradas de tratamento. Mansindi et al., (2022) reforça que tais abordagens possibilitam simultaneamente a recuperação de minerais de valor econômico e de água com qualidade adequada, reforçando a aplicabilidade prática da economia circular no setor mineral.

Observou-se a valorização de resíduos específicos como uma estratégia recorrente na literatura. Estudos indicaram o potencial de recuperação de metais e outros produtos a partir de cinzas volantes provenientes da mineração de carvão, bem como o uso de rejeitos como precursores para materiais ativados por álcalis, oferecendo alternativas seguras de aplicação em operações de preenchimento de

minas. Adicionalmente, a reciclagem de rejeitos sulfetados tem sido apontada como uma solução para a extração de matérias-primas minerais e mitigação de danos ambientais (SAHOO et al., 2016; OBENAU-EMLER, FALAH & ILIKAINEN, 2020; PASHKEVICH et al., 2023).

Técnicas inovadoras sobre tratamento de águas residuais da mineração são altamente discutidas, com destaque para a predominância do uso de tecnologias de membranas, como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. Estudos de caso demonstraram que a integração de tecnologias convencionais e emergentes de membranas contribui significativamente para a recuperação de água e o tratamento de efluentes minerários, especialmente em contextos de escassez hídrica. Adicionalmente, a literatura destaca o papel crescente da nanotecnologia na gestão de efluentes e rejeitos, ampliando a eficiência na remoção de contaminantes e na recuperação de metais (SANTORO et al., 2021; MOHAPATRA & KIRPALANI, 2017).

3.10.3 Inovações tecnológicas

As inovações tecnológicas aplicadas à mineração têm se concentrado no desenvolvimento de soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos e efluentes, alinhadas aos princípios da economia circular. Observou-se a emergência de tecnologias capazes de integrar simultaneamente a mitigação de impactos ambientais e a recuperação de valor, como a mineralização acelerada de CO₂ assistida por ultrassom, que permite a remoção de metais da Drenagem Ácida de Mina (DAM) concomitantemente ao sequestro de carbono, e o uso de sucata de ferro como adsorvente de baixo custo para metais potencialmente tóxicos (RADFARNIA et al., 2024; IEPURE & POP, 2025). Métodos eletroquímicos destacados por Solis-Marcial et al., (2024), como a eletrocoagulação, também foram identificados como alternativas promissoras para a remoção de contaminantes persistentes, embora ainda apresentem limitações quanto à escala de aplicação, permanecendo majoritariamente restritos ao ambiente laboratorial.

É observado uma tendência consistente na substituição de reagentes sintéticos por alternativas de menor impacto ambiental nos processos de beneficiamento mineral. Estudos evidenciaram o potencial de espumantes e coagulantes de origem

biológica, como ésteres de lactato, compostos derivados da vitamina E, extratos de *Moringa oleifera* e biossurfactantes, os quais apresentaram desempenho técnico compatível ou levemente inferior com reagentes convencionais, associado a ganhos ambientais relevantes. Adicionalmente, tecnologias voltadas à recuperação e reciclagem de reagentes, como polímeros de ciclodextrina reticulada para a absorção de espumantes de flotação, foram apontadas como estratégias eficazes para a redução do consumo de insumos e da geração de efluentes (CORIN et al., 2023; AMANI et al., 2024; COBOS, GUTIÉRREZ & CABALLERO, 2024; SIMÕES et al., 2024; GLIAM et al., 2024).

Um pequeno destaque é dado em relação à qualidade da água nos processos de beneficiamento mineral, especialmente na flotação. Observou-se que a reciclagem de água sem estratégias adequadas de monitoramento pode intensificar o consumo de reagentes e comprometer a eficiência da recuperação mineral. Estudos demonstraram que a presença de íons como cálcio e magnésio, comuns em águas salobras, afeta negativamente a separação de minerais, bem como que interações entre polímeros e minerais sulfetados podem alterar de forma significativa o desempenho do processo (MUZINDA & SCHREITHOFER, 2018; JUNG et al., 2023; JIMENEZ et al., 2024).

Quando observado em uma esfera para além das inovações de processos de produção e tratamento de resíduos, alguns autores como More et al. (2020), Kunytska et al. (2024) e Li et al. (2024) destacam que a digitalização e a automação vêm assumindo papel estratégico na gestão hídrica da mineração. Sistemas de monitoramento automatizado, conceitos como a “Internet da Água de Mina” (IoMW), o uso de modelagem digital e gêmeos digitais, bem como iniciativas voltadas à implantação de “minas verdes”, têm sido associados à otimização do uso da água, à prevenção da poluição de aquíferos e à melhoria do desempenho ambiental das operações minerárias.

3.10.4 Escassez Hídrica e Estratégias de Abastecimento Alternativo

Diversos textos analisados indicaram que a escassez hídrica constitui um dos principais condicionantes para a viabilidade e a sustentabilidade das atividades minerárias, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Observou-se como em Meissner (2021) a recorrência do uso de ferramentas de análise espacial para

avaliar os impactos da mineração sobre o estresse hídrico, evidenciando a contribuição do setor para a intensificação da pressão sobre recursos hídricos regionais e globais.

Em ambientes de escassez hídrica os autores citam técnicas como dessalinização e do uso de recursos hídricos alternativos, como a água do mar, como estratégias centrais em contextos de elevado estresse hídrico, com destaque para o Chile e o Peru. Estudos indicaram resultados promissores na aplicação dessas soluções na mineração de minerais sulfurados, bem como na redução da dependência de fontes de água doce. Paralelamente, foram identificadas estratégias voltadas à maximização da recuperação de água na gestão de rejeitos, por meio do uso de tecnologias convencionais, espessadas, em pasta e filtradas, ampliando a eficiência hídrica dos processos (FITZSIMONS & WARREN, 2024; TORO et al., 2022; CACCIUTTOLO & VALENZUELA, 2022).

Como comentado anteriormente, há um destaque para regiões sensíveis como o Triângulo do Lítio, Marconi, Arengo e Clark (2022) observam que o balanço hídrico negativo associado à mineração pode gerar impactos relevantes sobre ecossistemas frágeis, especialmente áreas úmidas de altitude, reforçando a necessidade de avaliações integradas dos efeitos cumulativos da atividade mineradora

Adicionalmente, os estudos evidenciaram a crescente integração entre os sistemas de água e energia como estratégia para enfrentar restrições hídricas. Propostas como a associação entre armazenamento hidrelétrico bombeado e osmose reversa, bem como abordagens integradas de gestão ambiental na mineração de cobre, foram apontadas como soluções capazes de mitigar simultaneamente os desafios relacionados à água e à energia (MARÍN et al., 2024; LEIVA GONZÁLEZ & ONEDERRA, 2022).

Os autores também destacam que a escassez hídrica associada à mineração não pode ser dissociada de outros grandes usuários de água, como a agricultura. Estudos demonstraram que estratégias conjuntas de redução de consumo são essenciais para mitigar conflitos pelo uso da água. Nesse contexto, foram identificadas abordagens complementares, como a Recarga Gerenciada de

Aquíferos (MAR) e o uso de ferramentas de SIG associadas à lógica fuzzy, como alternativas eficazes para aumentar a disponibilidade de água subterrânea e promover a conservação de aquíferos em regiões minerárias (AIKEN et al., 2016; SLOAN et al., 2023; TIWARI et al., 2017).

3.10.5 Gestão de Legados Mineiros e Impactos de Longo Prazo

Os resíduos gerados pelo beneficiamento mineral constituem fontes persistentes de risco ambiental quando não adequadamente geridos, com destaque para barragens de rejeitos como estruturas críticas no contexto dos legados mineiros. A literatura evidenciou padrões recorrentes de falhas estruturais, limitações de governança e impactos ambientais de grande magnitude associados a esses empreendimentos, incluindo danos extensivos a corpos hídricos e territórios adjacentes, como observado em estudos de casos no Brasil e na África do Sul (KOSSOFF et al., 2014; CARMO et al., 2017; LIMA et al., 2020; ADLER et al., 2007).

Os impactos decorrentes dos legados mineiros frequentemente se manifestam de forma gradual e cumulativa, o que autores como Heikkinen, Nygren & Custodio (2023) nomeiam como *slow violence*. Estudos empíricos demonstraram que a contaminação progressiva de solos, águas superficiais e subterrâneas, bem como a bioacumulação de metais em organismos aquáticos, tende a ocorrer de maneira pouco perceptível pelas comunidades afetadas, ampliando os riscos à saúde humana e aos sistemas socioecológicos ao longo do tempo (HEIKKINEN, NYGREN & CUSTODIO, 2023; HAMED et al., 2024; CHAN et al., 2021).

A literatura também converge para a importância da caracterização, monitoramento e avaliação contínua dos legados mineiros como elementos centrais da gestão de longo prazo. Foi observada a crescente aplicação de ferramentas de sensoriamento remoto, análise espacial e aprendizado de máquina para mapear transformações na cobertura da terra, quantificar áreas impactadas e apoiar processos decisórios em escala regional e global. Adicionalmente, abordagens integradas que combinam métodos hidrológicos, geoquímicos e isotópicos foram apontadas como essenciais para compreender a dinâmica da água de mina e os fluxos de contaminantes em diferentes contextos minerários (MAUS et al., 2022; PACHECO et al., 2025; WOLKERSDORFER et al., 2020; DRAMLIĆ et al., 2024).

De maneira complementar, os estudos indicaram uma ampliação do debate sobre a aplicação de princípios da economia circular em contextos pós-fechamento de mina. Observou-se o potencial de transformação de passivos históricos em ativos, como no aproveitamento de lagos de cava, no uso de águas de minas abandonadas para fins energéticos e na reconfiguração de paisagens minerárias sob cenários ambientais em mudança. Esses trabalhos ressaltam, contudo, a necessidade de avaliações de longo prazo quanto aos impactos ecológicos e sociais associados a essas soluções (SCHULTZE et al., 2022; BANKS et al., 2017; GERWIN et al., 2023).

No que se refere às estratégias de mitigação e remediação, a literatura evidenciou um conjunto diversificado de abordagens para o tratamento da Drenagem Ácida de Mina (DAM) e da contaminação por metais. Foram identificadas soluções que abrangem desde materiais filtrantes, fitorremediação e sistemas passivos baseados em zonas úmidas construídas, até técnicas de monitoramento sazonal, prevenção de poluentes específicos e processos físico-químicos de neutralização e aeração. Essas estratégias têm sido especialmente destacadas pela sua aplicabilidade em minas abandonadas e em contextos de gestão de legados de longa duração (WESTHOLM et al., 2014; KASOWSKA, GEDIGA & SPIAK, 2017; GOMES & VALENTE, 2024; CUEVAS et al., 2024; WANG et al., 2025; KLEINMANN & ACKMAN, 2024; PAT-ESPADAS, 2018).

Apesar dos avanços técnicos e metodológicos, a literatura aponta lacunas relacionadas à integração entre governança, monitoramento de longo prazo e participação social na gestão de legados mineiros. Nesse sentido, os achados desta revisão subsidiam a formulação de questões de pesquisa voltadas ao aprofundamento de estratégias preventivas, adaptativas e socialmente inclusivas para o gerenciamento dos impactos persistentes da mineração.

3.11 Direcionamentos de Pesquisa

Ao reconhecer o estado da arte sobre o assunto, algumas perguntas referentes a cada um dos temas discutidos pelos autores foram elaboradas, a fim de se orientar futuras agendas de pesquisa:

- Governança, ESG e pressões regulamentares

Pergunta: Como as empresas podem promover mais ações com as comunidades locais e integrar de fato todos os princípios ESG em suas ações?

- Economia Circular e Valorização de Resíduos

Pergunta: Quais são os principais gargalos técnicos e econômicos para a transição do modelo de descarte de rejeitos para a valorização de minerais críticos sob a ótica da economia circular na mineração?

- Inovações tecnológicas

Pergunta: Como a aplicação de reagentes biobaseados (biossurfactantes e espumantes verdes) dentre outras tecnologias mencionadas, podem a longo prazo otimizar a recuperação mineral e, simultaneamente, reduzir a toxicidade e persistência de contaminantes no reúso hídrico em diferentes empreendimentos de grande porte (diferentes tipos de minas)?

- Escassez Hídrica e Estratégias de Abastecimento Alternativo

Pergunta: De que forma a integração de estratégias alternativas de abastecimento podem ajudar a reduzir o estresse hídrico nas regiões de escassez e quais as consequências econômicas e técnicas para as empresas?

- Gestão de Legados Mineiros e Impactos de Longo Prazo

Pergunta: Qual é a eficácia de longo prazo das Soluções Baseadas na Natureza (SBN) na remediação de drenagem ácida após o fechamento da mina, considerando cenários de mudanças climáticas extremas?"

4 Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão estruturada da literatura, a relação entre mineração e recursos hídricos, com ênfase nos impactos ambientais, tecnologias de tratamento e estratégias de gestão. A aplicação do método ProKnow-C possibilitou a consolidação de um portfólio representativo e a identificação de padrões, tendências e lacunas científicas no campo.

Os resultados evidenciam que a gestão hídrica na mineração evoluiu de uma abordagem predominantemente operacional para uma perspectiva estratégica, integrando tecnologias de tratamento, princípios de economia circular e práticas de governança alinhadas aos critérios ESG. Observou-se que a literatura recente enfatiza a redução da captação de água doce, o reúso industrial, a dessalinização e o desenvolvimento de reagentes menos tóxicos, indicando uma transição para modelos produtivos mais sustentáveis.

Contudo, os achados também revelam que soluções tecnológicas isoladas não garantem sustentabilidade hídrica. A efetividade das medidas depende da integração entre tecnologia, governança, monitoramento contínuo e participação social, especialmente em regiões de escassez hídrica ou alta vulnerabilidade ambiental.

O ano de 2014 destacou-se como o mais representativo em termos de impacto científico dentro do portfólio analisado. Esse destaque está associado, sobretudo, ao aumento da atenção internacional voltada aos riscos e impactos ambientais da mineração, intensificada após os desastres envolvendo barragens de rejeitos em Minas Gerais, Brasil. Nesse contexto, o trabalho de Kosso et al. (2014), diretamente relacionado à temática de impactos hídricos e gestão de riscos na mineração, consolidou-se como uma das publicações de maior relevância no conjunto analisado.

Do ponto de vista científico, a principal contribuição deste estudo reside na sistematização integrada de um campo de pesquisa fragmentado, conectando impactos ambientais, inovação tecnológica e gestão estratégica em um único arcabouço analítico.

Como limitações, a heterogeneidade metodológica dos estudos analisados e a concentração de publicações em determinadas regiões do mundo são visíveis. Outro ponto refere-se à heterogeneidade dos dados provenientes das três bases selecionadas. Durante o processo de seleção do portfólio, houve a perda de informações específicas de cada base, em função da necessidade de padronização, priorizando-se apenas as variáveis comuns às três fontes de dados. Esse movimento limitou a realização de análises bibliométricas mais avançadas, priorizando o maior alcance possível de literatura.

Como agenda futura de pesquisa, recomenda-se:

- Estudos de longo prazo sobre a eficácia de soluções baseadas na natureza
- Análises econômicas comparativas de tecnologias de tratamento
- Desenvolvimento de métricas padronizadas para desempenho hídrico na mineração
- Maior foco em países em desenvolvimento e em fases pré e pós-operacionais da atividade minerária
- Realizar análise seguindo a mesma proposta para artigos publicados em periódicos nacionais não indexados que não aparecem dentro das BD selecionados neste estudo.

Assim, conclui-se que a sustentabilidade hídrica na mineração depende menos da existência de tecnologias isoladas e mais da capacidade do setor em articular inovação, governança e responsabilidade socioambiental de forma integrada.

Além das contribuições científicas apresentadas, o desenvolvimento deste estudo também agregou valor à formação em Engenharia de Produção, refletido no processo de análise bibliométrica e análise sistemática e crítica da literatura científica além da interpretação de indicadores de desempenho acadêmico. A investigação das estratégias relacionadas à gestão de recursos hídricos na mineração demandou uma abordagem sistêmica, integrando dimensões técnicas, ambientais e estratégicas, competências diretamente alinhadas ao perfil do engenheiro de produção. Ademais, o trabalho fortaleceu a capacidade de análise baseada em dados, tomada de decisão fundamentada em evidências e compreensão de riscos associados a sistemas produtivos complexos, aspectos essenciais para atuação profissional responsável e orientada à sustentabilidade.

Referências bibliográficas

ADLER, R. A.; CLAASSEN, M.; GODFREY, L. K.; TURTON, A. R. Water, mining, and waste: an historical and economic perspective on conflict management in South Africa. *The Economics of Peace and Security Journal*, 2007. DOI: 10.15355/epsj.2.2.33

AITKEN, D.; RIVERA, D.; GODOY-FAÚNDEZ, A.; HOLZAPFEL, E. Water scarcity and the impact of the mining and agricultural sectors in Chile. *Sustainability*, 2016. DOI: 10.3390/su8020128

AKANINWOR, G. I. *et al.* Industrial effluents caused environmental pollution and its potential ecological and human health impacts in Ethiopia: A review. *Chemosphere*, v. 307, 2025. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135593

AMANI, P. *et al.* Assessment of a bio-inspired frothing agent derived from vitamin E in mineral processing. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108974

ARENAS-COLLAO, K.; VALDES-GONZALEZ, H.; REYES-BOZO, L.; SALAZAR, J. L. The Water Management Impacts of Large-Scale Mining Operations: A Social and Environmental Perspective. *Water*, v. 16, n. 12, 2024. DOI: 10.3390/w16121745.

ATAKHANOVA, Z.; MEIRAMBAYEVA, M.; BAIGALIYEVA, M. Mine Water Use in Kazakhstan: Data Issues, Risks, and Regulations. *Sustainability*, v. 16, 2024. DOI: 10.3390/su16062456.

BANKS, D.; ATHRESH, A. P.; AL-HABAIBEH, A.; BURNSIDE, Neil. Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. *Sustainable Water Resources Management*, 2017. DOI: 10.1007/s40899-017-0094-7

BLINOVA, E.; PONOMARENKO, T.; KNYSH, Valentin. Analyzing the concept of corporate sustainability in the context of sustainable business development in the mining sector with elements of circular economy. *Sustainability*, 2022. DOI: 10.3390/su14138163

BRAGG, Kristine M. *et al.* Using bibliometrics to evaluate outcomes and influence of translational biomedical research centers. *Journal of Clinical and Translational Science*, v. 6, p. e72, 2021. DOI: 10.1017/cts.2021.863.

CACCIUTTOLO, C.; VALENZUELA, F. Efficient use of water in tailings management: new technologies and environmental strategies for the future of mining. *Water*, 2022. DOI: 10.3390/w14111741

CANTELLE, Tatiana Dias; LIMA, Eudes de Castro; BORGES, Luís Antônio Coimbra. Panorama dos recursos hídricos no mundo e no Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 1259–1282, 2018. DOI: 10.17765/2176-9168.2018v11n4p1259-1282.

CARMO, F. F. *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2017. DOI: 10.1016/j.pecon.2017.06.002

CEMBRANEL, Adir Silvério *et al.* Impactos de indústria metalomecânica e a qualidade da água subterrânea – estudo de caso. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 4, 2019. DOI: 10.14295/ras.v33i4.29610.

CHAN, S. et al. Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021. DOI: 10.1007/s10653-021-00923-0

CLARIVATE. *Journal Citation Reports*. Clarivate Analytics, [s.d.]. Disponível em: <https://clarivate.com/products/journal-citation-reports/>. Acesso em: 4 fev. 2026.

COBOS, A. G. Z.; GUTIERREZ, J.; CABALLERO, P. Use of Moringa Oleifera as a Natural Coagulant in the Reduction of Water Turbidity in Mining Activities. *Water*, v. 16, 2024. DOI: 10.3390/w16162315.

CORIN, K. C. et al. Evaluation of lactate esters as novel biobased and environmentally friendly flotation frothers within PGM ore processing. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108542

CUEVAS, J.; FAZ, Á.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; BELTRÁ, J.; ACOSTA, J. A. Integrated Assessment of Metal Contamination of Soils, Sediments, and Runoff Water in a Dry Riverbed from a Mining Area Under Torrential Rain Events. *Land*, v. 13, n. 11, 2024. DOI: 10.3390/land13111892.

CUSTODIO, Emilio. Effects of groundwater development on the environment. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11., 2000. *Anais... Águas Subterrâneas*, suplemento, 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23446>. Acesso em: 4 fev. 2026.

DASGUPTA, A. Impact of mining on rural environmental and economy. A case study, Kota district, Rajasthan. *International Journal of Remote Sensing and Geoscience (IJRSG)*, v. 2, p. 21-26, 2012.

DRAMLI, D.; RISTI, V.; ZLATANOVI, D.; IVAZ, J.; DUKANOVI, D. Development of a Conceptual Model for Environmental Monitoring in Underground Coal Mining. *Tehnicki Vjesnik*, 2024. DOI: 10.17559/TV-20240503001516.

ENSSLIN, Leonardo et al. Avaliação de desempenho nas empresas de saneamento básico: construção de um portfólio bibliográfico relevante ao tema. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 4, n. 1, 2015. DOI: 10.5585/geas.v4i1.18772.

FITZSIMONS, E.; WARREN, P. Desalination investment for copper mining: Barriers and opportunities in Chile. *Extractive Industries and Society*, 2024. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101449.

FONGARO, G. et al. Mineral waste containing high levels of iron from an environmental disaster (Bento Rodrigues, Mariana, Brazil) is associated with higher titers of enteric viruses. *Food and Environmental Virology*, v. 11, p. 178-183, 2019. DOI: 10.1007/s12560-019-09373-5.

FRASER, J.; KUNZ, N. C. Water stewardship: attributes of collaborative partnerships between mining companies and communities. *Water*, 2018. DOI: 10.3390/w10081081

GARCIA-ZAVALA, C. et al. An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: the case of Chile. *Extractive Industries and Society*, 2023. DOI: 10.1016/j.exis.2023.101259

GERWIN, W. et al. Perspectives of lignite post-mining landscapes under changing environmental conditions: what can we learn from a comparison between the Rhenish and Lusatian region in Germany? *Environmental Sciences Europe*, 2023. DOI: 10.1186/s12302-023-00738-z

GILGAM, T.; AUSTIN, A.; SKINNER, W.; BEATTIE, D. A.; KRASOWSKA, M.; BLENCOWE, A. Cross-linked β -cyclodextrin polymers for adsorption of flotation frothers for mineral processing water reclamation. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108764.

GILSBACH, L.; SCHUETTE, P.; FRANKEN, G. Water reporting in mining: Are corporates losing sight of stakeholder interests? *Journal of Cleaner Production*, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131016.

GOMES, P.; VALENTE, T. Seasonal impact of acid mine drainage on water quality and potential ecological risk in an old sulfide exploitation. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-32367-1

HADDAWAY, N. R. et al. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social–ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 2019. DOI: 10.1186/s13750-019-0152-8

HAMED, Y. et al. Assessment and Mitigation of Groundwater Contamination from Phosphate Mining in Tunisia: geochemical and radiological analysis. *Hydrology*, v. 11, n. 6, 2024. DOI: 10.3390/hydrology11060084.

HAMRAOUI, L. et al. Towards a circular economy in the mining industry: possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 2024. DOI: 10.3390/min14030319

HASSAN, Muhammad. Identifying and addressing research gaps: a comprehensive guide. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/387770690_Identifying_and_Addressing_Research_Gaps_A_Comprehensive_Guide_Definition_of_Research_Gap. Acesso em: 3 fev. 2026.

HEIKKINEN, A.; NYGREN, A.; CUSTODIO, M. The slow violence of mining and environmental suffering in the Andean waterscapes. *Extractive Industries and Society*, 2023. DOI: 10.1016/j.exis.2023.101254.

HEROLD, Elisa et al. Stable word-clouds for visualising text-changes over time. In: International conference on theory and practice of digital libraries. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 224-237.

HUDSON, T. *Living with Earth: an introduction to environmental geology*. PHI Learning Private Limited, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/388399887_Living_with_Earth_An_Introduction_to_Environmental_Geology. Acesso em: 3 fev. 2026.

IEPURE, G.; POP, A. Treatment of Acid Mine Water from the Breiner-Băiut Area, Romania, Using Iron Scrap. *Water*, v. 17, 2025. DOI: 10.3390/w17020225.

JIMENEZ, G. et al. The Effect of an Anionic Polyacrylamide on the Flotation of Chalcopyrite, Enargite, and Bornite. *Minerals*, v. 14, 2024. DOI: 10.3390/min14070634.

JUNG, M. et al. Understanding the role of water quality in separation of rare earth minerals from iron oxide minerals in a flotation circuit. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108461.

JOHANSSON WESTHOLM, Lena; REPO, Eveliina; SILLANPÄÄ, Mika. Filter materials for metal removal from mine drainage: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014. DOI: 10.1007/s11356-014-2903-y

KASOWSKA, D.; GEDIGA, K.; SPIAK, Z.. Heavy metal and nutrient uptake in plants colonizing post-flotation copper tailings. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017. DOI: 10.1007/s11356-017-0451-y

KLEINMANN, B.; ACKMAN, T. Simultaneous Aeration and Neutralization of Mine Water: An Apparently Forgotten Discovery. *Mine Water and the Environment*, 2024. DOI: 10.1007/s10230-024-00992-4.

KOSSOFF, D. et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 2014. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

KUNYTSKA, M. et al. Digital modelling technologies in the mining industry: Effectiveness and prospects of digitalisation of open-pit mining enterprises. *Visnyk ChDTU*, 2024. DOI: 10.62660/bcstu/1.2024.52.

LACERDA, Rogério Tadeu de Oliveira; ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gestão & Produção*, v. 19, p. 59-78, 2012.

LEIVA GONZÁLEZ, J.; ONEDERRA, I. Environmental management strategies in the copper mining industry in Chile to address water and energy challenges: review. *Mining*, 2022. DOI: 10.3390/mining2020012

LI, S. et al. The recent progress China has made in green mine construction, part I: mining groundwater pollution and sustainable mining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19095673

MARCONI, P.; ARENGO, F.; CLARK, A. The arid Andean plateau waterscapes and the lithium triangle: flamingos as flagships for conservation of high-altitude wetlands under pressure from mining development. *Wetlands Ecology and Management*, 2022. DOI: 10.1007/s11273-022-09872-6

MARIN, Oscar A.; KRASLAWSKI, Andrzej; CISTERNAS, Luis A. Design for sustainability: an integrated pumped hydro reverse osmosis system to supply water and energy for mining operations. *Energy Conversion and Management*, 2024. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119159

MASINDI, V. et al. Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: a review. *Ecological Engineering*, 2022. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106740

MAUS, V. et al. An update on global mining land use. *Scientific Data*, 2022. DOI: 10.1038/s41597-022-01547-4

MEISSNER, S. The impact of metal mining on global water stress and regional carrying capacities: a GIS-based water impact assessment. *Resources*, 2021. DOI: 10.3390/resources10120120

MIERZWA, José Carlos e HESPANHOL, Ivanildo. Água na indústria: uso racional e reúso. São Paulo: Oficina de Textos. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/efdacd50-f74a-49ea-9b16-4e1f725a5403/Mierzwa-2005-agua.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2026.

MOHAPATRA, D. P.; KIRPALANI, D. M. Process effluents and mine tailings: sources, effects and management and role of nanotechnology. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2017. DOI: 10.1007/s41204-016-0011-6.

MORE, K. S. et al. Automated measurement systems in mine water management and mine workings: a review of potential methods. *Water Resources and Industry*, 2020. DOI: 10.1016/j.wri.2020.100136

NORTHEY, S. A. et al. Sustainable water management and improved corporate reporting in mining. *Water Resources and Industry*, 2019. DOI: 10.1016/j.wri.2018.100104

NOWAKOWSKA, M. A comprehensive approach to preprocessing data for bibliometric analysis. *Scientometrics*, v. 130, p. 5191–5225, 2025. DOI: 10.1007/s11192-025-05415-x.

OBENAU-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. *Construction and Building Materials*, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118470

PACHECO, A. D. P. et al. Land Cover Transformations in Mining-Influenced Areas Using PlanetScope Imagery. *Land*, v. 14, 2025. DOI: 10.3390/land14020325.

PASHKEVICH, M. A.; ALEKSEENKO, A. V.; NUREEV, R. R. Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings. *Journal of Mining Institute*, 2023. DOI: 10.31897/PMI.2023.32

PAT-ESPADAS, A. M. et al. Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water*, 2018. DOI: 10.3390/w10111685

PEDROZO-ACUÑA, A. *et al.* Environmental impact of mining activities on water availability, quality and sediments in the Sonora River, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 236, art. 524, 2025. DOI: 10.1007/s11270-025-08150-4.

PEREIRA, Aline Aparecida Silva; COSTA, Danilo Augusto Toledo; BORGES, Luis Antônio Coimbra. Percepção ambiental de pós-graduandos sobre os impactos da mineração. *REMEA - Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*, v. 34, n. 2, p. 238–255, 2017. DOI: 10.14295/remea.v34i2.7079.

PETAVRATZI, E. et al. The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle. *Mineral Economics*, 2022. DOI: 10.1007/s13563-022-00332-4

PIRES, L. F.; BERNARDO, C. H. C.; SATOLO, E. G.; QUEIRÓZ, T. R.; MORALES, A. G. Pegada hídrica no ambiente industrial: uma revisão bibliográfica sistemática de 2011 a 2016. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 11, n. 4, p. 1217–1237, 2018. DOI: 10.17765/2176-9168.2018v11n4p1217-1237

RADFARNIA, H. et al. Accelerated CO₂ mineralization of acid mine drainage assisted by an ultrasound technique: an experimental parametric study. *Energy & Fuels*, 2024. DOI:10.1021/acs.energyfuels.4c03012

RAHM, B. G.; RIHA, S. J. Toward strategic management of shale gas development: regional, collective impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 2012. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.12.004

ROBERTSON, J.; CÔTE, C.; STEVENS, S. Examining reported company commitments to water stewardship: working beyond the mine? *Resources Policy*, 2024. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.105193

SAHOO, P. K. et al. Recovery of metals and other beneficial products from coal fly ash: a sustainable approach for fly ash management. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2016. DOI: 10.1007/s40789-016-0141-2

SANTORO, S. et al. Membrane technology for a sustainable copper mining industry: the Chilean paradigm. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100091

SCHULTZE, M. et al. The future direction of pit lakes: part 1, research needs. *Mine Water and the Environment*, 2022. DOI: 10.1007/s10230-022-00850-1

SHALSI, S. et al. Values-driven water management in coal seam gas industries. *Extractive Industries and Society*, 2024. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101566.

SILVA, Bruno Henrique Ribeiro; SILVA, Raquel Naiara Fernandes. Avaliação de impactos ambientais em áreas de mineração com o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI): estudo de caso para a região de Paracatu (Minas Gerais). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v. 2, n. 3, 2021.

SLOAN, S.; COOK, P. G.; WALLIS, I. Managed Aquifer Recharge in Mining: A Review. *Groundwater*, 2023. DOI: 10.1111/gwat.13311.

SOLIS-MARCIAL, O. J. et al. Clarification of Mining Process Water Using Electrocoagulation. *Minerals*, 2024. DOI: 10.3390/min14040412.

THOMASHAUSEN, S.; MAENNLING, N.; MEBRATU-TSEGAYE, T. A comparative overview of legal frameworks governing water use and wastewater discharge in the mining sector. *Resources Policy*, 2018. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.11.012

TIWARI, A. K. et al. Identification of artificial groundwater recharging zone using a GIS-based fuzzy logic approach: a case study in a coal mine area of the Damodar Valley, India. *Applied Water Science*, 2017. DOI: 10.1007/s13201-017-0603-8

TORO, N. et al. Use of alternative water resources in copper leaching processes in Chilean mining industry: a review. *Metals*, 2022. DOI: 10.3390/met12030445

TRAN, Dung Duc et al. Uncovering the lack of awareness of sand mining impacts on riverbank erosion among Mekong Delta residents: insights from a comprehensive survey. *Scientific Reports*, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-43114-w

VIRGILI, J. C.; VIANNA, A. P. P. Gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas para empreendimentos minerários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11., 2000. *Anais... Águas Subterrâneas*, suplemento, 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24096>. Acesso em: 4 fev. 2026.

WESTHOLM, L. J.; REPO, E.; SILLANPÄÄ, M. Filter materials for metal removal from mine drainage: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014. DOI: 10.1007/s11356-014-2903-y.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME – WWAP. The United Nations world water development report 2016: water and jobs. Paris: UNESCO, 2016. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243938>. Acesso em: 4 fev. 2026.

YIN, Z.; SONG, J.; LIU, D.; WU, J.; YANG, Y.; SUN, Y.; WU, J. Mapping mining-affected water pollution in China: status, patterns, risks, and implications. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 29, p. 3957–3973, 2025

YU, H. et al. Elevating community well-being in mining areas: the proposal of the mining area sustainability index (MASI). *Environmental Sciences Europe*, 2024. DOI: 10.1186/s12302-024-00895-9

APÊNDICE A - ARTIGOS SELECIONADOS

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
1	Design for sustainability: An integrated pumped hydro reverse osmosis system to supply water and energy for mining operations	Alto consumo hídrico e energético, além de elevadas emissões de GEE no Deserto do Atacama.	Implementação de um sistema integrado de hidrelétrica reversa e osmose reversa (IPHRO).	2024
2	A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector	Complexidade e fragmentação dos marcos legais hídricos globais.	Harmonização regulatória e análise comparativa de jurisdições para reduzir riscos.	2018
3	Examining reported company commitments to water stewardship: Working beyond the mine?	Ambiguidade no papel das mineradoras na governança hídrica regional e falhas no reporte.	Transição para uma contribuição regional colaborativa além dos limites da mina.	2024
4	Water quality effects on flotation: Impacts and control of residual xanthates	Acúmulo de xantatos residuais que prejudicam a eficiência da flotação no reuso de água.	Monitoramento por espectrofotometria UV/VIS e controle rigoroso de dosagem.	2018
5	Understanding the role of water quality in separation of rare earth minerals from iron oxide minerals in a flotation circuit	Cátions bivalentes (Ca e Mg) inibindo a flotação de minerais de terras raras.	Otimização da separação baseada na compreensão fundamental da química da água.	2024
6	Evaluation of lactate esters as novel biobased and environmentally friendly flotation frothers within PGM ore processing	Toxicidade e baixa biodegradabilidade de espumantes sintéticos tradicionais (PPG).	Uso de ésteres de lactato como espumantes biobaseados e ecológicos.	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
7	Cross-linked β -cyclodextrin polymers for adsorption of flotation frothers for mineral processing water reclamation	Deterioração da recuperação mineral devido ao acúmulo de espumantes residuais.	Uso de polímeros de ciclodextrina para adsorção seletiva e recuperação hídrica.	2024
8	Environmental Assessment of a Bioinspired Green Frother Derived from Vitamin E for Mineral Flotation	Impacto ambiental e riscos de manuseio de espumantes inflamáveis como o MIBC.	Desenvolvimento de um espumante verde derivado da Vitamina E (TPGS).	2024
9	Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review	Impacto ecotoxicológico persistente da Drenagem Ácida de Mina (DAM).	Adoção da economia circular via beneficiamento integrado e recuperação de metais.	2022
10	Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications	Volume massivo de rejeitos gerando passivos ambientais e ocupação de terras.	Uso de rejeitos como precursores para geopolímeros e materiais de construção in-situ.	2020
11	Water reporting in mining: Are corporates losing sight of stakeholder interests?	Desconexão entre relatórios corporativos e as reais preocupações das partes interessadas.	Alinhamento da divulgação com riscos hídricos locais priorizados pelos stakeholders.	2022
12	Toward strategic management of shale gas development: Regional, collective impacts on water resources	Impactos hídricos cumulativos analisados apenas no nível de projeto individual.	Adoção de avaliações ambientais estratégicas regionais e coletivas.	2012
13	Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context	Falhas estruturais catastróficas e colapso de ecossistemas (Tragédia de Mariana).	Revisão de padrões técnicos e monitoramento rigoroso de estruturas de rejeitos.	2017

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
14	Sustainable water management and improved corporate reporting in mining	Inconsistências nos dados de reporte hídrico global entre diferentes mineradoras.	Criação de uma base de dados global padronizada (Mine Water Database).	2019
15	Automated measurement systems in mine water management and mine workings – A review of potential methods	"Silos de dados" que impedem uma gestão eficiente e integrada da água.	Implementação de IIoT (Internet das Coisas) e sistemas de automação.	2020
16	The slow violence of mining and environmental suffering in the Andean waterscapes	"Violência lenta" da poluição acumulada invisibilizada por décadas nos Andes.	Análise integrada das percepções locais e dados hidroecológicos.	2023
17	An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: The case of Chile	Riscos ESG sobrepostos e difíceis de priorizar em áreas mineradoras.	Aplicação da abordagem ESG-W-RISK para priorização nacional de riscos.	2023
18	Desalination investment for copper mining: Barriers and opportunities in Chile	Incerteza regulatória e falta de aceitação pública para dessalinização.	Gestão via nexo mineração-água-clima e integração de energias renováveis.	2024
19	Values-driven water management in coal seam gas industries	Gestão focada apenas em normas técnicas, ignorando valores sociais.	Uso de um quadro conceitual baseado em múltiplos valores da água.	2024
20	Membrane technology for a sustainable copper mining industry: The Chilean paradigm	Escassez hídrica extrema versus mineração intensiva de cobre no Chile.	Integração de tecnologias de membrana avançadas (MD, RO, RED).	2021
21	Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings	Poluição secundária por poeira e infiltração de rejeitos sulfetados antigos.	Reabilitação de terras em fases e sistemas de restauração biológica.	2023

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
22	Digital modelling technologies in the mining industry: Effectiveness and prospects of digitalisation of open-pit mining enterprises	Necessidade de equilibrar produtividade com a redução de danos ambientais.	Uso de "Gêmeos Digitais" e modelagem integrada para otimização.	2024
23	Strengths and weaknesses of a hybrid post-disaster management approach: the Doce River (Brazil) mine-tailing dam burst	Falhas graves na governança pós-desastre e centralização de poder.	Empoderamento de comitês de bacia e gestão participativa.	2020
24	Managed Aquifer Recharge in Mining: A Review	Descarte ineficiente de excedentes hídricos operacionais e depleção de aquíferos.	Estratégia de Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR).	2023
25	Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation	Riscos geoquímicos severos e falhas catastróficas de barragens.	Gestão interdisciplinar em escala de bacia e remediação sedimentar.	2014
26	Development of a Conceptual Model for Environmental Monitoring in Underground Coal Mining	Falta de monitoramento sistemático em minas de carvão subterrâneas.	Desenvolvimento de um modelo conceitual de monitoramento integrado.	2024
27	Accelerated CO2 Mineralization of Acid Mine Drainage Assisted by an Ultrasound Technique: An Experimental Parametric Study	Acidez extrema da DAM associada a altas emissões industriais de CO2.	Mineralização acelerada de CO2 assistida por técnica de ultrassom.	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
28	Assessment and Mitigation of Groundwater Contamination from Phosphate Mining in Tunisia: Geochemical and Radiological Analysis	Contaminação radiológica e por metais pesados em águas subterrâneas.	Monitoramento geoquímico e radiológico contínuo e mitigação local.	2024
29	The Recent Progress China Has Made in Green Mine Construction, Part I: Mining Groundwater Pollution and Sustainable Mining	Degradação de solos e saúde humana por poluição hídrica minerária.	Construção de "Minas Verdes" e prevenção de poluição na fonte.	2022
30	Clarification of Mining Process Water Using Electrocoagulation	Acúmulo de reagentes químicos e íons persistentes no reuso de água.	Uso de eletrocoagulação para clarificação e remoção de metais.	2024
31	The Effect of an Anionic Polyacrylamide on the Flotation of Chalcopyrite, Enargite, and Bornite	Poliacrilamida residual (PAM) inibindo a flotação de sulfetos de cobre.	Análise de potenciais zeta para mitigar interações inibidoras.	2024
32	Monitoring and Prevention Strategies for Iron and Aluminum Pollutants in Acid Mine Drainage (AMD): Evidence from Xiaomixi Stream in Qinling Mountains	Poluição severa por Fe e Al em rios de montanha e ameaça ao abastecimento.	Estratégias de prevenção baseadas em saturação de fases minerais.	2025
33	Environmental Management Strategies in the Copper Mining Industry in Chile to Address Water and Energy Challenges—Review	Conflito água-energia em regiões áridas de mineração de cobre.	Estratégias de reuso hídrico e eficiência energética integrada.	2022

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
34	Use of Moringa Oleifera as a Natural Coagulant in the Reduction of Water Turbidity in Mining Activities	Alta turbidez e toxicidade residual de coagulantes químicos sintéticos.	Uso de Moringa oleifera como coagulante natural e sustentável.	2024
35	Treatment of Acid Mine Water from the Breiner-Băiut, Area, Romania, Using Iron Scrap	Drenagem ácida crônica de galerias abandonadas sem tratamento.	Uso de sucata de ferro para tratamento via cementação (baixo custo).	2025
36	Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China	Acúmulo de metais na biota e graves riscos à saúde humana.	Uso de organismos aquáticos como biomonitores da eficiência da remediação.	2021
37	The arid Andean plateau waterscapes and the lithium triangle: flamingos as flagships for conservation of high-altitude wetlands under pressure from mining development	Pressão da mineração de lítio sobre áreas úmidas frágeis de alta altitude.	Fortalecimento dos IIAs com abordagem ecossistêmica e conservação de flamingos.	2022
38	Filter materials for metal removal from mine drainage—a review	Custo elevado de sistemas ativos convencionais para remoção de metais.	Uso de materiais filtrantes passivos (orgânicos e inorgânicos).	2014
39	Element content in plant shoots from the copper mine post-flotation tailings and the reference soil	Rejeitos tóxicos e áridos dificultando a revegetação de minas de cobre.	Fitoestabilização com espécies nativas (Agrostis stolonifera).	2018
40	Seasonal impact of acid mine drainage on water quality and potential ecological risk in an old sulfide exploitation	Impacto de secas extremas na qualidade hídrica de minas abandonadas.	Ajuste de escala do índice de risco ecológico para cenários áridos.	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
41	The future direction of pit lakes: part 1, Research needs	Riscos e incertezas no fechamento e estabilidade de lagos de cava.	Pesquisa focada na transformação de lagos em ativos ecológicos.	2022
42	Simultaneous Aeration and Neutralization of Mine Water: An Apparently Forgotten Discovery	Ineficiência hídrica e alto custo no tratamento de DAM em larga escala.	Reintrodução do sistema In-Line Aeration (ILS) para tratamento barato.	2024
43	Mekong Delta pays a high price from sand mining	Erosão severa de margens de rios causada pela mineração de areia.	Políticas de conscientização e regulação da estabilidade das margens.	2023
44	Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile	Competição hídrica acirrada entre mineração e agricultura no Chile.	Quantificação do WSI e estratégias conjuntas de redução de consumo.	2016
45	Analyzing the Concept of Corporate Sustainability in the Context of Sustainable Business Development in the Mining Sector with Elements of Circular Economy	Teoria de sustentabilidade corporativa genérica sem foco no setor mineral.	Integração de modelos de negócios circulares e indicadores ESG setoriais.	2022
46	Mine Water Use in Kazakhstan: Data Issues, Risks, and Regulations	Escassez de dados públicos e falhas regulatórias no Cazaquistão.	Fortalecimento institucional e aplicação do framework do ICMM.	2024
47	Water Stewardship: Attributes of Collaborative Partnerships between Mining Companies and Communities	Conflitos hídricos persistentes por falta de confiança e liderança clara.	Parcerias colaborativas baseadas em confiança e Water Stewardship.	2018

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
48	Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment	Contaminação contínua de rios por DAM em locais remotos e abandonados.	Remediação passiva via Banhados Construídos (wetlands).	2018
49	Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining	Perdas hídricas massivas em barragens de rejeitos convencionais.	Tecnologias de desaguamento avançado (filtrados e em pasta).	2022
50	The Water Management Impacts of Large-Scale Mining Operations: A Social and Environmental Perspective	Percepção social negativa e falta de transparência no uso da água.	Abordagem de Water Stewardship holística e transparência radical.	2024
51	Land Cover Transformations in Mining-Influenced Areas Using PlanetScope Imagery, Spectral Indices, and Machine Learning: A Case Study in the Hinterlands de Pernambuco, Brazil	Transformação acelerada da terra e perda de biodiversidade em áreas mineiras.	Monitoramento via PlanetScope e Machine Learning (kNN).	2025
52	Recovery of metals and other beneficial products from coal fly ash: a sustainable approach	Passivo ambiental crescente das cinzas de carvão (fly ash) descartadas.	Recuperação sustentável de metais críticos e elementos de terras raras.	2016
53	Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom	Entupimento e barreiras legais em sistemas de calor geotérmico mineiro.	Avaliação de estratégias de ciclo aberto vs. ciclo fechado.	2017

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
54	Process effluents and mine tailings: sources, effects and management and role of nanotechnology	Impactos permanentes de rejeitos na acessibilidade hídrica local.	Uso de nanotecnologia (ZVI, TiO ₂) para remediação eficiente.	2017
55	An update on global mining land use	Lacuna de dados geoespaciais sobre o uso real da terra pela mineração.	Criação de um conjunto de dados global de polígonos de mineração.	2022
56	Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social–ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map	Extrema sensibilidade socioecológica do Ártico aos impactos da mineração.	Criação de um mapa sistemático de evidências para guiar mitigações.	2022
57	The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle	Desafios ESG ocultos que ameaçam o suprimento sustentável de lítio.	Fortalecimento institucional e integração da biodiversidade nos IIAs.	2022
58	Perspectives of lignite post-mining landscapes under changing environmental conditions: what can we learn from a comparison between the Rhenish and Lusatian region in Germany?	Ecossistemas danificados e perda crônica de serviços ecossistêmicos.	Reorientação de paisagens focada no bem-estar social e restauração.	2023
59	Elevating community well-being in mining areas: the proposal of the mining area sustainability index (MASI)	Falta de métricas centradas na comunidade para avaliar sustentabilidade.	Proposta do Mining Area Sustainability Index (MASI).	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
60	Identification of artificial groundwater recharging zone using a GIS-based fuzzy logic approach: a case study in a coal mine area of the Damodar Valley, India	Depleção severa dos níveis hídricos subterrâneos devido à mineração.	Identificação de zonas de recarga artificial via GIS e lógica fuzzy.	2017
61	Guidance for the Integrated Use of Hydrological, Geochemical, and Isotopic Tools in Mining Operations	Dificuldade na caracterização das interações mina-ambiente.	Uso integrado de ferramentas hidrológicas, geoquímicas e isotópicas.	2020
62	Integrated Assessment of Metal Contamination of Soils, Sediments, and Runoff Water in a Dry Riverbed from a Mining Area Under Torrential Rain Events	Contaminação por metais em leitos secos ativada por chuvas torrenciais.	Avaliação integrada de solo, sedimento e águas de escoamento.	2024
63	Towards a Circular Economy in the Mining Industry: Possible Solutions for Water Recovery through Advanced Mineral Tailings Dewatering	TSFs atuando como sumidouros ineficientes de água e riscos de ruptura.	Uso de tecnologias de desaguamento avançado e reciclagem hídrica.	2024
64	The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities—A GIS-Based Water Impact Assessment	Impacto da mineração no estresse hídrico e capacidades de carga.	Avaliação de impacto baseada em GIS em escala global e regional.	2021

(Conclusão)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
65	Biosurfactants: An Overview of Their Properties, Production, and Application in Mineral Flotation	Alto impacto ambiental de reagentes sintéticos tóxicos na flotação.	Uso de biossurfactantes biodegradáveis e de baixa toxicidade.	2024
66	Use of Alternative Water Resources in Copper Leaching Processes in Chilean Mining Industry—A Review	Custo proibitivo de transporte e energia da água dessalinizada.	Uso direto de água do mar e águas residuais na lixiviação.	2022
67	Water, mining, waste: South Africa	Conflito histórico entre mineração, lucratividade e gestão de resíduos.	Governança proativa e coordenação interdepartamental econômica.	2007

Fonte: Autores (2026).

“O conteúdo expresso no trabalho é de inteira responsabilidade do(s) autor(es)”.

oi observado uma grande presença de palavras chaves que remetem aos temas relacionados a contaminação de águas, recuperação e remoção de metais, escassez hídrica e drenagem ácida de mina, confirmando aquilo que foi descrito nos temas discutidos (Figura 6).

das ações implementadas. Embora os relatórios tenham apresentado avanços ao longo do tempo, a literatura aponta limitações quanto aos detalhes de aspectos críticos relacionados ao descarte de resíduos e à colaboração com comunidades locais (GILSBACH, SCHUTTE & FRANKEN, 2022; NORTHEY et al., 2023; ROBERTSON, CÔTE & STEVENS, 2019).

No que se refere à avaliação de riscos, os estudos evidenciaram a predominância de operações minerárias situadas em contextos de elevado risco hídrico e social, especialmente em regiões áridas ou semiáridas. Análises aplicadas ao Chile e ao chamado “Triângulo do Lítio” revelaram que a fragmentação da governança, a escassez de dados sobre o ciclo da água e o baixo envolvimento comunitário contribuem para o surgimento de conflitos socioambientais, reforçando a necessidade de estratégias integradas de mitigação e de maior participação social (GARCIA-ZAVALA et al., 2023; PETAVRATZI et al., 2022).

Adicionalmente, a literatura reforça a compreensão de que abordagens puramente técnicas são insuficientes para a gestão sustentável da água na mineração. Foi identificado um padrão de valorização de modelos de governança baseados em valores sociais, nos quais a desconsideração de dimensões culturais e sociais tende a intensificar conflitos locais e impactos sobre sistemas socioecológicos, especialmente em contextos envolvendo comunidades tradicionais e indígenas (SHALSI et al., 2024; HADDAWAY et al., 2019).

Quanto ao arcabouço regulatório, os estudos apontaram um aumento progressivo das dificuldades na obtenção de licenças de uso da água, sobretudo em cenários de escassez hídrica e poluição. Análises comparativas de diferentes países indicaram que regulações frágeis, associadas ao crescimento do consumo hídrico pela mineração, ampliam os riscos territoriais, destacando o papel central das instituições públicas no fortalecimento dos mecanismos de controle e fiscalização (THOMASHAUSEN, MAENNLING & MEBRATU-TSEGAYE, 2018; ATAKHANOVA, MEIRAMBAYEVA & BAIGALIYEVA, 2024).

Por fim, a literatura associa práticas eficazes de gestão ESG à construção de valor de longo prazo, baseada na confiança entre empresas, comunidades e demais partes interessadas. Estudos empíricos indicaram que a falta de transparência e de envolvimento comunitário compromete a percepção social da mineração, mesmo em contextos de investimentos tecnológicos em eficiência hídrica, enquanto

iniciativas colaborativas e instrumentos de avaliação centrados na comunidade tendem a reduzir assimetrias de poder e fortalecer a legitimidade das operações minerárias (ARENAS-COLLAO et al., 2024; FRASER & KUNZ, 2018; PARK et al., 2023; YU et al., 2024; BLINOVA, PONOMARENKO & KNYSH, 2022).

3.10.2 Economia Circular e valorização de Resíduos

Os estudos analisados indicaram uma tendência consistente de transição dos passivos ambientais da mineração para potenciais ativos, alinhada aos princípios da economia circular. Observou-se que soluções tecnológicas voltadas à gestão de rejeitos, especialmente aquelas associadas à secagem avançada como destacado por Hamroui et al., (2024), desempenham papel central na recuperação de água e na redução de riscos ambientais, configurando-se como estratégias relevantes para a sustentabilidade da atividade mineradora.

Existe também um grande destaque a Drenagem Ácida de Mina (DAM) que constitui uma das principais ameaças aos recursos hídricos em áreas minerárias, porém relatam que a mesma pode ser mitigada por meio de abordagens integradas de tratamento. Mansindi et al., (2022) reforça que tais abordagens possibilitam simultaneamente a recuperação de minerais de valor econômico e de água com qualidade adequada, reforçando a aplicabilidade prática da economia circular no setor mineral.

Observou-se a valorização de resíduos específicos como uma estratégia recorrente na literatura. Estudos indicaram o potencial de recuperação de metais e outros produtos a partir de cinzas volantes provenientes da mineração de carvão, bem como o uso de rejeitos como precursores para materiais ativados por álcalis, oferecendo alternativas seguras de aplicação em operações de preenchimento de minas. Adicionalmente, a reciclagem de rejeitos sulfetados tem sido apontada como uma solução para a extração de matérias-primas minerais e mitigação de danos ambientais (SAHOO et al., 2016; OBENAU-EMLER, FALAH & ILIKAINEN, 2020; PASHKEVICH et al., 2023).

Técnicas inovadoras sobre tratamento de águas residuais da mineração são altamente discutidas, com destaque para a predominância do uso de tecnologias de membranas, como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. Estudos de caso demonstraram que a integração de tecnologias convencionais e emergentes de membranas contribui significativamente para a recuperação de água

e o tratamento de efluentes minerários, especialmente em contextos de escassez hídrica. Adicionalmente, a literatura destaca o papel crescente da nanotecnologia na gestão de efluentes e rejeitos, ampliando a eficiência na remoção de contaminantes e na recuperação de metais (SANTORO et al., 2021; MOHAPATRA & KIRPALANI, 2017).

3.10.3 Inovações tecnológicas

As inovações tecnológicas aplicadas à mineração têm se concentrado no desenvolvimento de soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos e efluentes, alinhadas aos princípios da economia circular. Observou-se a emergência de tecnologias capazes de integrar simultaneamente a mitigação de impactos ambientais e a recuperação de valor, como a mineralização acelerada de CO₂ assistida por ultrassom, que permite a remoção de metais da Drenagem Ácida de Mina (DAM) concomitantemente ao sequestro de carbono, e o uso de sucata de ferro como adsorvente de baixo custo para metais potencialmente tóxicos (RADFARNIA et al., 2024; IEPURE & POP, 2025). Métodos eletroquímicos destacados por Solis-Marcial et al., (2024), como a eletrocoagulação, também foram identificados como alternativas promissoras para a remoção de contaminantes persistentes, embora ainda apresentem limitações quanto à escala de aplicação, permanecendo majoritariamente restritos ao ambiente laboratorial.

É observado uma tendência consistente na substituição de reagentes sintéticos por alternativas de menor impacto ambiental nos processos de beneficiamento mineral. Estudos evidenciaram o potencial de espumantes e coagulantes de origem biológica, como ésteres de lactato, compostos derivados da vitamina E, extratos de *Moringa oleifera* e biossurfactantes, os quais apresentaram desempenho técnico compatível ou levemente inferior com reagentes convencionais, associado a ganhos ambientais relevantes. Adicionalmente, tecnologias voltadas à recuperação e reciclagem de reagentes, como polímeros de ciclodextrina reticulada para a absorção de espumantes de flotação, foram apontadas como estratégias eficazes para a redução do consumo de insumos e da geração de efluentes (CORIN et al., 2023; AMANI et al., 2024; COBOS, GUTIÉRREZ & CABALLERO, 2024; SIMÕES et al., 2024; GLIAM et al., 2024).

Um pequeno destaque é dado em relação à qualidade da água nos processos de beneficiamento mineral, especialmente na flotação. Observou-se que a reciclagem de água sem estratégias adequadas de monitoramento pode intensificar o consumo de reagentes e comprometer a eficiência da recuperação mineral. Estudos demonstraram que a presença de íons como cálcio e magnésio, comuns em águas salobras, afeta negativamente a separação de minerais, bem como que interações entre polímeros e minerais sulfetados podem alterar de forma significativa o desempenho do processo (MUZINDA & SCHREITHOFER, 2018; JUNG et al., 2023; JIMENEZ et al., 2024).

Quando observado em uma esfera para além das inovações de processos de produção e tratamento de resíduos, alguns autores como More et al. (2020), Kunytska et al. (2024) e Li et al. (2024) destacam que a digitalização e a automação vêm assumindo papel estratégico na gestão hídrica da mineração. Sistemas de monitoramento automatizado, conceitos como a “Internet da Água de Mina” (IoMW), o uso de modelagem digital e gêmeos digitais, bem como iniciativas voltadas à implantação de “minas verdes”, têm sido associados à otimização do uso da água, à prevenção da poluição de aquíferos e à melhoria do desempenho ambiental das operações minerárias

3.10.4 Escassez Hídrica e Estratégias de Abastecimento Alternativo

Diversos textos analisados indicaram que a escassez hídrica constitui um dos principais condicionantes para a viabilidade e a sustentabilidade das atividades minerárias, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Observou-se como em Meissner (2021) a recorrência do uso de ferramentas de análise espacial para avaliar os impactos da mineração sobre o estresse hídrico, evidenciando a contribuição do setor para a intensificação da pressão sobre recursos hídricos regionais e globais.

Em ambientes de escassez hídrica os autores citam técnicas como dessalinização e do uso de recursos hídricos alternativos, como a água do mar, como estratégias centrais em contextos de elevado estresse hídrico, com destaque para o Chile e o Peru. Estudos indicaram resultados promissores na aplicação dessas soluções na mineração de minerais sulfurados, bem como na redução da dependência de fontes de água doce. Paralelamente, foram identificadas estratégias

voltadas à maximização da recuperação de água na gestão de rejeitos, por meio do uso de tecnologias convencionais, espessadas, em pasta e filtradas, ampliando a eficiência hídrica dos processos (FITZSIMONS & WARREN, 2024; TORO et al., 2022; CACCIUTTOLO & VALENZUELA, 2022).

Como comentado anteriormente, há um destaque para regiões sensíveis como o Triângulo do Lítio, Marconi, Arengo e Clark (2022) observam que o balanço hídrico negativo associado à mineração pode gerar impactos relevantes sobre ecossistemas frágeis, especialmente áreas úmidas de altitude, reforçando a necessidade de avaliações integradas dos efeitos cumulativos da atividade mineradora

Adicionalmente, os estudos evidenciaram a crescente integração entre os sistemas de água e energia como estratégia para enfrentar restrições hídricas. Propostas como a associação entre armazenamento hidrelétrico bombeado e osmose reversa, bem como abordagens integradas de gestão ambiental na mineração de cobre, foram apontadas como soluções capazes de mitigar simultaneamente os desafios relacionados à água e à energia (MARÍN et al., 2024; LEIVA GONZÁLEZ & ONEDERRA, 2022).

Os autores também destacam que a escassez hídrica associada à mineração não pode ser dissociada de outros grandes usuários de água, como a agricultura. Estudos demonstraram que estratégias conjuntas de redução de consumo são essenciais para mitigar conflitos pelo uso da água. Nesse contexto, foram identificadas abordagens complementares, como a Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR) e o uso de ferramentas de SIG associadas à lógica fuzzy, como alternativas eficazes para aumentar a disponibilidade de água subterrânea e promover a conservação de aquíferos em regiões minerárias (AIKEN et al., 2016; SLOAN et al., 2023; TIWARI et al., 2017).

3.10.5 Gestão de Legados Mineiros e Impactos de Longo Prazo

Os resíduos gerados pelo beneficiamento mineral constituem fontes persistentes de risco ambiental quando não adequadamente geridos, com destaque para barragens de rejeitos como estruturas críticas no contexto dos legados mineiros. A literatura evidenciou padrões recorrentes de falhas estruturais, limitações de governança e impactos ambientais de grande magnitude associados a esses empreendimentos, incluindo danos extensivos a corpos hídricos e territórios

adjacentes, como observado em estudos de casos no Brasil e na África do Sul (KOSSOFF et al., 2014; CARMO et al., 2017; LIMA et al., 2020; ADLER et al., 2007).

Os impactos decorrentes dos legados mineiros frequentemente se manifestam de forma gradual e cumulativa, o que autores como Heikkinen, Nygren & Custodio (2023) nomeiam como *slow violence*. Estudos empíricos demonstraram que a contaminação progressiva de solos, águas superficiais e subterrâneas, bem como a bioacumulação de metais em organismos aquáticos, tende a ocorrer de maneira pouco perceptível pelas comunidades afetadas, ampliando os riscos à saúde humana e aos sistemas socioecológicos ao longo do tempo (HEIKKINEN, NYGREN & CUSTODIO, 2023; HAMED et al., 2024; CHAN et al., 2021).

A literatura também converge para a importância da caracterização, monitoramento e avaliação contínua dos legados mineiros como elementos centrais da gestão de longo prazo. Foi observada a crescente aplicação de ferramentas de sensoriamento remoto, análise espacial e aprendizado de máquina para mapear transformações na cobertura da terra, quantificar áreas impactadas e apoiar processos decisórios em escala regional e global. Adicionalmente, abordagens integradas que combinam métodos hidrológicos, geoquímicos e isotópicos foram apontadas como essenciais para compreender a dinâmica da água de mina e os fluxos de contaminantes em diferentes contextos minerários (MAUS et al., 2022; PACHECO et al., 2025; WOLKERSDORFER et al., 2020; DRAMLIC et al., 2024).

De maneira complementar, os estudos indicaram uma ampliação do debate sobre a aplicação de princípios da economia circular em contextos pós-fechamento de mina. Observou-se o potencial de transformação de passivos históricos em ativos, como no aproveitamento de lagos de cava, no uso de águas de minas abandonadas para fins energéticos e na reconfiguração de paisagens minerárias sob cenários ambientais em mudança. Esses trabalhos ressaltam, contudo, a necessidade de avaliações de longo prazo quanto aos impactos ecológicos e sociais associados a essas soluções (SCHULTZE et al., 2022; BANKS et al., 2017; GERWIN et al., 2023).

No que se refere às estratégias de mitigação e remediação, a literatura evidenciou um conjunto diversificado de abordagens para o tratamento da Drenagem Ácida de Mina (DAM) e da contaminação por metais. Foram identificadas soluções que abrangem desde materiais filtrantes, fitorremediação e sistemas

passivos baseados em zonas úmidas construídas, até técnicas de monitoramento sazonal, prevenção de poluentes específicos e processos físico-químicos de neutralização e aeração. Essas estratégias têm sido especialmente destacadas pela sua aplicabilidade em minas abandonadas e em contextos de gestão de legados de longa duração (WESTHOLM et al., 2014; KASOWSKA, GEDIGA & SPIAK, 2017; GOMES & VALENTE, 2024; CUEVAS et al., 2024; WANG et al., 2025; KLEINMANN & ACKMAN, 2024; PAT-ESPADAS, 2018).

Apesar dos avanços técnicos e metodológicos, a literatura aponta lacunas relacionadas à integração entre governança, monitoramento de longo prazo e participação social na gestão de legados mineiros. Nesse sentido, os achados desta revisão subsidiam a formulação de questões de pesquisa voltadas ao aprofundamento de estratégias preventivas, adaptativas e socialmente inclusivas para o gerenciamento dos impactos persistentes da mineração.

3.11 Direcionamentos de Pesquisa

Ao reconhecer o estado da arte sobre o assunto, algumas perguntas referentes a cada um dos temas discutidos pelos autores foram elaboradas, a fim de se orientar futuras agendas de pesquisa:

- Governança, ESG e pressões regulamentares

Pergunta: Como as empresas podem promover mais ações com as comunidades locais e integrar de fatos todos os princípios ESG em suas ações?

- Economia Circular e Valorização de Resíduos

Pergunta: Quais são os principais gargalos técnicos e econômicos para a transição do modelo de descarte de rejeitos para a valorização de minerais críticos sob a ótica da economia circular na mineração?

- Inovações tecnológicas

Pergunta: Como a aplicação de reagentes biobaseados (biossurfactantes e espumantes verdes) dentre outras tecnologias mencionadas, podem a longo prazo otimizar a recuperação mineral e, simultaneamente, reduzir a toxicidade e persistência de contaminantes no reúso hídrico em diferentes empreendimentos de grande porte (diferentes tipos de minas)?

- Escassez Hídrica e Estratégias de Abastecimento Alternativo

Pergunta: De que forma a integração de estratégias alternativas de abastecimento podem ajudar a reduzir o estresse hídrico nas regiões de escassez e quais as consequências econômicas e técnicas para as empresas?

- Gestão de Legados Mineiros e Impactos de Longo Prazo

Pergunta: Qual é a eficácia de longo prazo das Soluções Baseadas na Natureza (SBN) na remediação de drenagem ácida após o fechamento da mina, considerando cenários de mudanças climáticas extremas?"

1 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão estruturada da literatura, a relação entre mineração e recursos hídricos, com ênfase nos impactos ambientais, tecnologias de tratamento e estratégias de gestão. A aplicação do método ProKnow-C possibilitou a consolidação de um portfólio representativo e a identificação de padrões, tendências e lacunas científicas no campo.

Os resultados evidenciam que a gestão hídrica na mineração evoluiu de uma abordagem predominantemente operacional para uma perspectiva estratégica, integrando tecnologias de tratamento, princípios de economia circular e práticas de governança alinhadas aos critérios ESG. Observou-se que a literatura recente enfatiza a redução da captação de água doce, o reúso industrial, a dessalinização e o desenvolvimento de reagentes menos tóxicos, indicando uma transição para modelos produtivos mais sustentáveis.

Contudo, os achados também revelam que soluções tecnológicas isoladas não garantem sustentabilidade hídrica. A efetividade das medidas depende da integração entre tecnologia, governança, monitoramento contínuo e participação social, especialmente em regiões de escassez hídrica ou alta vulnerabilidade ambiental.

O ano de 2014 destacou-se como o mais representativo em termos de impacto científico dentro do portfólio analisado. Esse destaque está associado, sobretudo, ao aumento da atenção internacional voltada aos riscos e impactos ambientais da mineração, intensificada após os desastres envolvendo barragens de rejeitos em Minas Gerais, Brasil. Nesse contexto, o trabalho de Kosso et al. (2014), diretamente relacionado à temática de impactos hídricos e gestão de riscos na mineração, consolidou-se como uma das publicações de maior relevância no conjunto analisado

Do ponto de vista científico, a principal contribuição deste estudo reside na sistematização integrada de um campo de pesquisa fragmentado, conectando impactos ambientais, inovação tecnológica e gestão estratégica em um único arcabouço analítico.

Como limitações, a heterogeneidade metodológica dos estudos analisados e a concentração de publicações em determinadas regiões do mundo são visíveis. Outro ponto refere-se à heterogeneidade dos dados provenientes das três bases selecionadas. Durante o processo de seleção do portfólio, houve a perda de informações específicas de cada base, em função da necessidade de padronização, priorizando-se apenas as variáveis comuns às três fontes de dados. Esse movimento limitou a realização de análises bibliométricas mais avançadas, priorizando o maior alcance possível de literatura.

Como agenda futura de pesquisa, recomenda-se:

- Estudos de longo prazo sobre a eficácia de soluções baseadas na natureza
- Análises econômicas comparativas de tecnologias de tratamento
- Desenvolvimento de métricas padronizadas para desempenho hídrico na mineração
- Maior foco em países em desenvolvimento e em fases pré e pós-operacionais da atividade minerária
- Realizar análise seguindo a mesma proposta para artigos publicados em periódicos nacionais não indexados que não aparecem dentro das BD selecionados neste estudo.

Assim, conclui-se que a sustentabilidade hídrica na mineração depende menos da existência de tecnologias isoladas e mais da capacidade do setor em articular inovação, governança e responsabilidade socioambiental de forma integrada.

Além das contribuições científicas apresentadas, o desenvolvimento deste estudo também agregou valor à formação em Engenharia de Produção, refletido no processo de análise bibliométrica e análise sistemática e crítica da literatura científica além da interpretação de indicadores de desempenho acadêmico. A investigação das estratégias relacionadas à gestão de recursos hídricos na mineração demandou uma abordagem sistêmica, integrando dimensões técnicas, ambientais e estratégicas, competências diretamente alinhadas ao perfil do

engenheiro de produção. Ademais, o trabalho fortaleceu a capacidade de análise baseada em dados, tomada de decisão fundamentada em evidências e compreensão de riscos associados a sistemas produtivos complexos, aspectos essenciais para atuação profissional responsável e orientada à sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R. A.; CLAASSEN, M.; GODFREY, L. K.; TURTON, A. R. Water, mining, and waste: an historical and economic perspective on conflict management in South Africa. *The Economics of Peace and Security Journal*, 2007. DOI: 10.15355/epsj.2.2.33

AITKEN, D.; RIVERA, D.; GODOY-FAÚNDEZ, A.; HOLZAPFEL, E. Water scarcity and the impact of the mining and agricultural sectors in Chile. *Sustainability*, 2016. DOI: 10.3390/su8020128

AKANINWOR, G. I. *et al.* Industrial effluents caused environmental pollution and its potential ecological and human health impacts in Ethiopia: A review. *Chemosphere*, v. 307, 2025. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135593

AMANI, P. *et al.* Assessment of a bio-inspired frothing agent derived from vitamin E in mineral processing. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108974

ARENAS-COLLAO, K.; VALDES-GONZALEZ, H.; REYES-BOZO, L.; SALAZAR, J. L. The Water Management Impacts of Large-Scale Mining Operations: A Social and Environmental Perspective. *Water*, v. 16, n. 12, 2024. DOI: 10.3390/w16121745.

ATAKHANOVA, Z.; MEIRAMBAYEVA, M.; BAIGALIYEVA, M. Mine Water Use in Kazakhstan: Data Issues, Risks, and Regulations. *Sustainability*, v. 16, 2024. DOI: 10.3390/su16062456.

BANKS, D.; ATHRESH, A. P.; AL-HABAIBEH, A.; BURNSIDE, Neil. Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. *Sustainable Water Resources Management*, 2017. DOI: 10.1007/s40899-017-0094-7

BLINOVA, E.; PONOMARENKO, T.; KNYSH, Valentin. Analyzing the concept of corporate sustainability in the context of sustainable business development in the mining sector with elements of circular economy. *Sustainability*, 2022. DOI: 10.3390/su14138163

BRAGG, Kristine M. *et al.* Using bibliometrics to evaluate outcomes and influence of translational biomedical research centers. *Journal of Clinical and Translational Science*, v. 6, p. e72, 2021. DOI: 10.1017/cts.2021.863.

CACCIUTTOLO, C.; VALENZUELA, F. Efficient use of water in tailings management: new technologies and environmental strategies for the future of mining. *Water*, 2022. DOI: 10.3390/w14111741

CANTELLE, Tatiana Dias; LIMA, Eudes de Castro; BORGES, Luís Antônio Coimbra. Panorama dos recursos hídricos no mundo e no Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 1259–1282, 2018. DOI: 10.17765/2176-9168.2018v11n4p1259-1282.

CARMO, F. F. et al. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2017. DOI: 10.1016/j.pecon.2017.06.002

CEMBRANEL, Adir Silvério et al. Impactos de indústria metalomecânica e a qualidade da água subterrânea – estudo de caso. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 4, 2019. DOI: 10.14295/ras.v33i4.29610.

CHAN, S. et al. Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021. DOI: 10.1007/s10653-021-00923-0

CLARIVATE. *Journal Citation Reports*. Clarivate Analytics, [s.d.]. Disponível em: <https://clarivate.com/products/journal-citation-reports/>. Acesso em: 4 fev. 2026.

COBOS, A. G. Z.; GUTIERREZ, J.; CABALLERO, P. Use of Moringa Oleífera as a Natural Coagulant in the Reduction of Water Turbidity in Mining Activities. *Water*, v. 16, 2024. DOI: 10.3390/w16162315.

CORIN, K. C. et al. Evaluation of lactate esters as novel biobased and environmentally friendly flotation frothers within PGM ore processing. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108542

CUEVAS, J.; FAZ, Á.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; BELTRÁ, J.; ACOSTA, J. A. Integrated Assessment of Metal Contamination of Soils, Sediments, and Runoff Water in a Dry Riverbed from a Mining Area Under Torrential Rain Events. *Land*, v. 13, n. 11, 2024. DOI: 10.3390/land13111892.

CUSTODIO, Emilio. Effects of groundwater development on the environment. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11., 2000. *Anais... Águas Subterrâneas*, suplemento, 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23446>. Acesso em: 4 fev. 2026.

DASGUPTA, A. Impact of mining on rural environmental and economy. A case study, Kota district, Rajasthan. *International Journal of Remote Sensing and Geoscience (IJRSG)*, v. 2, p. 21-26, 2012.

DRAMLI, D.; RISTI, V.; ZLATANOVI, D.; IVAZ, J.; DUKANOVI, D. Development of a Conceptual Model for Environmental Monitoring in Underground Coal Mining. *Tehnicki Vjesnik*, 2024. DOI: 10.17559/TV-20240503001516.

ENSSLIN, Leonardo et al. Avaliação de desempenho nas empresas de saneamento básico: construção de um portfólio bibliográfico relevante ao tema. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 4, n. 1, 2015. DOI: 10.5585/geas.v4i1.18772.

FITZSIMONS, E.; WARREN, P. Desalination investment for copper mining: Barriers and opportunities in Chile. *Extractive Industries and Society*, 2024. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101449.

FONGARO, G. et al. Mineral waste containing high levels of iron from an environmental disaster (Bento Rodrigues, Mariana, Brazil) is associated with higher titers of enteric viruses. *Food and Environmental Virology*, v. 11, p. 178 183, 2019. DOI: 10.1007/s12560-019-09373-5.

FRASER, J.; KUNZ, N. C. Water stewardship: attributes of collaborative partnerships between mining companies and communities. *Water*, 2018. DOI: 10.3390/w10081081

GARCIA-ZAVALA, C. et al. An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: the case of Chile. *Extractive Industries and Society*, 2023. DOI: 10.1016/j.exis.2023.101259

GERWIN, W. et al. Perspectives of lignite post-mining landscapes under changing environmental conditions: what can we learn from a comparison between the Rhenish and Lusatian region in Germany? *Environmental Sciences Europe*, 2023. DOI: 10.1186/s12302-023-00738-z

GILGAM, T.; AUSTIN, A.; SKINNER, W.; BEATTIE, D. A.; KRASOWSKA, M.; BLENCOWE, A. Cross-linked β -cyclodextrin polymers for adsorption of flotation frothers for mineral processing water reclamation. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108764.

GILSBACH, L.; SCHUETTE, P.; FRANKEN, G. Water reporting in mining: Are corporates losing sight of stakeholder interests? *Journal of Cleaner Production*, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131016.

GOMES, P.; VALENTE, T. Seasonal impact of acid mine drainage on water quality and potential ecological risk in an old sulfide exploitation. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-32367-1

HADDAWAY, N. R. et al. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social–ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 2019. DOI: 10.1186/s13750-019-0152-8

HAMED, Y. et al. Assessment and Mitigation of Groundwater Contamination from Phosphate Mining in Tunisia: geochemical and radiological analysis. *Hydrology*, v. 11, n. 6, 2024. DOI: 10.3390/hydrology11060084.

HAMRAOUI, L. et al. Towards a circular economy in the mining industry: possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 2024. DOI: 10.3390/min14030319

HASSAN, Muhammad. Identifying and addressing research gaps: a comprehensive guide. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/387770690_Identifying_and_Addressing_Research_Gaps_A_Comprehensive_Guide_Definition_of_Research_Gap. Acesso em: 3 fev. 2026.

HEIKKINEN, A.; NYGREN, A.; CUSTODIO, M. The slow violence of mining and environmental suffering in the Andean waterscapes. *Extractive Industries and Society*, 2023. DOI: 10.1016/j.exis.2023.101254.

HEROLD, Elisa et al. Stable word-clouds for visualising text-changes over time. In: International conference on theory and practice of digital libraries. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 224-237.

HUDSON, T. *Living with Earth: an introduction to environmental geology*. PHI Learning Private Limited, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/388399887_Living_with_Earth_An_Introduction_to_Environmental_Geology. Acesso em: 3 fev. 2026.

IEPURE, G.; POP, A. Treatment of Acid Mine Water from the Breiner-Băiut Area, Romania, Using Iron Scrap. *Water*, v. 17, 2025. DOI: 10.3390/w17020225.

JIMENEZ, G. et al. The Effect of an Anionic Polyacrylamide on the Flotation of Chalcopyrite, Enargite, and Bornite. *Minerals*, v. 14, 2024. DOI: 10.3390/min14070634.

JUNG, M. et al. Understanding the role of water quality in separation of rare earth minerals from iron oxide minerals in a flotation circuit. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108461.

JOHANSSON WESTHOLM, Lena; REPO, Eveliina; SILLANPÄÄ, Mika. Filter materials for metal removal from mine drainage: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014. DOI: 10.1007/s11356-014-2903-y

KASOWSKA, D.; GEDIGA, K.; SPIAK, Z.. Heavy metal and nutrient uptake in plants colonizing post-flotation copper tailings. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017. DOI: 10.1007/s11356-017-0451-y

KLEINMANN, B.; ACKMAN, T. Simultaneous Aeration and Neutralization of Mine Water: An Apparently Forgotten Discovery. *Mine Water and the Environment*, 2024. DOI: 10.1007/s10230-024-00992-4.

KOSSOFF, D. et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 2014. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

KUNYTSKA, M. et al. Digital modelling technologies in the mining industry: Effectiveness and prospects of digitalisation of open-pit mining enterprises. *Visnyk ChDTU*, 2024. DOI: 10.62660/bcstu/1.2024.52.

LACERDA, Rogério Tadeu de Oliveira; ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gestão & Produção*, v. 19, p. 59-78, 2012.

LEIVA GONZÁLEZ, J.; ONEDERRA, I. Environmental management strategies in the copper mining industry in Chile to address water and energy challenges: review. *Mining*, 2022. DOI: 10.3390/mining2020012

LI, S. et al. The recent progress China has made in green mine construction, part I: mining groundwater pollution and sustainable mining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19095673

MARCONI, P.; ARENGO, F.; CLARK, A. The arid Andean plateau waterscapes and the lithium triangle: flamingos as flagships for conservation of high-altitude wetlands under pressure from mining development. *Wetlands Ecology and Management*, 2022. DOI: 10.1007/s11273-022-09872-6

MARIN, Oscar A.; KRASLAWSKI, Andrzej; CISTERNAS, Luis A. Design for sustainability: an integrated pumped hydro reverse osmosis system to supply water and energy for mining operations. *Energy Conversion and Management*, 2024. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119159

MASINDI, V. et al. Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: a review. *Ecological Engineering*, 2022. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106740

MAUS, V. et al. An update on global mining land use. *Scientific Data*, 2022. DOI: 10.1038/s41597-022-01547-4

MEISSNER, S. The impact of metal mining on global water stress and regional carrying capacities: a GIS-based water impact assessment. *Resources*, 2021. DOI: 10.3390/resources10120120

MIERZWA, José Carlos e HESPANHOL, Ivanildo. Água na indústria: uso racional e reúso. São Paulo: Oficina de Textos. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/efdacd50-f74a-49ea-9b16-4e1f725a5403/Mierzwa-2005-agua.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2026.

MOHAPATRA, D. P.; KIRPALANI, D. M. Process effluents and mine tailings: sources, effects and management and role of nanotechnology. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2017. DOI: 10.1007/s41204-016-0011-6.

MORE, K. S. et al. Automated measurement systems in mine water management and mine workings: a review of potential methods. *Water Resources and Industry*, 2020. DOI: 10.1016/j.wri.2020.100136

NORTHEY, S. A. et al. Sustainable water management and improved corporate reporting in mining. *Water Resources and Industry*, 2019. DOI: 10.1016/j.wri.2018.100104

NOWAKOWSKA, M. A comprehensive approach to preprocessing data for bibliometric analysis. *Scientometrics*, v. 130, p. 5191–5225, 2025. DOI: 10.1007/s11192-025-05415-x.

OBENAU-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. *Construction and Building Materials*, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118470

PACHECO, A. D. P. et al. Land Cover Transformations in Mining-Influenced Areas Using PlanetScope Imagery. *Land*, v. 14, 2025. DOI: 10.3390/land14020325.

PASHKEVICH, M. A.; ALEKSEENKO, A. V.; NUREEV, R. R. Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings. *Journal of Mining Institute*, 2023. DOI: 10.31897/PMI.2023.32

PAT-ESPADAS, A. M. et al. Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water*, 2018. DOI: 10.3390/w10111685

PEDROZO-ACUÑA, A. et al. Environmental impact of mining activities on water availability, quality and sediments in the Sonora River, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 236, art. 524, 2025. DOI: 10.1007/s11270-025-08150-4.

PEREIRA, Aline Aparecida Silva; COSTA, Danilo Augusto Toledo; BORGES, Luis Antônio Coimbra. Percepção ambiental de pós-graduandos sobre os impactos da mineração. *REMEA - Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*, v. 34, n. 2, p. 238–255, 2017. DOI: 10.14295/remea.v34i2.7079.

PETAVRATZI, E. et al. The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle. *Mineral Economics*, 2022. DOI: 10.1007/s13563-022-00332-4

PIRES, L. F.; BERNARDO, C. H. C.; SATOLO, E. G.; QUEIRÓZ, T. R.; MORALES, A. G. Pegada hídrica no ambiente industrial: uma revisão bibliográfica sistemática de 2011 a 2016. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 11, n. 4, p. 1217–1237, 2018. DOI: 10.17765/2176-9168.2018v11n4p1217-1237

RADFARNIA, H. et al. Accelerated CO₂ mineralization of acid mine drainage assisted by an ultrasound technique: an experimental parametric study. *Energy & Fuels*, 2024. DOI:10.1021/acs.energyfuels.4c03012

RAHM, B. G.; RIHA, S. J. Toward strategic management of shale gas development: regional, collective impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 2012. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.12.004

ROBERTSON, J.; CÔTE, C.; STEVENS, S. Examining reported company commitments to water stewardship: working beyond the mine? *Resources Policy*, 2024. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.105193

SAHOO, P. K. et al. Recovery of metals and other beneficial products from coal fly ash: a sustainable approach for fly ash management. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2016. DOI: 10.1007/s40789-016-0141-2

SANTORO, S. et al. Membrane technology for a sustainable copper mining industry: the Chilean paradigm. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100091

SCHULTZE, M. et al. The future direction of pit lakes: part 1, research needs. *Mine Water and the Environment*, 2022. DOI: 10.1007/s10230-022-00850-1

SHALSI, S. et al. Values-driven water management in coal seam gas industries. *Extractive Industries and Society*, 2024. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101566.

SILVA, Bruno Henrique Ribeiro; SILVA, Raquel Naiara Fernandes. Avaliação de impactos ambientais em áreas de mineração com o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI): estudo de caso para a região de Paracatu (Minas Gerais). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v. 2, n. 3, 2021.

SLOAN, S.; COOK, P. G.; WALLIS, I. Managed Aquifer Recharge in Mining: A Review. *Groundwater*, 2023. DOI: 10.1111/gwat.13311.

SOLIS-MARCIAL, O. J. et al. Clarification of Mining Process Water Using Electrocoagulation. *Minerals*, 2024. DOI: 10.3390/min14040412.

THOMASHAUSEN, S.; MAENNLING, N.; MEBRATU-TSEGAYE, T. A comparative overview of legal frameworks governing water use and wastewater discharge in the mining sector. *Resources Policy*, 2018. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.11.012

TIWARI, A. K. et al. Identification of artificial groundwater recharging zone using a GIS-based fuzzy logic approach: a case study in a coal mine area of the Damodar Valley, India. *Applied Water Science*, 2017. DOI: 10.1007/s13201-017-0603-8

TORO, N. et al. Use of alternative water resources in copper leaching processes in Chilean mining industry: a review. *Metals*, 2022. DOI: 10.3390/met12030445

TRAN, Dung Duc et al. Uncovering the lack of awareness of sand mining impacts on riverbank erosion among Mekong Delta residents: insights from a comprehensive survey. *Scientific Reports*, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-43114-w

VIRGILI, J. C.; VIANNA, A. P. P. Gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas para empreendimentos minerários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11., 2000. *Anais... Águas Subterrâneas*, suplemento, 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24096>. Acesso em: 4 fev. 2026.

WESTHOLM, L. J.; REPO, E.; SILLANPÄÄ, M. Filter materials for metal removal from mine drainage: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014. DOI: 10.1007/s11356-014-2903-y.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME – WWAP. The United Nations world water development report 2016: water and jobs. Paris: UNESCO, 2016. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243938>. Acesso em: 4 fev. 2026.

YIN, Z.; SONG, J.; LIU, D.; WU, J.; YANG, Y.; SUN, Y.; WU, J. Mapping mining-affected water pollution in China: status, patterns, risks, and implications. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 29, p. 3957–3973, 2025

YU, H. et al. Elevating community well-being in mining areas: the proposal of the mining area sustainability index (MASI). *Environmental Sciences Europe*, 2024. DOI: 10.1186/s12302-024-00895-9

APÊNDICE A - ARTIGOS SELECIONADOS**(Continua)**

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
1	Design for sustainability: An integrated pumped hydro reverse osmosis system to supply water and energy for mining operations	Alto consumo hídrico e energético, além de elevadas emissões de GEE no Deserto do Atacama.	Implementação de um sistema integrado de hidrelétrica reversa e osmose reversa (IPHRO).	2024
2	A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector	Complexidade e fragmentação dos marcos legais hídricos globais.	Harmonização regulatória e análise comparativa de jurisdições para reduzir riscos.	2018
3	Examining reported company commitments to water stewardship: Working beyond the mine?	Ambiguidade no papel das mineradoras na governança hídrica regional e falhas no reporte.	Transição para uma contribuição regional colaborativa além dos limites da mina.	2024
4	Water quality effects on flotation: Impacts and control of residual xanthates	Acúmulo de xantatos residuais que prejudicam a eficiência da flotação no reuso de água.	Monitoramento por espectrofotometria UV/VIS e controle rigoroso de dosagem.	2018
5	Understanding the role of water quality in separation of rare earth minerals from iron oxide minerals in a flotation circuit	Cátions bivalentes (Ca e Mg) inibindo a flotação de minerais de terras raras.	Otimização da separação baseada na compreensão fundamental da química da água.	2024
6	Evaluation of lactate esters as novel biobased and environmentally friendly flotation frothers within PGM ore processing	Toxicidade e baixa biodegradabilidade de espumantes sintéticos tradicionais (PPG).	Uso de ésteres de lactato como espumantes biobaseados e ecológicos.	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
7	Cross-linked β -cyclodextrin polymers for adsorption of flotation frothers for mineral processing water reclamation	Deterioração da recuperação mineral devido ao acúmulo de espumantes residuais.	Uso de polímeros de ciclodextrina para adsorção seletiva e recuperação hídrica.	2024
8	Environmental Assessment of a Bioinspired Green Frother Derived from Vitamin E for Mineral Flotation	Impacto ambiental e riscos de manuseio de espumantes inflamáveis como o MIBC.	Desenvolvimento de um espumante verde derivado da Vitamina E (TPGS).	2024
9	Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review	Impacto ecotoxicológico persistente da Drenagem Ácida de Mina (DAM).	Adoção da economia circular via beneficiamento integrado e recuperação de metais.	2022
10	Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications	Volume massivo de rejeitos gerando passivos ambientais e ocupação de terras.	Uso de rejeitos como precursores para geopolímeros e materiais de construção in-situ.	2020
11	Water reporting in mining: Are corporates losing sight of stakeholder interests?	Desconexão entre relatórios corporativos e as reais preocupações das partes interessadas.	Alinhamento da divulgação com riscos hídricos locais priorizados pelos stakeholders.	2022
12	Toward strategic management of shale gas development: Regional, collective impacts on water resources	Impactos hídricos cumulativos analisados apenas no nível de projeto individual.	Adoção de avaliações ambientais estratégicas regionais e coletivas.	2012
13	Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context	Falhas estruturais catastróficas e colapso de ecossistemas (Tragédia de Mariana).	Revisão de padrões técnicos e monitoramento rigoroso de estruturas de rejeitos.	2017

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
14	Sustainable water management and improved corporate reporting in mining	Inconsistências nos dados de reporte hídrico global entre diferentes mineradoras.	Criação de uma base de dados global padronizada (Mine Water Database).	2019
15	Automated measurement systems in mine water management and mine workings – A review of potential methods	"Silos de dados" que impedem uma gestão eficiente e integrada da água.	Implementação de IIoT (Internet das Coisas) e sistemas de automação.	2020
16	The slow violence of mining and environmental suffering in the Andean waterscapes	"Violência lenta" da poluição acumulada invisibilizada por décadas nos Andes.	Análise integrada das percepções locais e dados hidroecológicos.	2023
17	An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: The case of Chile	Riscos ESG sobrepostos e difíceis de priorizar em áreas mineradoras.	Aplicação da abordagem ESG-W-RISK para priorização nacional de riscos.	2023
18	Desalination investment for copper mining: Barriers and opportunities in Chile	Incerteza regulatória e falta de aceitação pública para dessalinização.	Gestão via nexos mineração-água-clima e integração de energias renováveis.	2024
19	Values-driven water management in coal seam gas industries	Gestão focada apenas em normas técnicas, ignorando valores sociais.	Uso de um quadro conceitual baseado em múltiplos valores da água.	2024
20	Membrane technology for a sustainable copper mining industry: The Chilean paradigm	Escassez hídrica extrema versus mineração intensiva de cobre no Chile.	Integração de tecnologias de membrana avançadas (MD, RO, RED).	2021
21	Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings	Poluição secundária por poeira e infiltração de rejeitos sulfetados antigos.	Reabilitação de terras em fases e sistemas de restauração biológica.	2023

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
22	Digital modelling technologies in the mining industry: Effectiveness and prospects of digitalisation of open-pit mining enterprises	Necessidade de equilibrar produtividade com a redução de danos ambientais.	Uso de "Gêmeos Digitais" e modelagem integrada para otimização.	2024
23	Strengths and weaknesses of a hybrid post-disaster management approach: the Doce River (Brazil) mine-tailing dam burst	Falhas graves na governança pós-desastre e centralização de poder.	Empoderamento de comitês de bacia e gestão participativa.	2020
24	Managed Aquifer Recharge in Mining: A Review	Descarte ineficiente de excedentes hídricos operacionais e depleção de aquíferos.	Estratégia de Recarga Gerenciada de Aquíferos (MAR).	2023
25	Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation	Riscos geoquímicos severos e falhas catastróficas de barragens.	Gestão interdisciplinar em escala de bacia e remediação sedimentar.	2014
26	Development of a Conceptual Model for Environmental Monitoring in Underground Coal Mining	Falta de monitoramento sistemático em minas de carvão subterrâneas.	Desenvolvimento de um modelo conceitual de monitoramento integrado.	2024
27	Accelerated CO2 Mineralization of Acid Mine Drainage Assisted by an Ultrasound Technique: An Experimental Parametric Study	Acidez extrema da DAM associada a altas emissões industriais de CO2.	Mineralização acelerada de CO2 assistida por técnica de ultrassom.	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
28	Assessment and Mitigation of Groundwater Contamination from Phosphate Mining in Tunisia: Geochemical and Radiological Analysis	Contaminação radiológica e por metais pesados em águas subterrâneas.	Monitoramento geoquímico e radiológico contínuo e mitigação local.	2024
29	The Recent Progress China Has Made in Green Mine Construction, Part I: Mining Groundwater Pollution and Sustainable Mining	Degradação de solos e saúde humana por poluição hídrica minerária.	Construção de "Minas Verdes" e prevenção de poluição na fonte.	2022
30	Clarification of Mining Process Water Using Electrocoagulation	Acúmulo de reagentes químicos e íons persistentes no reuso de água.	Uso de eletrocoagulação para clarificação e remoção de metais.	2024
31	The Effect of an Anionic Polyacrylamide on the Flotation of Chalcopyrite, Enargite, and Bornite	Poliacrilamida residual (PAM) inibindo a flotação de sulfetos de cobre.	Análise de potenciais zeta para mitigar interações inibidoras.	2024
32	Monitoring and Prevention Strategies for Iron and Aluminum Pollutants in Acid Mine Drainage (AMD): Evidence from Xiaomixi Stream in Qinling Mountains	Poluição severa por Fe e Al em rios de montanha e ameaça ao abastecimento.	Estratégias de prevenção baseadas em saturação de fases minerais.	2025
33	Environmental Management Strategies in the Copper Mining Industry in Chile to Address Water and Energy Challenges—Review	Conflito água-energia em regiões áridas de mineração de cobre.	Estratégias de reuso hídrico e eficiência energética integrada.	2022

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
34	Use of Moringa Oleifera as a Natural Coagulant in the Reduction of Water Turbidity in Mining Activities	Alta turbidez e toxicidade residual de coagulantes químicos sintéticos.	Uso de Moringa oleifera como coagulante natural e sustentável.	2024
35	Treatment of Acid Mine Water from the Breiner-Băiut, Area, Romania, Using Iron Scrap	Drenagem ácida crônica de galerias abandonadas sem tratamento.	Uso de sucata de ferro para tratamento via cementação (baixo custo).	2025
36	Metal accumulations in aquatic organisms and health risks in an acid mine-affected site in South China	Acúmulo de metais na biota e graves riscos à saúde humana.	Uso de organismos aquáticos como biomonitores da eficiência da remediação.	2021
37	The arid Andean plateau waterscapes and the lithium triangle: flamingos as flagships for conservation of high-altitude wetlands under pressure from mining development	Pressão da mineração de lítio sobre áreas úmidas frágeis de alta altitude.	Fortalecimento dos IIAs com abordagem ecossistêmica e conservação de flamingos.	2022
38	Filter materials for metal removal from mine drainage—a review	Custo elevado de sistemas ativos convencionais para remoção de metais.	Uso de materiais filtrantes passivos (orgânicos e inorgânicos).	2014
39	Element content in plant shoots from the copper mine post-flotation tailings and the reference soil	Rejeitos tóxicos e áridos dificultando a revegetação de minas de cobre.	Fitoestabilização com espécies nativas (Agrostis stolonifera).	2018
40	Seasonal impact of acid mine drainage on water quality and potential ecological risk in an old sulfide exploitation	Impacto de secas extremas na qualidade hídrica de minas abandonadas.	Ajuste de escala do índice de risco ecológico para cenários áridos.	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
41	The future direction of pit lakes: part 1, Research needs	Riscos e incertezas no fechamento e estabilidade de lagos de cava.	Pesquisa focada na transformação de lagos em ativos ecológicos.	2022
42	Simultaneous Aeration and Neutralization of Mine Water: An Apparently Forgotten Discovery	Ineficiência hídrica e alto custo no tratamento de DAM em larga escala.	Reintrodução do sistema In-Line Aeration (ILS) para tratamento barato.	2024
43	Mekong Delta pays a high price from sand mining	Erosão severa de margens de rios causada pela mineração de areia.	Políticas de conscientização e regulação da estabilidade das margens.	2023
44	Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile	Competição hídrica acirrada entre mineração e agricultura no Chile.	Quantificação do WSI e estratégias conjuntas de redução de consumo.	2016
45	Analyzing the Concept of Corporate Sustainability in the Context of Sustainable Business Development in the Mining Sector with Elements of Circular Economy	Teoria de sustentabilidade corporativa genérica sem foco no setor mineral.	Integração de modelos de negócios circulares e indicadores ESG setoriais.	2022
46	Mine Water Use in Kazakhstan: Data Issues, Risks, and Regulations	Escassez de dados públicos e falhas regulatórias no Cazaquistão.	Fortalecimento institucional e aplicação do framework do ICMM.	2024
47	Water Stewardship: Attributes of Collaborative Partnerships between Mining Companies and Communities	Conflitos hídricos persistentes por falta de confiança e liderança clara.	Parcerias colaborativas baseadas em confiança e Water Stewardship.	2018

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
48	Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment	Contaminação contínua de rios por DAM em locais remotos e abandonados.	Remediação passiva via Banhados Construídos (wetlands).	2018
49	Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining	Perdas hídricas massivas em barragens de rejeitos convencionais.	Tecnologias de desaguamento avançado (filtrados e em pasta).	2022
50	The Water Management Impacts of Large-Scale Mining Operations: A Social and Environmental Perspective	Percepção social negativa e falta de transparência no uso da água.	Abordagem de Water Stewardship holística e transparência radical.	2024
51	Land Cover Transformations in Mining-Influenced Areas Using PlanetScope Imagery, Spectral Indices, and Machine Learning: A Case Study in the Hinterlands de Pernambuco, Brazil	Transformação acelerada da terra e perda de biodiversidade em áreas mineiras.	Monitoramento via PlanetScope e Machine Learning (kNN).	2025
52	Recovery of metals and other beneficial products from coal fly ash: a sustainable approach	Passivo ambiental crescente das cinzas de carvão (fly ash) descartadas.	Recuperação sustentável de metais críticos e elementos de terras raras.	2016
53	Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom	Entupimento e barreiras legais em sistemas de calor geotérmico mineiro.	Avaliação de estratégias de ciclo aberto vs. ciclo fechado.	2017

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
54	Process effluents and mine tailings: sources, effects and management and role of nanotechnology	Impactos permanentes de rejeitos na acessibilidade hídrica local.	Uso de nanotecnologia (ZVI, TiO ₂) para remediação eficiente.	2017
55	An update on global mining land use	Lacuna de dados geoespaciais sobre o uso real da terra pela mineração.	Criação de um conjunto de dados global de polígonos de mineração.	2022
56	Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social–ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map	Extrema sensibilidade socioecológica do Ártico aos impactos da mineração.	Criação de um mapa sistemático de evidências para guiar mitigações.	2022
57	The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle	Desafios ESG ocultos que ameaçam o suprimento sustentável de lítio.	Fortalecimento institucional e integração da biodiversidade nos IIAs.	2022
58	Perspectives of lignite post-mining landscapes under changing environmental conditions: what can we learn from a comparison between the Rhenish and Lusatian region in Germany?	Ecossistemas danificados e perda crônica de serviços ecossistêmicos.	Reorientação de paisagens focada no bem-estar social e restauração.	2023
59	Elevating community well-being in mining areas: the proposal of the mining area sustainability index (MASI)	Falta de métricas centradas na comunidade para avaliar sustentabilidade.	Proposta do Mining Area Sustainability Index (MASI).	2024

(Continua)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
60	Identification of artificial groundwater recharging zone using a GIS-based fuzzy logic approach: a case study in a coal mine area of the Damodar Valley, India	Depleção severa dos níveis hídricos subterrâneos devido à mineração.	Identificação de zonas de recarga artificial via GIS e lógica fuzzy.	2017
61	Guidance for the Integrated Use of Hydrological, Geochemical, and Isotopic Tools in Mining Operations	Dificuldade na caracterização das interações mina-ambiente.	Uso integrado de ferramentas hidrológicas, geoquímicas e isotópicas.	2020
62	Integrated Assessment of Metal Contamination of Soils, Sediments, and Runoff Water in a Dry Riverbed from a Mining Area Under Torrential Rain Events	Contaminação por metais em leitos secos ativada por chuvas torrenciais.	Avaliação integrada de solo, sedimento e águas de escoamento.	2024
63	Towards a Circular Economy in the Mining Industry: Possible Solutions for Water Recovery through Advanced Mineral Tailings Dewatering	TSFs atuando como sumidouros ineficientes de água e riscos de ruptura.	Uso de tecnologias de desaguamento avançado e reciclagem hídrica.	2024
64	The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities—A GIS-Based Water Impact Assessment	Impacto da mineração no estresse hídrico e capacidades de carga.	Avaliação de impacto baseada em GIS em escala global e regional.	2021

(Conclusão)

Nº	Nome Completo do Artigo	Problema	Solução	Ano
65	Biosurfactants: An Overview of Their Properties, Production, and Application in Mineral Flotation	Alto impacto ambiental de reagentes sintéticos tóxicos na flotação.	Uso de biossurfactantes biodegradáveis e de baixa toxicidade.	2024
66	Use of Alternative Water Resources in Copper Leaching Processes in Chilean Mining Industry—A Review	Custo proibitivo de transporte e energia da água dessalinizada.	Uso direto de água do mar e águas residuais na lixiviação.	2022
67	Water, mining, waste: South Africa	Conflito histórico entre mineração, lucratividade e gestão de resíduos.	Governança proativa e coordenação interdepartamental econômica.	2007

Fonte: Autores (2026).

“O conteúdo expresso no trabalho é de inteira responsabilidade do(s) autor(es)”.