

791 - TRATAMENTO DE EFLUENTES DE MINERAÇÃO COM WETLANDS CONSTRUÍDOS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Isabela da Silva Pedro Rochinha⁽¹⁾

Engenheira Agrícola e Ambiental (UFF), mestre em Engenharia de Biosistemas (UFF). Doutora em Engenharia Ambiental (UFOP).

Paula Cristine Silva Gomes⁽²⁾

Bacharela em Biologia (2017), mestre em Ecologia de Biomas Tropicais (2019). Doutoranda em Engenharia Ambiental (UFOP).

Francine Carvalho Gontijo⁽³⁾

Engenheira Química (UFSJ). Mestranda em Engenharia Ambiental (UFOP).

Marllus Henrique Ribeiro de Paiva⁽⁴⁾

Engenheiro Agrícola e Ambiental (UFF), mestre em Engenharia de Biosistemas (UFF). Doutor em Engenharia Ambiental (UFOP).

Aníbal da Fonseca Santiago⁽⁵⁾

Engenheiro Ambiental (UFV), mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento (USP), doutor em Engenharia Civil (UFV). Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil (UFOP).

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário, Morro do Cruzeiro - Ouro Preto – Minas Gerais - 35400-000 – Brasil – Tel: +55(21)98733-8891 email: isabela.rochinha@aluno.ufop.edu.br

RESUMO

A mineração, embora seja um setor essencial para a economia global, gera impactos ambientais, especialmente em relação a contaminação da água por elementos potencialmente tóxicos. O uso de *wetlands* construídos surge como uma solução sustentável para o tratamento dos efluentes desse setor. O presente estudo realizou uma análise bibliométrica da produção científica sobre o tema, utilizando o método ProKnow-C para selecionar e avaliar artigos publicados nas bases de dados. Foram identificados 55 artigos relevantes, analisados quanto a autoria, distribuição geográfica, análise temporal, palavras-chave e periódicos. Os resultados indicam um crescimento significativo nas pesquisas sobre o tema, com destaque para publicações no Reino Unido e nos Estados Unidos. A análise das palavras-chave revelou três principais frentes de pesquisa: (i) remoção de metais específicos, (ii) uso de processos biológicos, como fitorremediação, e (iii) influência de parâmetros operacionais. O periódico mais relevante foi o *Ecological Engineering*. Conclui-se com esse estudo que *wetlands* construídos representam uma abordagem eficaz e ecologicamente viável para mitigar os impactos da mineração na qualidade da água. Contudo, ainda há lacunas na literatura, especialmente sobre a aplicação dessa tecnologia em diferentes condições climáticas e geográficas, apontando para a necessidade de novas pesquisas na área.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminação Hídrica, Elementos Potencialmente Tóxicos, Sustentabilidade, Bioremediação.

INTRODUÇÃO

A atividade minerária é economicamente relevante para diversos países, gerando renda e emprego. De acordo com o International Council on Mining & Metals o Brasil ocupa a sexta posição do ranking global, com um valor de produção de minerais metálicos e carvão de 38,3 bilhões de dólares em 2020 (ICMM, 2022). No Brasil, a mineração desempenha um papel basilar na economia, assim como em outros países, gerando empregos e desenvolvimento econômico (Pejon, Rodrigues e Zuquete, 2013).

Entretanto, a mineração apresenta sérios riscos aos ecossistemas, afetando a atmosfera, o solo e a água. Ela provoca problemas para a água relacionados a acidificação e contaminação por elementos potencialmente tóxicos (Bai et al., 2022). Uma abordagem promissora, para o tratamento dessas águas residuárias, são as tecnologias baseadas na natureza, que oferecem soluções sustentáveis e econômicas para o tratamento de águas residuárias da mineração (Serra et al., 2022). Estas tecnologias utilizam processos que ocorrem na natureza para remover poluentes, contribuindo para a sustentabilidade (Coimbra e Borges, 2023).

Uma dessas tecnologias são os wetlands construídos que podem ser aplicados ao tratamento de diversos tipos de águas residuárias, incluindo as do setor minerário (Craggs et al., 2014; Ji et al., 2020; Vymazal, 2007). Esses sistemas imitam processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em wetlands naturais para tratar águas residuárias, podendo ter diferentes tipologias, com ou sem material suporte, servindo como material filtrante, e vegetados (Ji et al., 2020; Vymazal, 2007). Essa tecnologia é capaz de remover elementos potencialmente tóxicos, que estão presentes em águas dessa natureza (Coimbra e Borges, 2023).

Embora o uso de wetlands construídos no tratamento de efluentes tenha se expandido nos últimos anos, há ainda muitas questões a serem investigadas. Assim, uma análise abrangente da produção científica sobre o tema é fundamental para consolidar o conhecimento existente, identificar lacunas e orientar futuras pesquisas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo central examinar o estado atual da produção científica sobre o uso de wetlands construídos para o tratamento de efluentes de mineração, um tema de relevância crescente em virtude dos desafios ambientais associados a este setor industrial. A pesquisa visa proporcionar uma visão abrangente do desenvolvimento e das tendências acadêmicas nessa área, identificando abordagens recorrentes, inovações, e potenciais lacunas no conhecimento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir esses fins objetivos específicos abrangeram (i) identificação dos autores mais influentes, (ii) distribuição geográfica dos estudos, (iii) evolução temporal das publicações, (iv) palavras-chave predominantes, e (v) periódicos mais relevantes, com o intuito de elucidar o panorama atual e fornecer subsídios para futuras pesquisas.

METODOLOGIA UTILIZADA

SELEÇÃO DOS ARTIGOS PELO MÉTODO PROKNOW-C

Para conduzir a pesquisa, este estudo utilizou o método ProKnow-C - Knowledge Development Process Constructivist (Ensslin et al., 2010). A escolha deste método se deu por ele fornece processos estruturados para realização da revisão, além de ser uma ferramenta que permite a construção de um portfólio robusto e consistente por muitos pesquisadores (Costa et al., 2021; Rebello et al., 2021).

A busca foi realizada em quatro bases de dados: Springer Link, Web of Science, Scopus e Wiley. Como filtro, selecionaram-se apenas artigos que contivessem as strings "Constructed Wetland*" OU "Artificial Wetland*" E "Mining" OU "Mine" OU "Mine Spoil" E "Effluent*" OU "Wastewater*", com os termos de pesquisa rastreados no "título, resumo e palavra-chave" ou "tópico" das publicações. Quanto ao período, não foi estipulado um ano inicial, visando sempre recuperar o ano da primeira documentação disponível, enquanto que como limite final, foi estabelecido o ano de 2024. A língua de publicação também não foi restringida, buscando-se maximizar o retorno de artigos. As demais configurações permaneceram padrão.

A pesquisa foi realizada em 22 de outubro de 2024, resultando em 41 artigos na base Springer Link, 213 artigos na Web of Science, 93 na Scopus e 350 na Wiley, totalizando um banco inicial de 697 artigos. Com esses artigos, iniciou-se o primeiro processo de filtragem (Figura 1) utilizando a ferramenta Rayyan para revisões sistemáticas

(Ouzzani et al., 2016). O critério inicial foi a remoção de artigos duplicados, uma etapa necessária devido à pesquisa em múltiplas bases de dados, o que poderia resultar em duplicidades. Ao todo, 69 artigos duplicados foram eliminados. Em seguida, artigos de revisão também foram excluídos, pois, embora a busca estivesse configurada para artigos originais, alguns artigos de revisão foram recuperados. Essa exclusão resultou na remoção de mais 35 artigos. Após essa etapa inicial de seleção, 104 artigos foram eliminados, restando 593 para a avaliação, formando o banco de dados brutos.

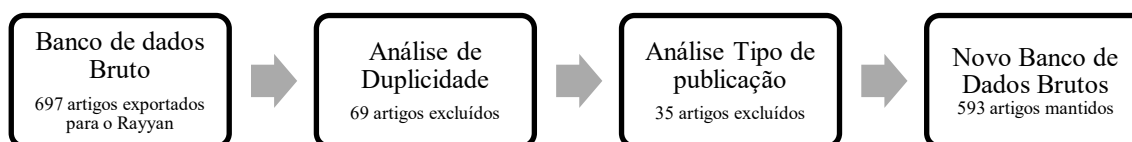


Figura 1: Processo inicial de filtragem dos artigos exportados (banco de dados bruto).

Em seguida, aplicaram-se novos critérios de seleção para refinar o banco de dados e garantir que os artigos estejam alinhados com o tema de tratamento de águas residuárias de mineração com wetlands construídos. Dos 593 artigos remanescentes, foi realizada uma triagem inicial pelo título, identificando os trabalhos relevantes e excluindo aqueles que não atendiam ao escopo da pesquisa. Com essa seleção, 78 artigos foram retidos para avaliação detalhada.

Na fase seguinte, buscou-se o número de citações de cada artigo por meio do Google Acadêmico, a fim de padronizar a contagem de citações entre as quatro bases de dados consultadas. Após identificar o número de citações, aplicou-se o princípio de Pareto, (1897) como critério para reconhecimento científico dos artigos. Dessa forma, dos 78 artigos, 48 correspondem a 80% do total de citações e foram classificados como cientificamente reconhecidos, enquanto os 30 restantes, representando 20% das citações, não obtiveram esse reconhecimento (Figura 2).

Uma segunda análise considerou o ano de publicação, uma vez que o critério de Pareto pode excluir artigos recentes (2 anos anteriores, para o caso deste artigo, de 2023 e 2024) que ainda não tiveram tempo de serem amplamente citados, mas que podem ser relevantes. Com essa abordagem, 11 novos artigos foram incluídos (Figura 2).

Por último, um critério de repescagem pelo banco de autores foi realizado. Nessa etapa, foram separados os autores identificados nos artigos escolhidos pelo princípio de Pareto (1897). A partir deles, foram, então, selecionados os artigos que não foram identificados por nenhum dos métodos anteriores e buscou-se pelos autores formados nesse banco de autores identificados nos artigos dos escolhidos pelo princípio de Pareto (1897). Com essa seleção, mais 19 artigos foram identificados (Figura 2).

Por fim, realizou-se uma triagem adicional com base nos autores dos artigos previamente selecionados pelo princípio de Pareto. Criou-se um banco de dados com esses os autores que foram selecionados pelo princípio. Foram, então, examinados os trabalhos remanescentes com base neste banco de autores. Com essa verificação, outros 19 artigos foram adicionados ao conjunto final (Figura 2).

Após essa última seleção, o banco de dados consolidado incluiu 48 artigos com reconhecimento científico, 11 artigos recentes e 19 artigos adicionais de autores reconhecidos. Todos esses artigos selecionados nessas três etapas anteriores, passaram então por uma avaliação do resumo, com leitura e análise do resumo para verificar se realmente estavam alinhados ao escopo da pesquisa. Ao final, a seleção resultou em um total de 55 artigos sobre o tratamento de efluentes de mineração por wetlands construídos, atendendo aos critérios definidos nesta pesquisa (Figura 2).

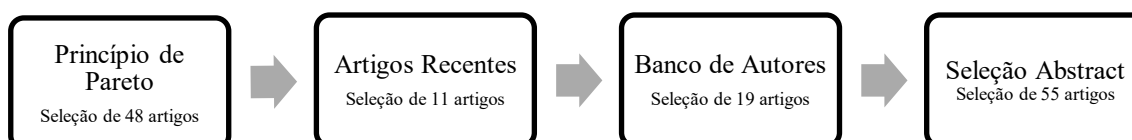


Figura 2: Segunda etapa de filtragem dos artigos exportados pelo método ProKnow-C.

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Com o banco de dados selecionado, foi realizada uma análise bibliométrica utilizando o software VOSviewer (v. 1.6.20). Esse software permitiu a análise dos artigos com foco em: (i) principais autores, (ii) países de origem dos autores, (iii) análise temporal, (iv) palavras-chave mais frequentes e (v) periódicos mais relevantes. O VOSviewer também foi empregado para construir mapas bibliométricos. Além disso, o software GraphPad prism (v. 8.0.1) foi utilizado para outras tabulações e análises.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

PRINCIPAIS AUTORES

A primeira análise bibliométrica realizada abrangeu os autores com maior frequência de ocorrência no banco de dados selecionado (55 artigos). No total, foram identificados 166 autores no banco de dados selecionado. A Tabela 1 apresenta apenas os principais autores, com o número de artigos publicados, citações e a força total do link, que indica a quantidade de vínculos de coautoria de cada pesquisador com outros pesquisadores.

Tabela 1: Número de artigos publicados por autor.

Autor	Ocorrências	Citações	Força total do link
Younger, P. L.	6	225	10
Böcük, H.	5	148	16
Türker, O. C.	5	148	16
Yakar, A.	5	148	16
Chakraborty, S.	4	113	4
Jarvis, A. P.	4	117	10
Singh, S.	4	113	4
Soda, S.	4	149	15
Türe, C.	4	90	14

A partir dos dados apresentados na Tabela 1, é possível observar que alguns autores se destacam na pesquisa sobre o tratamento de efluentes de mineração utilizando wetlands construídos. O autor P. L. Younger lidera em quantidade de documentos (6) e citações (225), indicando sua relevância na área. Outros autores notáveis, como H. Böcük, O. C. Türker e A. Yakar, também têm uma quantidade significativa de publicações (5) e citações (148 cada), com uma alta força total de link (16), o que sugere forte colaboração entre eles. Esses autores estão associados a grupos de pesquisa colaborativos, focados na temática de wetlands construídos.

Os autores com força de link elevada, como J. Chen (18) e S. Soda (15), mostram que colaboram extensivamente, ainda que não tenham o maior número de documentos publicados ou citações. Essa força de colaboração indica uma rede sólida de pesquisadores atuando em conjunto, o que é crucial para o avanço da pesquisa na área de tratamento de efluentes de mineração.

A diversidade de autores com alta força de link e diferentes níveis de publicações e citações sugere que o tema é amplamente colaborativo e está em expansão. Além disso, a presença de autores com poucos artigos mas com força de link considerável indica que novos pesquisadores e grupos de pesquisa estão entrando na área, contribuindo para o enriquecimento das abordagens e metodologias.

DISTRIBUIÇÃO GLOBAL

Nesta seção, a análise bibliométrica identificou a quantidade de autores por país de origem, conforme apresentado na Tabela 2. Observou-se que o Reino Unido lidera em número de autores, com 12 pesquisadores, representando 19,3% da amostra total. Em segundo lugar estão os Estados Unidos, com 11 autores, correspondendo a 17,7% da amostra. Quando somamos os autores do Reino Unido e dos Estados Unidos, obtemos 37% dos autores oriundos desses dois países, destacando a concentração de pesquisas sobre o tema nesses locais.

Tabela 2: Número de autores por países de origem.

País	Ocorrências	Citações	Força total do link
Reino Unido	12	395	3
Estados Unidos	11	812	0
China	6	198	3
Índia	5	115	0
Turquia	5	148	1
Japão	4	149	1
Austrália	3	191	2
Coreia Do Sul	2	48	2
Espanha	2	60	2
Vietnã	2	51	2
Bangladesh	1	49	2
Canadá	1	31	0
Chile	1	27	0
Colômbia	1	49	1
República Tcheca	1	6	1
Indonésia	1	32	0
Irlanda	1	3	1
Peru	1	4	0
Arábia Saudita	1	5	1
Suécia	1	107	0

Conforme mostrado na Tabela 2, os artigos sobre o uso de wetlands construídos para tratar águas da mineração originaram-se de 20 países distintos, com os 5 principais países respondendo por aproximadamente 40% da produção de pesquisa. O maior número de artigos (12) foi publicado no Reino Unido, respondendo por 22% da literatura, seguido pelos EUA (11; 20%).

Os dois principais países são reconhecidos por atuarem no ramo da mineração, ambos os países tiveram a mineração como uma grande indústria. O Reino Unido teve essa indústria voltada particularmente para o carvão, já que este foi parte integrante da Revolução Industrial, mas enfrentou um declínio significativo desde o final do século XX (Hollywood, 2002). Enquanto que para os EUA a mineração começou no século 19, abrangendo vários minerais como carvão, cobre e urânio tornando-se a pedra fundamental da economia do país (Sajwan, 2024).

Os resultados ainda podem refletir a maior disponibilidade de financiamento e infraestrutura para pesquisas ambientais nesses países. A China, Índia e Japão também mostram presença relevante, o que evidencia um interesse crescente na Ásia por soluções sustentáveis, como os wetlands construídos.

É importante destacar que embora o Brasil tenha a atividade da mineração como uma atividade economicamente relevante (Pejon, Rodrigues e Zuquete, 2013), ele não aparece entre os países que possuem pesquisas relacionadas ao tema de efluentes de mineração sendo tratados por wetlands construídos até o momento desta pesquisa.

ANÁLISE TEMPORAL DOS ARTIGOS

A análise temporal destacou os períodos de maior produtividade em publicações sobre o tema, conforme apresentado na Figura 3. O número de publicações relevantes cresceu ao longo dos anos, sendo que o período entre 2020 e 2024 já apresenta um número maior de artigos publicados relevantes ao tema do que os períodos anteriores inteiros. Especificamente, os anos de 2021 e 2022 se destacaram, com 5 publicações cada.

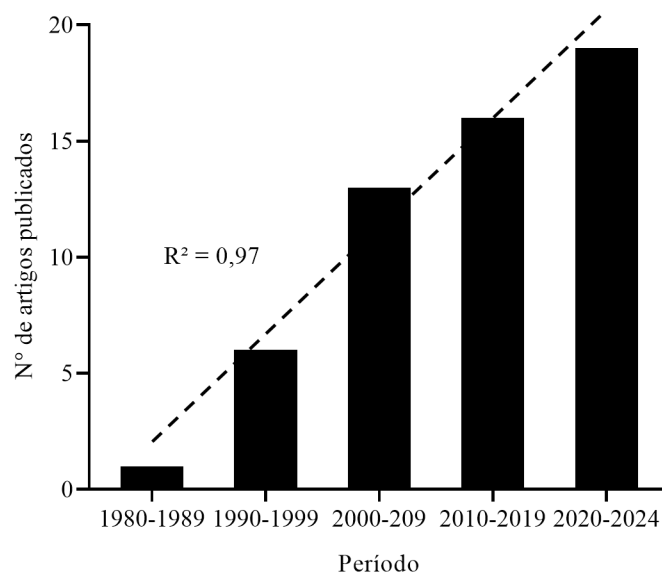


Figura 3: Quantidade de artigos publicados por década.

As tendências de publicação na literatura sobre o uso de wetlands construídos para o tratamento de águas residuárias da mineração são encontradas mostradas na Figura 3. Em geral, foi observada uma tendência significativamente crescente no número de publicações ao longo dos períodos observados. A primeira publicação encontrada foi publicada em 1989, com o período de 1980-1989 contendo apenas esta publicação, enquanto que para o período de 2020 até 2024 já foram encontrados 19 artigos publicados. A linha de tendência (Figura 3) também demonstra a tendência de desenvolvimento estável da pesquisa relacionadas com o tema. Esse aumento pode ser atribuído ao reconhecimento crescente dos impactos ambientais da mineração e à busca por tecnologias de tratamento mais sustentáveis e eficientes.

COOCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE

O próximo passo consistiu em analisar as palavras-chave presentes no banco de dados. No total foram encontradas 588 palavras-chave. As palavras-chave tem o objetivo de apontar resumidamente o conteúdo, métodos de pesquisa e/ou ferramentas utilizadas nos estudos. As palavras-chave mais utilizadas foram “Constructed Wetland” e “Mine Wastewater” (Tabela 3), o que fortalece a seleção do banco de dados, pois está condizente com o foco da pesquisa.

Tabela 3: Ocorrência de palavras-chave nos artigos (continua).

Palavras-Chave	Ocorrências	Média Ano de Publicação
<i>Constructed Wetland</i>	48	2012,65
<i>Mine Wastewater</i>	27	2011,89
<i>Wastewater</i>	27	2012,63
<i>Wastewater Treatment</i>	27	2011,74
<i>Acid Mine Drainage</i>	25	2012,28
<i>Heavy Metal</i>	16	2015,06
<i>Iron</i>	16	2011,25
<i>Pollutant Removal</i>	16	2013,69
<i>Water Contamination</i>	16	2010,25
<i>Metal</i>	15	2013,80
<i>Concentration</i>	14	2014,71

Tabela 4: Ocorrência de palavras-chave nos artigos (continuação).

Palavras-Chave	Ocorrências	Média Ano de Publicação
<i>Bioremediation</i>	12	2018,00
pH	11	2014,45
<i>Zinc</i>	11	2012,45
<i>Hydraulic Retention Time</i>	10	2019,40
<i>Typha</i>	10	2013,20
<i>Phytoremediation</i>	9	2017,67
<i>Sulfur</i>	9	2017,22

Os dados de ocorrência de palavras-chave na revisão bibliométrica (Tabela 3) indicam que "Constructed Wetlands" é o termo mais frequente, com 48 ocorrências, uma vez que representa o tema central desta pesquisa. A alta incidência dos termos "Mine Wastewater", "Wastewater" e "Wastewater Treatment" (27 ocorrências cada) reforça o foco em aplicações de wetlands para o tratamento de águas residuárias de mineração, caracterizadas por desafios como a presença de elementos potencialmente tóxicos e um elevado potencial de contaminação (Stojmenovic, Pasalic e Kragovic, 2017; Tumane et al., 2021; Zenati, Djellali e Sarker, 2023).

A ocorrência significativa de termos como "Acid Mine Drainage" (25), "Heavy Metal" (16), "Iron" (16), e "Zinc" (11) indica que os estudos se concentram especialmente na gestão de drenagem ácida de minas, um dos tipos de águas residuárias gerados pelo setor de mineração, com atenção especial à remoção de elementos potencialmente tóxicos, destacando, especificamente, o ferro e o zinco. Esses elementos, dependendo de suas concentrações no meio, são de difícil remoção e podem ser tóxicos, reforçando a importância dos wetlands construídos como soluções de tratamento ecológicas e eficazes para esses contaminantes.

Parâmetros de operação, como "pH" (11) e "Hydraulic Retention Time" (10), sugerem que as condições químicas do efluente e os critérios operacionais são fatores críticos para a eficiência dos wetlands na remoção de poluentes. Além disso, os termos "Bioremediation" (12), "Phytoremediation" (9), e a planta "Typha" (10) destacam o papel fundamental dos processos biológicos na retenção e precipitação de metais, promovendo a remoção dos contaminantes em questão.

A análise de clusters das palavras-chave identificou três frentes principais de estudo sobre a remoção de metais em águas residuárias de mineração usando wetlands construídos como solução de tratamento (Figura 4).

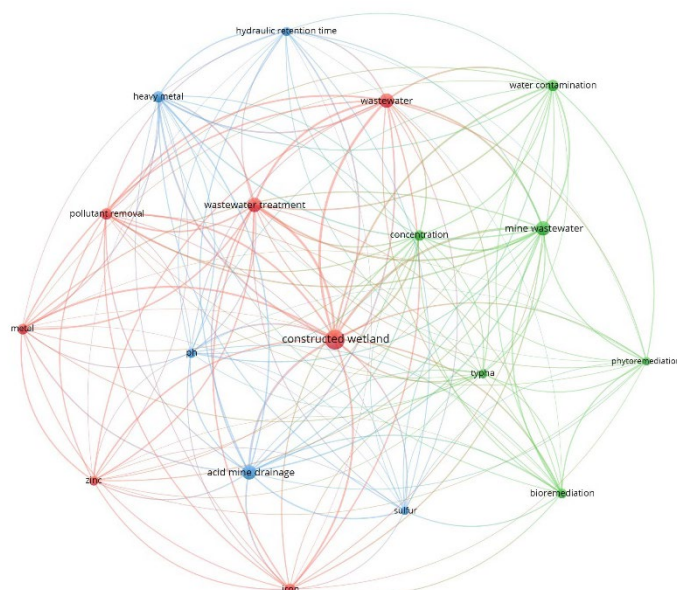


Figura 4: Mapa de visualização de rede de coocorrência de palavras-chave para o tratamento de águas residuárias de mineração por wetlands construídos (com base no modelo de associação de palavras-chave com uma frequência mínima de uso de palavras-chave de 9).

"Wastewater", "Wastewater Treatment" e "Zinc". Palavras como "Constructed Wetland", "Iron", "Zinc" e "Metal" apontam para um foco na aplicação de wetlands construídos para tratar metais específicos e avaliar sua eficiência na remoção de poluentes. Este grupo sugere uma preocupação com a capacidade dos wetlands de reduzir a concentração de contaminantes metálicos em águas residuárias de mineração, com destaque para o ferro e o zinco, que são comumente presentes nesses efluentes.

No cluster 2, as palavras chave identificadas foram: "Bioremediation", "Concentration", "Mine Wastewater", "Phytoremediation", "Typha" e "Water Contamination". Este cluster explora os aspectos biológicos da remediação em wetlands construídos, destacando termos como "Bioremediation" e "Phytoremediation". A presença da palavra "Typha" sugere o papel importante de plantas no processo de tratamento, com potencial para melhorar a remoção de contaminantes. O termo "Mine Wastewater" reforça o foco na redução da contaminação de águas residuárias da mineração por meio de estratégias que utilizam organismos vivos para absorver e reter metais, evidenciando a sinergia entre a utilização de plantas e o aumento da eficiência de remoção de poluentes nos wetlands construídos (Jansen van Vuuren et al., 2024; Sekarjannah et al., 2023).

O Cluster 3 contém termos como "Acid Mine Drainage", "Heavy Metal", "Hydraulic Retention Time", "pH" e "Sulfur". Este cluster se concentra nos parâmetros operacionais e de controle, enfatizando a influência das condições químicas e físicas do efluente, bem como dos critérios de operação dos wetlands, como "Acid Mine Drainage", "pH" e "Hydraulic Retention Time". A presença do termo "Sulfur" destaca a relevância das condições ácidas, comuns na drenagem ácida de minas, que afetam a solubilidade e disponibilidade de metais pesados. Termos como "Acid Mine Drainage" e "pH" indicam que estudos já investigaram o tratamento desse tipo específico de água por essa tecnologia.

A integração dos três clusters permite concluir que o uso de wetlands construídos para o tratamento de águas residuárias de mineração depende de uma combinação otimizada de processos físico-químicos e biológicos. O controle dos parâmetros operacionais, a inclusão de plantas e a configuração dos sistemas de tratamento atuam em sinergia para a retenção e remoção eficaz de metais pesados. Esta integração evidencia tanto a complexidade do tratamento de efluentes de mineração quanto o potencial dos wetlands construídos para tratar esses efluentes de maneira eficiente e sustentável.

PERIÓDICOS RELEVANTES

A Tabela 4 apresenta os principais periódicos do banco de dados analisado. O periódico com maior destaque no banco de dados foi o "Ecological Engineering", com um total de 9 artigos publicados e 678 citações, demonstrando sua relevância e impacto na área de tratamento de efluentes de mineração com wetlands construídos. Em seguida, aparecem o "Chemical Engineering Journal" e o "Journal of Hazardous Materials", ambos com 4 publicações, somando 209 e 218 citações, respectivamente.

Tabela 5: Periódicos de destaque.

Journal	Ocorrências	Citações
<i>Ecological Engineering</i>	9	678
<i>Chemical Engineering Journal</i>	4	209
<i>Journal of Hazardous Materials</i>	4	218
<i>Chemosphere</i>	3	82
<i>Journal of Water Process Engineering</i>	3	26
<i>Mine Water and The Environment</i>	3	51

O periódico Ecological Engineering se destaca como o periódico mais relevante, não apenas pela quantidade de publicações, mas também pelo elevado número de citações (678), indicando que os artigos nele publicados têm grande influência e reconhecimento na área de tratamento de efluentes de mineração em wetlands construídos. Esse periódico é conhecido por abordar soluções sustentáveis e naturais, como os wetlands construídos, para tratamento de diferentes tipos de contaminações, o que justifica sua relevância neste estudo.

O Chemical Engineering Journal e o Journal of Hazardous Materials também apresentam significativa relevância, com um número expressivo de citações (209 e 218, respectivamente). Esses periódicos são amplamente reconhecidos na área de engenharia ambiental e química, focando em tecnologias e metodologias

capazes de mitigar impactos ambientais, como no caso de wetlands construídos para o tratamento de efluentes de mineração, o que explica seu destaque nesta pesquisa.

O perfil dos periódicos encontrados mostra que o tema de wetlands construídos para tratamento de efluentes de mineração é interdisciplinar. Essa diversidade reflete a complexidade do tema e a necessidade de abordagens multidisciplinares para desenvolver soluções eficazes e sustentáveis.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O uso do método ProKnow-C permitiu uma seleção rigorosa e padronizada dos artigos, garantindo um banco de dados consistente e alinhado ao objetivo de investigar a solução baseada na natureza de wetlands construídos tratando águas residuárias do setor de mineração.

Este estudo revelou o crescente interesse e relevância do uso de wetlands construídos no tratamento de efluentes de mineração, destacando a complexidade e interdisciplinaridade dessa abordagem. Por meio da análise bibliométrica realizada, constatou-se que a literatura sobre o tema tem se expandido significativamente, com uma concentração de publicações em países com tradição na área da mineração, como Reino Unido e Estados Unidos.

Além disso, verificou-se a predominância de palavras-chave como “Constructed Wetland”, “Mine Wastewater” e “Acid Mine Drainage”, indicando a predominância de estudos de um tipo específico de águas dessa indústria e ainda, destacando a potencialidade desse sistema no manejo de poluentes típicos da mineração, como elementos potencialmente tóxicos e compostos ácidos. A análise de clusters das palavras-chave revelou três frentes principais de pesquisa: a aplicação de wetlands para remoção de metais específicos, a utilização de processos biológicos para a remediação e a importância dos parâmetros operacionais, como pH e tempo de retenção hidráulica, para a eficiência do sistema.

Conclui-se que os wetlands construídos representam uma alternativa promissora e ecologicamente adequada para o tratamento de efluentes de mineração, oferecendo uma combinação otimizada de processos físicos, químicos e biológicos. Esses sistemas podem reduzir a toxicidade e a carga de elementos potencialmente tóxicos nas águas residuárias, minimizando o impacto ambiental tanto do lançamento de efluentes em corpos hídricos e também do tratamento. No entanto, lacunas ainda permanecem na literatura, especialmente em relação à aplicação de wetlands em regiões com diferentes contextos climáticos e de outras águas que esse setor gera sugerindo a necessidade de estudos futuros que explorem adaptações específicas desses sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAI, J. *et al.* Evaluation of resource and environmental carrying capacity in rare earth mining areas in China. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 6105, 12 abr. 2022.
- COIMBRA, E. C. L.; BORGES, A. C. Removing Mn, Cu and Fe from Real Wastewaters with Macrophytes: Reviewing the Relationship between Environmental Factors and Plants' Uptake Capacity. *Toxics*, v. 11, n. 2, p. 158, 7 fev. 2023.
- COSTA, E. P. *et al.* Simultaneous removal of emerging contaminants and disinfection for municipal wastewater treatment plant effluent quality improvement: a systemic analysis of the literature. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 24092–24111, 2021.
- CRAGGS, R. *et al.* High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production. *New Zealand Journal of Botany*, v. 52, n. 1, p. 60–73, 2 jan. 2014.
- ENSSLIN, L. *et al.* ProKnow-C, Knowledge Development Process – ConstructivistBrasil, 2010.
- HOLLYWOOD, E. Mining, migration and immobility: Towards an understanding of the relationship between migration and occupation in the context of the UK mining industry. *International Journal of Population Geography*, v. 8, n. 4, p. 297–314, jul. 2002.
- ICMM, I. C. ON M. AND M. Mining Contribution Index (MCI) 6th Edition International Council on Mining and Metals. Disponível em: <https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/social-performance/2022/research_mci-6-ed.pdf?cb=16134>. Acesso em: 23 nov. 2023.
- JANSEN VAN VUUREN, M. *et al.* Unveiling the Protective Dynamics of an Ecologically Engineered Wetland Against Acid Mine Drainage: A Case Study in South Africa, 16 jul. 2024.
- JI, B. *et al.* Roles of biochar media and oxygen supply strategies in treatment performance, greenhouse gas emissions, and bacterial community features of subsurface-flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, v. 302, p. 122890, abr. 2020.

- OUZZANI, M. *et al.* Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, v. 5, n. 1, 5 dez. 2016.
- PARETO, V. *Cours d'Economie Politique*. Londres: Macmillan, 1897. v. 1
- PEJON, O. J.; RODRIGUES, V. G. S.; ZUQUETE, L. V. Impactos ambientais sobre o solo. *Em: Ambiental : conceitos, tecnologia e gestão*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 317–341.
- REBELLO, T. A. *et al.* Life cycle assessment of urban wastewater treatment plants: A critical analysis and guideline proposal. *Water Science and Technology*, v. 83, n. 3, p. 501–514, 1 fev. 2021.
- SAJWAN, K. S. Mining in the United States. *Em: Derelict Mines: Environmental Risk Assessment and Management*. 1. ed. Boca Raton: Derelict Mines, 2024. .
- SEKARJANNAH, F. A. *et al.* Phytoremediation of Acid Mine Drainage with *Melaleuca cajuputi*, *Nauclea orientalis*, and *Vetiveria zizanioides* in Floating Treatment Wetland. *HAYATI Journal of Biosciences*, v. 30, n. 3, p. 491–499, 6 fev. 2023.
- SERRA, T. *et al.* Disinfection and particle removal by a nature-based *Daphnia* filtration system for wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, v. 50, p. 103238, dez. 2022.
- STOJMENOVIC, M.; PASALIC, S.; KRAGOVIC, M. Influence of the underground mining waste on the environmental tailings and wastewater characterization. *Podzemni radovi*, n. 31, p. 85–100, 2017.
- TUMANE, R. *et al.* Managing Water Quality in Mining Areas: Changing Paradigm of Sustainability. *Em: [s.l: s.n.]*. p. 203–217.
- VYMAZAL, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, v. 380, n. 1–3, p. 48–65, jul. 2007.
- ZENATI, F.; DJELLALI, A.; SARKER, D. Wastewater Assessment and Biochemical Oxygen Demand Value Prediction from Mining Operations: A Case Study. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 13, n. 3, p. 10754–10758, 2 jun. 2023.