



## C A P Í T U L O 1

# MÉTODOS PASSIVOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM ÁREAS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.198132518071>

### **Denise Lidorio de Mattia**

Mestre em Ciências Ambientais;

Pós graduanda em Biotecnologia

Porto Alegre – RS

<http://lattes.cnpq.br/9032678958909496>

### **Joyce Cristina Gonçalves Roth**

Doutora em Tecnologia Ambiental;

Professora Adjunta em Engenharia Ambiental da UERGS - RS

Porto Alegre – RS

<http://lattes.cnpq.br/5161270146704130>

### **Ricardo de Carly Luz Andreazza**

Mestre em Ambiente e Sustentabilidade

Porto Alegre – RS

<http://lattes.cnpq.br/8308294940215128>

### **Daniela Mueller de Lara**

Doutora em Ambiente e Desenvolvimento;

Professora permanente do mestrado em Ambiente e Sustentabilidade da UERGS - RS

Porto Alegre – RS

<http://lattes.cnpq.br/1557177056454917>

**RESUMO:** A mineração de carvão ainda hoje é uma atividade importante para a geração de energia por meio de termoelétricas, mas deixou, ao longo do tempo, um legado de degradação ambiental, especialmente pela contaminação de águas superficiais e subterrâneas com a geração da Drenagem Ácida de Mina (DAM). Diante disso, técnicas de biorremediação como o uso de microalgas, bactérias, resíduos da indústria de camarão e até mesmo o esgoto doméstico vêm sendo estudadas como

alternativas para o tratamento dessas águas contaminadas por ferro e manganês, particularmente no sul do Brasil. Estudos recentes demonstram a eficiência de wetlands construídos, barreiras permeáveis reativas, bem como o uso de materiais naturais e resíduos industriais no controle da acidez e na remoção de metais. Assim, este trabalho busca revisar os tratamentos passivos que podem contribuir para a recuperação ambiental de áreas remotas afetadas por antigas atividades de mineração, por serem técnicas de baixa manutenção e economicamente viáveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** biorremediação; fitorremediação; microrganismos; carvão; DAM; wetlands.

## PASSIVE METHODS OF EFLUENTE TREATMENT IN COAL MINING ÁREAS: A LITERATURE REVIEW

**ABSTRACT :** Coal mining remains an important energy source for thermoelectric generation, but over time it has left a legacy of environmental degradation, especially through the contamination of surface and groundwater by Acid Mine Drainage (AMD). In response, bioremediation techniques such as the use of microalgae, bacteria, shrimp industry waste, and even domestic sewage have been explored as alternative treatments for waters contaminated with iron and manganese, particularly in southern Brazil. Recent studies also highlight the effectiveness of constructed wetlands, permeable reactive barriers, and the application of natural materials and industrial residues in controlling acidity and removing metals. Therefore, this work seeks to review the passive treatments that can contribute to the environmental recovery of remote areas affected by former mining activities, as they are low-maintenance and economically viable techniques.

**KEYWORDS:** bioremediation; phytoremediation; microorganisms; coal, DAM; wetlands.

## INTRODUÇÃO

A atividade mineradora no Brasil remonta ao período colonial, quando expedições foram organizadas para a busca de ouro e pedras preciosas. Desde então, a mineração consolidou-se como uma das bases econômicas do país e foi decisiva na ocupação do território brasileiro (PORTAL DA MINERAÇÃO, 2025). Dentre os diversos tipos de minério explorados, o carvão mineral teve destaque principalmente na região sul, sendo utilizado como fonte de energia e matéria-prima para a indústria.

A primeira mina de carvão no Brasil foi aberta em 1855 em Arroio dos Ratos no Rio Grande do Sul (INFO ESCOLA, 2025), possuía um carvão de melhor qualidade, já a primeira mina em Santa Catarina a ser analisada com fins comerciais foi em Lauro Muller, com data aproximada de 1827, mas que não possuía carvão de boa qualidade para os padrões da empresa inglesa que queria minerar e foi descontinuado (INFO ESCOLA, 2025).

Em Santa Catarina, a mineração de carvão teve início no final do século XIX e perdurou com força ao longo do século XX, gerando um dos maiores passivos ambientais da mineração no Brasil (BRASIL, 2010). Diversos rios da região sul do estado foram contaminados por rejeitos ricos em pirita, o que resultou na acidificação das águas e degradação dos ecossistemas aquáticos (BARRETO, 2001). A relevância histórica dessa atividade contrasta com os impactos ambientais deixados, que motivaram a atuação do Ministério Público Federal, culminando na Ação Civil Pública movida nos anos 1990 contra mineradoras e o poder público. Em 2007, decisão do Superior Tribunal de Justiça (STJ) determinou a obrigação da União e das empresas mineradoras de promover a recuperação das áreas degradadas.

Atualmente em Santa Catarina, a extração é feita de forma subterrânea, pois as reservas superficiais já foram exauridas. No entanto, tanto a extração quanto o beneficiamento do carvão mineral desencadeiam sérios problemas ambientais, principalmente devido à geração de contaminantes tóxicos, em especial na água (MACAN et al., 2012). Entre esses contaminantes, destaca-se a pirita ( $FeS_2$ ), principal responsável pela geração da Drenagem Ácida de Mina (DAM), após sua exposição ao ar durante a extração e intemperismo (MASINDI et al., 2022).

As áreas mineradas no passado deixaram, além da DAM, uma série de passivos ambientais, como a degradação e o afundamento do solo, a poluição hídrica, a geração de resíduos e a poluição do ar (ZHENG FU et al., 2010).

Segundo Krebs et al. (2010), minas com reservas esgotadas ou desativadas devem passar por processos de encerramento, incluindo a recomposição ambiental e o fechamento das bocas de mina. Contudo, décadas atrás não havia exigência legal para a execução de planos de fechamento, o que resultou em minas abandonadas que seguem impactando rios e nascentes por meio da geração contínua de DAM.

A drenagem ácida de mina se forma quando minerais sulfetados são expostos a condições oxidantes, como em escavações de grande porte ou construção de estradas (SKOUSEN; ZIEMKIEWICZ; MCDONALD, 2019). Quando entram em contato com a água e o oxigênio, esses minerais se oxidam, formando ácido sulfúrico, íons metálicos e sulfato, que contaminam lençóis freáticos e rios se não forem tratados (AKCIL; KOLDAS, 2006).

No Brasil, a mineração de carvão é concentrada na região sul, sendo uma das principais atividades econômicas em Santa Catarina (MACAN et al., 2012). As técnicas de tratamento utilizadas nas minas ativas da região são, em geral, do tipo ativo, com uso de reagentes químicos e sistemas de decantação. No entanto, em áreas abandonadas, esse tipo de tratamento se torna inviável devido ao custo elevado e à necessidade de infraestrutura.

O ideal seria prevenir a formação da DAM, o que, segundo Masindi et al. (2022), pode ser feito com técnicas como: cobertura seca dos rejeitos, estabilização com materiais alcalinos, controle da entrada de água em áreas contaminadas, preenchimento de vazios, aplicação de bactericidas, microencapsulação e outras medidas para reduzir a geração do efluente a longo prazo.

Várias abordagens ativas e passivas têm sido aplicadas no tratamento da DAM. De acordo com Naidu et al. (2019), técnicas como biorremediação, neutralização e barreiras reativas permeáveis são utilizadas em locais de mineração. No entanto, a eficiência dessas abordagens depende de fatores locais, como clima e geografia. Isso torna o tratamento da DAM ainda um desafio, apesar dos avanços técnicos, por isso a legislação é um grande aliado para as recuperações e melhorias ambientais.

A legislação ambiental do estado de Santa Catarina e do Brasil corroboram para uma busca de um meio ambiente equilibrado e sem poluição conforme descritas a seguir:

**Decreto Federal Nº 227/1967:** Dispõe sobre o aproveitamento dos recursos minerais.

**Lei Federal Nº 6.938/1981:** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente.

**Lei Federal Nº 97.632/1989:** Institui o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD).

**Lei Federal Nº 7.805/1989:** Responsabiliza as empresas pela recuperação dos danos causados ao ambiente devido às atividades de mineração. Assim, os proprietários de concessões de mineração devem promover a reabilitação das áreas após o fechamento das minas, de acordo com o PRAD.

**Resolução CONAMA Nº 237/1997:** Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental.

**Lei Federal Nº 9.433/1997:** política nacional de recursos hídricos, que tem por objetivo a gestão sustentável e integrada dos recursos hídricos.

**Portaria ANM Nº 237/2001:** Institui Normas Regulamentares de Mineração (NRM), alterada pela Portaria Nº 12 de 2002.

**Resolução CONAMA Nº 357/2005:** Classifica e enquadra os corpos d'água superficiais e estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes. Resolução revisada e complementada pela CONAMA Nº 430/2005.

**CETESB/2005:** Lista os valores orientadores para solos e águas subterrâneas.

**Resolução CONAMA Nº 420/2009:** Define valores orientadores para proteção da qualidade dos solos e águas subterrâneas visando o gerenciamento de áreas contaminadas em todo o território nacional. Esta lista contém valores de investigação, que condizem as concentrações máximas de determinadas substâncias acima das quais existe potencial risco à saúde humana.

**Portaria MS Nº 2914/2011:** Estabelece padrões de qualidade da água para o consumo humano, que são fixados com base em risco à saúde humana e, em alguns casos, em características organolépticas da água, conforme orientação da Organização Mundial da Saúde (OMS).

**Lei Estadual Nº 9.748/1994:** Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina.

**Lei Estadual Nº 14.675/2009:** Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências.

Art. 197. Os usuários de recursos hídricos, para fins de lançamento de efluentes tratados, devem monitorar periodicamente, de forma concomitante, o efluente e o corpo receptor a montante e a jusante do ponto de lançamento, conforme sistemática estabelecida pelo órgão licenciador

Art. 226. A utilização de organismos vivos de qualquer natureza na despoluição de corpos d'água naturais necessita de autorização do órgão ambiental e depende de prévio estudo de viabilidade técnica e de impacto ambiental.

**Lei Estadual Nº 18.171/2021:** Altera os arts. 177 e 178 da Lei nº 14.675, de 2009, que institui o Código Estadual do Meio Ambiente de SC e estabelece outras providências.

Art. 177. Os efluentes somente poderão ser lançados direta ou indiretamente em corpos de água interiores, em lagunas, em estuários e no mar, quando obedecidas as condições previstas nas normas federais e em resolução do CONSEMA.

Diante desse contexto e de toda legislação envolvida, este trabalho tem como objetivo revisar e sistematizar os principais métodos passivos de tratamento aplicáveis à Drenagem Ácida de Mina (DAM), com ênfase em soluções de baixo custo e baixa manutenção voltadas a áreas mineradas abandonadas. A revisão destaca abordagens como biorremediação, wetlands construídos, barreiras reativas e o uso de materiais naturais ou resíduos industriais, analisando sua aplicabilidade, eficiência e limitações em diferentes cenários geográficos e ambientais, especialmente na região sul do Brasil.

Embora ações de recuperação do solo tenham avançado, o tratamento dos efluentes, especialmente da DAM, ainda representa um grande desafio técnico e financeiro nas áreas abandonadas de mineração. O alto custo e a complexidade dos tratamentos ativos tornam inviável sua aplicação nestas áreas degradadas no passado e que muitas são de difícil acesso, reforçando a necessidade de explorar alternativas sustentáveis e possíveis de serem mantidas em campo sem manutenção diária.

## **CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES**

### **Drenagem ácida de mina (DAM)**

A Drenagem Ácida de Mina (DAM) é um dos passivos ambientais mais persistentes e impactantes associados à mineração de carvão. Trata-se de um efluente altamente ácido, rico em metais dissolvidos, que resulta da oxidação de minerais sulfetados, especialmente a pirita ( $FeS_2$ ), quando expostos ao oxigênio atmosférico e à água (GALHARDI & SOLDERA, 2018).

Esse processo ocorre tanto em pilhas de rejeitos e estéreis quanto em galerias e bocas de minas abandonadas, onde a infiltração da água da chuva e a circulação de ar favorecem reações que acidificam o meio e mobilizam metais pesados. A acidez gerada pode comprometer de forma severa a qualidade de rios, córregos, nascentes e lençóis freáticos.

Segundo Mello, Duarte e Ladeira (2014), a DAM se estabelece quando rochas contendo minerais sulfetados são escavadas e depositadas na superfície, iniciando uma sequência de reações de oxidação. Essas reações resultam na formação de ácido sulfúrico e na liberação de íons metálicos, como ferro, alumínio e manganês, amplamente detectados em águas contaminadas por mineração.

A Figura 1 apresenta os principais processos envolvidos na formação da DAM. O esquema resume desde a oxidação inicial da pirita até a geração de acidez e a liberação dos metais no ambiente. A imagem evidencia os caminhos da infiltração hídrica, a interação com oxigênio e a influência de microrganismos que aceleram a transformação química dos resíduos.

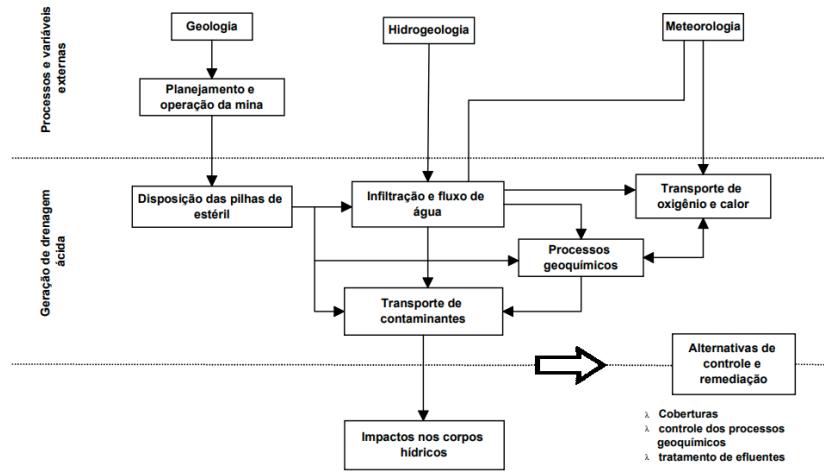


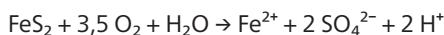
Figura 1. Representação dos principais processos associados à geração da drenagem ácida de mina a partir da oxidação de minerais sulfetados.

Fonte: Borma & Soares (2002).

As drenagens ácidas são formadas, principalmente, pela presença de pirita em ambientes onde ocorre a infiltração de água e a exposição ao oxigênio, seja pela inundação de minas antigas ou pela oxidação de depósitos de rejeitos. Essa reação desencadeia a formação da Drenagem Ácida de Mina (DAM), caracterizada pela acidificação da água e pela liberação de metais pesados (MASINDI et al., 2022).

Embora a pirita ( $FeS_2$ ) seja o mineral sulfetado mais citado nos estudos sobre DAM, outros compostos também contribuem para o fenômeno, como calcopirita, arsenopirita e galena. Após oxidação completa, esses minerais podem originar subprodutos como hidróxidos de ferro e sulfatos, intensificando os impactos ambientais (TRINDADE & BARBOSA FILHO, 2002).

A reação química simplificada da oxidação da pirita pode ser representada da seguinte forma:



Essa equação mostra que a pirita, ao reagir com oxigênio e água, libera íons de ferro ( $Fe^{2+}$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) e hidrogênio ( $H^+$ ), o que resulta em acidificação do meio.

Esse processo pode prosseguir em estágios sucessivos, incluindo a oxidação do  $Fe^{2+}$  em  $Fe^{3+}$  e a precipitação de hidróxidos de ferro, além da geração contínua de acidez.

O quadro 1 resume os estágios sequenciais dessa oxidação, evidenciando a complexidade do processo e sua amplificação em presença de oxigênio, água e microrganismos.

Estágio 1	<p><b>Reação (2):</b> desenvolve-se em meio abiótico e por ação das bactérias;</p> <p><b>Reação (5):</b> desenvolve-se em meio abiótico e é mais lenta à medida em que o pH decresce</p> <p><b>Observações:</b> Ph acima de ~4,5; alto teor de sulfato e baixa concentração de ferro total; pouca ou nenhuma acidez</p>
Estágio 2	<p><b>Reação (2):</b> desenvolve-se em meio abiótico e por ação direta das bactérias;</p> <p><b>Reação (5):</b> desenvolve-se a uma velocidade determinada primeiramente pela atividade da bactéria <i>T. ferrooxidans</i></p> <p><b>Observações:</b> Ph entre 2,5 e 4,5; elevado teor de sulfato e elevada acidez; cresce concentração de ferro total; reduzida relação de <math>Fe^{3+}/Fe^{2+}</math></p>
Estágio 3	<p><b>Reação (4):</b> desenvolve-se a uma velocidade determinada pela ação da bactéria <i>T. ferrooxidans</i>;</p> <p><b>Reação (3):</b> desenvolve-se a uma velocidade determinada principalmente pela velocidade da reação (4)</p> <p><b>Observações:</b> Ph inferior a ~2,5; alta concentração de sulfato, elevada acidez e relação <math>Fe^{3+}/Fe^{2+}</math></p>

Quadro 1: Estágios da oxidação da pirita e formação da DAM.

Fonte: Adaptado de Borma & Soares (2002).

A atuação de bactérias oxidantes de ferro e enxofre, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, intensifica a geração de DAM. Segundo Masindi et al. (2022), essas bactérias utilizam os compostos da reação como fonte de energia, contribuindo para a queda do pH, a mobilização de metais como Fe, Al e Mn e a coloração alaranjada típica da água impactada por mineração, isso pode ser visualizado nas figuras 02 e 03 a seguir, onde a cor da água é alterada pela presença de DAM.



Figura 02: Depósito de rejeitos na região sul.

Fonte: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/anm-faz-levantamento-ambiental-em-zonas-carboniferas>



Figura 03: rio em Urussanga - SC contaminado por DAM;

Fonte: <https://observatoriodocarvao.org.br/comunidade-em-sc-reclama-de-danos-no-rio-carvao-causados-por-mina-desativada/>

## Disposição dos resíduos provenientes da mineração

A disposição inadequada dos rejeitos provenientes do beneficiamento de carvão mineral e do material estéril do decapamento da lavra constitui uma das principais fontes de degradação ambiental associadas à mineração (IPEA, 2012). Em especial, os resíduos sólidos contendo minerais sulfetados, quando mal manejados, podem reagir com a água e o oxigênio, desencadeando processos de oxidação que resultam na formação da Drenagem Ácida de Mina (DAM).

A prevenção, minimização e tratamento da DAM exigem a implementação de um sistema de gestão de resíduos que considere, desde o início, critérios rigorosos para o local, o tipo e a forma de disposição dos rejeitos (BORMA & SOARES, 2002), essas medidas devem visar os controles de infiltração nas minas, protegendo os recursos hídricos presentes na área, evitando a contaminação das águas.

As estruturas de disposição de rejeitos devem ser concebidas como obras de engenharia, dimensionadas para a contenção e estabilização de resíduos provenientes do beneficiamento mineral, bem como para a captação e eventual tratamento dos efluentes gerados (IPEA, 2012). A escolha da técnica adequada depende de variáveis como a natureza do resíduo, suas propriedades físico-químicas e mineralógicas, o potencial de geração de acidez, além de fatores locais como clima, geologia e proximidade de corpos hídricos (BORMA & SOARES, 2002).

A Figura 4 apresenta um esquema das reações envolvidas no intemperismo de minerais sulfetados. O diagrama mostra como a oxidação da pirita leva à acidificação do meio, à liberação de íons metálicos ( $M^+$ ) e à consequente lixiviação e transporte desses metais para o lençol freático, ilustrando visualmente a gênese da DAM em ambientes minerados.

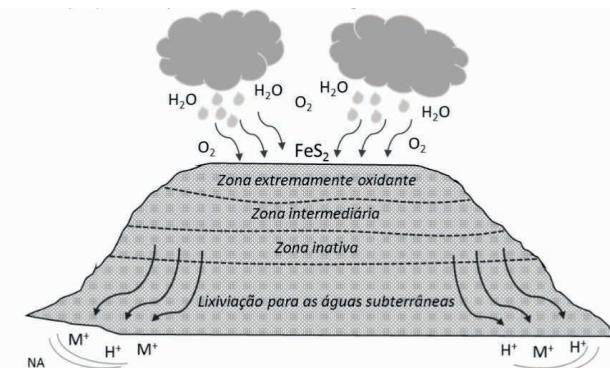


Figura 04: Diagrama esquemático do intemperismo de minerais sulfetados, formação da DAM, acidificação do meio e transporte de metais dissolvidos ( $M^+$ ) para as águas subterrâneas.

Fonte: Galhardi & Soldera (2018).

No Brasil, a forma mais comum de disposição de rejeitos ocorre por meio de reservatórios construídos com diques ou barragens. Essas estruturas podem ser feitas com solo natural (barragens convencionais) ou com os próprios rejeitos (barragens alteadas), conforme as práticas técnicas da engenharia de barragens (IPEA, 2012).

Dentre os métodos de alteamento mais utilizados estão o de montante, jusante e linha de centro (FERRAZ, 1992). Cada método possui vantagens e riscos específicos, e sua escolha deve considerar não apenas aspectos geotécnicos, mas também a segurança ambiental e a prevenção da contaminação hídrica. Muitas barragens ao longo do tempo adotam sistemas mistos, iniciando com alteamento em linha de centro e migrando posteriormente para montante.

A Figura 5 ilustra os principais elementos de um sistema de gestão para disposição de resíduos potencialmente geradores de acidez. São apresentados os componentes básicos, como barreiras de contenção, camadas de cobertura, drenagem de percolado, poços de monitoramento e estruturas para mitigação de impactos ambientais. O diagrama reforça a necessidade de planejamento integrado, que contemple tanto aspectos operacionais quanto preventivos.

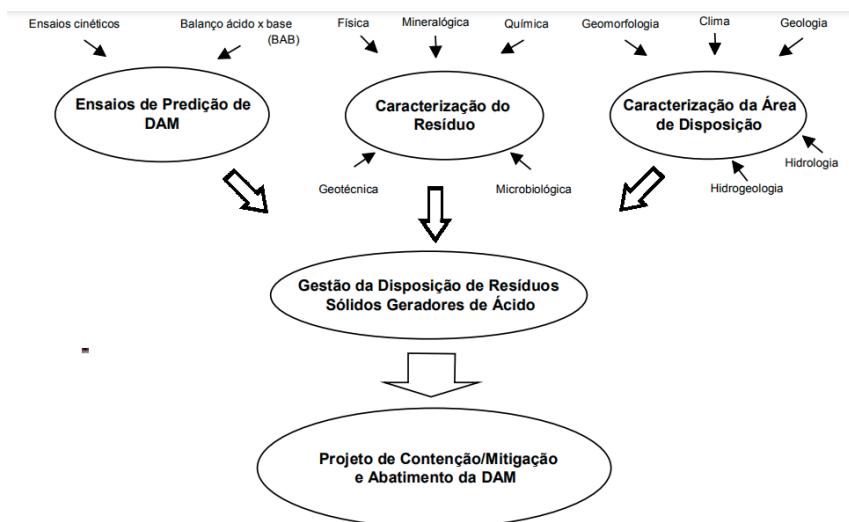


Figura 5. Elementos gerais de um sistema de gestão para disposição de resíduos geradores de ácido, incluindo barreiras físicas, drenagem e controle ambiental.

Fonte: Borma & Soares (2002).

Além da degradação ecológica, a DAM gerada pela disposição inadequada dos rejeitos, representa também um risco à saúde humana. Estudos apontam a acumulação de metais na cadeia alimentar, associada a efeitos crônicos como mutações gênicas e carcinogenicidade. Reduzir sua geração ou tratá-la de forma eficiente é, portanto, essencial para a proteção ambiental e sanitária.

Diante disso, o próximo tópico apresenta alternativas de tratamento não convencionais com destaque para métodos passivos, mais adequados a áreas remotas e de baixo acesso logístico, onde o uso de reagentes químicos e infraestrutura intensiva se torna inviável.

## MÉTODOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

### Sistemas ativos

Os sistemas ativos de remediação da Drenagem Ácida de Mina (DAM) são caracterizados pelo uso de energia mecânica e insumos químicos para promover a neutralização da acidez e a remoção dos metais presentes no efluente. Segundo Borma e Soares (2002), esses sistemas requerem agitação constante e controle operacional para garantir a eficiência da reação entre o efluente e os agentes neutralizantes.

Os principais reagentes utilizados incluem carbonato de cálcio, cal hidratada e hidróxido de sódio, que elevam o pH do meio e promovem a precipitação dos íons metálicos sob a forma de hidróxidos insolúveis (SATO et al., 2018; SKOUSEN et al., 1998). Esse processo resulta na geração de uma lama química, geralmente rica em ferro, alumínio e outros metais, que demanda destinação adequada (ANDERSEN et al., 2012).

Apesar da eficácia imediata, os tratamentos ativos apresentam elevado custo operacional, envolvendo manutenção contínua, aquisição de insumos, presença de mão de obra especializada e monitoramento constante. Além disso, o uso intensivo de reagentes e energia torna esse modelo pouco sustentável em longo prazo, especialmente em áreas de difícil acesso (SATO et al., 2018).

Masindi et al. (2022) discutem ainda a possibilidade de tratamentos integrados e gradativos, em que os metais precipitados durante a neutralização são posteriormente recuperados por meio de processos adicionais, possibilitando algum nível de reaproveitamento e compensação dos custos de implantação. No entanto, mesmo nesses casos, a aplicação se restringe quase exclusivamente a minas em operação, onde há disponibilidade técnica, logística e econômica.

## Sistemas passivos

Os sistemas passivos de remediação da Drenagem Ácida de Mina (DAM) são caracterizados pela condução do efluente por dispositivos estáticos, como áreas inundadas, canais, drenos ou poços, onde ocorrem reações de neutralização química e processos bioquímicos de atenuação da contaminação. De acordo com Borma e Soares (2002), esses sistemas utilizam materiais alcalinos ou substratos biológicos dispostos de forma fixa, sem necessidade de operação contínua.

Skousen et al. (2019) destacam que os sistemas passivos são eficazes sob determinadas condições de acidez e vazão, sendo aplicáveis para o tratamento de DAM em diversas configurações, como:

- pântanos aeróbicos e anaeróbicos;
- canais abertos de calcário;
- drenos anóxicos de calcário;
- wetlands de fluxo vertical;
- leitos de lixiviação alcalina.

Em comparação aos sistemas ativos, os sistemas passivos possuem custo operacional reduzido e requerem menos manutenção (SATO et al., 2018). Embora o investimento inicial possa ser mais elevado, esses sistemas são projetados para operar por 10 a 15 anos com mínima intervenção humana (PAT-ESPADAS et al., 2018), o que os torna ideais para áreas remotas, especialmente em minas desativadas.

Um destaque entre os métodos passivos é o uso de tratamentos biológicos, como a biorremediação e a biossorção, que têm se mostrado eficientes na remoção de metais pesados, com custos significativamente menores em comparação a tecnologias químicas convencionais (LEMOS et al., 2008).

Masindi et al. (2022) relatam que esses sistemas são amplamente utilizados em minas abandonadas e dividem-se principalmente em duas abordagens: zonas úmidas construídas (wetlands), onde o fluxo da DAM é retardado por substratos vegetados e materiais como calcário ou matéria orgânica; canais e lagoas de calcário, que promovem o aumento do pH por contato direto com rochas carbonáticas.

As principais abordagens passivas, como wetlands construídos e o uso de materiais alternativos, serão discutidas com maior profundidade nas seções seguintes.

## METODOLOGIA

Foram procurados artigos por meio do google, Sciedirect, Scielo, MDPI Sustainability, banco de dados da UNESC, UFSC, Ministério de minas e energia. Onde no buscador eram colocadas palavras chaves como:

- tratamento passivo de efluentes,
- mineração no Brasil,
- wetlands,
- pântanos construídos,
- biorremediação e fitorremediação,
- tratamento biológico de efluentes de mineração;
- remediação biológica

Após as buscas os artigos foram selecionados após pré leitura e separados por conter o conteúdo que se relacionava a pesquisa, sendo estes selecionados e lidos para compor o artigo de revisão, sendo o recorte temporal usado para compro o artigo foram artigos de 2016 até 2024, que podiam ser baixados de forma gratuita na internet.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tratar efluentes de forma passiva é uma boa opção para áreas remotas e de difícil acesso, em que não há equipe presente para realizar o tratamento diariamente, por isso alguns estudos a seguir demonstram as vantagens do uso de biorremediação, como Masindi et al. (2021) que menciona o co-tratamento de DAM com esgoto doméstico pré-tratado como forma de viabilizar a diluição e a suplementação de matéria orgânica para estimular comunidades microbianas. Contudo, esses modelos demandam áreas extensas, tempo de residência elevado e ajustes conforme as proporções de cada tipo de efluente, sendo verificando redução de contaminantes mas com necessidade de proporções elevadas (7:1).

Verma e Kuila (2019) ressaltam que microrganismos presentes no solo e na água têm papel crucial na degradação ou imobilização de metais pesados. A diversidade microbiana é essencial, pois diferentes espécies apresentam tolerância e metabolismo específicos para cada metal, sendo necessário empregar consórcios microbianos adaptados às condições do local.

Atualmente, diversos estudos têm explorado técnicas passivas para o tratamento da DAM, utilizando bactérias, plantas aquáticas, biomassa de resíduos da indústria pesqueira (como casca de camarão) e diferentes tipos de substratos orgânicos e minerais. Os resultados têm demonstrado o potencial dessas soluções para a remoção eficiente de contaminantes, especialmente em áreas onde o uso de tecnologias tradicionais é limitado.

A biorremediação é uma forma de remediação passiva baseada no uso de organismos vivos — como bactérias, algas, fungos ou plantas — para remover ou transformar contaminantes em formas menos tóxicas. Este conceito engloba diferentes abordagens, como a fitorremediação (uso de plantas) e a bioassorção (uso de materiais bioassorventes), podendo ser utilizadas isoladamente ou combinadas (CAMARGO et al., 2001).

Diferentemente de compostos orgânicos, os metais pesados não podem ser degradados, apenas convertidos em formas menos solúveis ou removidos do meio, assim os microrganismos usam metais pesados como alimento (Tang et al, 2024) e isso faz com que a biorremediação seja uma forma de alterar os estados de oxidação desses metais, imobilizá-los ou retirá-los por absorção, adsorção ou precipitação (LINS et al., 2016). No Brasil, as condições climáticas e a biodiversidade microbiana oferecem grande potencial para a aplicação dessas técnicas (AVILA et al., 2013).

Microrganismos desempenham papel fundamental na geoquímica ambiental, sendo capazes de atuar na ciclagem de elementos, na degradação de poluentes e na precipitação de metais. Espécies do gênero *Acidithiobacillus*, por exemplo, aceleram a oxidação da pirita na DAM, mas outros grupos bacterianos podem atuar na sua atenuação (SOBRAL; PAIVA; SANTOS, 2018).

Diversos estudos reforçam o potencial da biorremediação no contexto da DAM:

Duarte Filho & Dias (2017) testaram a microalga *Synechococcus nidulans* na região de Candiota (RS) para remoção de metais pesados e alcalinização da água. Os resultados mostraram eficácia na retenção dos metais e na redução da lixiviação para os aquíferos.

Rodrigues (2020) avaliou a bioestimulação de bactérias redutoras de sulfato com quitina comercial e resíduos de casca de camarão, sendo que o uso do resíduo foi mais eficiente, mostrando viabilidade no reaproveitamento de rejeitos orgânicos industriais.

Akinpelu et al. (2021) utilizaram cepas do gênero *Bacillus* em reatores biológicos para tratar DAM, obtendo redução significativa dos níveis de sulfato e aumento do pH. A adição de diferentes substratos também reduziu a concentração de metais pesados.

Demarco (2016) estudou o uso de macrófitas aquáticas (fitorremediação) em Pelotas (RS). As espécies *Enydra anagallis*, *Hydrocotyle ranunculoides*, *Hymenachne grumosa*, *Lemma valdiviana*, *Pistia stratiotes* e *Sagittaria montevidensis* apresentaram alta capacidade de absorção de metais como zinco, chumbo, cromo e manganês, sendo indicadas para técnicas de rizofiltração e fitoestabilização.

Gimenez (2017) testou conchas de moluscos como agentes neutralizantes e obteve remoção de até 100% de alumínio, 88,8% de ferro e 82% de magnésio usando calcita biogênica.

Akimpelu et al. (2021) realizaram análises da microbiota presente na DAM e identificaram predominância do filo Firmicutes, em especial a classe Bacilli. O *Bacillus cereus* mostrou-se adaptado a pH ácido e tolerante a metais como Al, Cu, Zn e Fe, com taxas de remoção superiores a 70%.

Verma & Kuila (2019) destacam o uso de microrganismos geneticamente modificados (GEMs) para metabolização ou imobilização de metais pesados como arsênio, cromo, níquel e mercúrio. Apesar do potencial elevado, alertam para o risco ecológico da liberação desses organismos, propondo o uso de GEMs suicidas, que se autodesativam após a ação.

Wibowo et al. (2022) investigaram o uso de plantas aquáticas como *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Pistia stratiotes* (alface-d'água) em sistemas de wetlands. Ambas se mostraram hiperacumuladoras, removendo Fe, Mn, Al, Ca e Mg em períodos de contato superior a cinco semanas. Os autores sugerem a combinação de métodos para eficiência ampliada.

A diversidade de abordagens e substratos utilizados em sistemas de biorremediação evidencia sua flexibilidade, viabilidade econômica e adaptabilidade ecológica. Embora muitos estudos estejam em fase experimental ou semi-controlada, os resultados apontam para sua aplicação como solução sustentável, especialmente em áreas remotas ou de baixo acesso à infraestrutura tradicional.

A crescente busca por soluções ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis levou ao desenvolvimento de diversas pesquisas aplicadas que testam alternativas à neutralização química tradicional. Técnicas baseadas em biorremediação, fitorremediação, uso de resíduos orgânicos e wetlands construídos têm se mostrado eficazes tanto em escala laboratorial quanto em campo, especialmente em áreas de mineração de carvão e regiões impactadas pela DAM.

A seguir, o Quadro 02 apresenta uma síntese de estudos nacionais e internacionais que empregaram métodos alternativos de tratamento, com destaque para microrganismos, plantas aquáticas, resíduos biogênicos e wetlands modificados. O quadro compila o tipo de tratamento utilizado, a localização geográfica, os principais resultados obtidos e os autores responsáveis pelas pesquisas.

Ano	Título	Método de Tratamento	Localização Geográfica	Principais Descobertas	Autores
TCC, 2016	Seleção de macrófitas aquáticas com potencial de fitorremediação no arroio Santa Bárbara, município de Pelotas/RS	Seleção de espécies aquáticas presentes em rios com potencial de remediar áreas contaminadas.	Pelotas - RS	Seleção de macrófitas aquáticas com potencial de fitorremediação, onde as macrófitas aquáticas presentes em um rio em pelotas foram analisadas quanto a concentração de metais pesados. foram identificadas seis espécies onde nestas analisou-se teores de metais pesados em cada e se este metal concentrava-se mais nas raízes ou na parte aérea. Todas as plantas analisadas apresentaram potencial de uso em fitorremediação e com concentração de metais nas raízes.	Demarco, C. F..
Dissertação, 2017	Potencial das conchas de moluscos para o tratamento da drenagem ácida de mineração de carvão.	Utilização de conchas de moluscos para diminuir concentrações de metais pesados na água.	Florianópolis - SC	Potencial das conchas de moluscos para tratar DAM, sendo usados para reduzir as concentrações de ferro, alumínio e manganês. Os melhores tratamentos foram com grãos de concha bruta, selecionadas como agentes de neutralização. Bem eficiente ao se tratar com 2mg/l de calcita biogênica onde 100% do alumínio foi removido, 88,8% do Fe e 82% do manganês.	Gimenez, A.R.

Artigo, 2017	Potencial biotecnológico da microalga <i>Synechococcus nidulans</i> para tratamento de águas ácidas de drenagem da região de mineração em Candiota - RS	Experimento com a microalga <i>Synechococcus nidulans</i> visando avaliar sua atividade em condições favoráveis à biorremediação de águas ácidas de mineração.	Candiota - RS	Potencial de biorremediação da microalga SYNECHOCOCUS na mineração; onde foi utilizada a microalga <i>Synechococcus nidulans</i> em efluente bruto de mineração e efluente autoclavado com nitrato de sódio e bicarbonato de sódio, mas é baixa a resistência em pH de DAM baixo. Constatou-se o crescimento e a alcalinização do meio de cultivo para os experimentos com diferentes valores de pH quando iniciados em 6,0 para 4,0 não houve crescimento expressivo, já no pH 1,5 a microalga não sobreviveu.	Duarte Filho P.F.M.; Dias, C.S. .
Artigo, 2018	Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment	Revisão de estudos sobre wetlands construídos para extração de metais em efluentes ácidos, com destaque para vegetações, tipos de substratos e resultados de eficiência.	Dados de pesquisas no Canadá, Alemanha, EUA, Malásia, Zimbábue e outros	Revisão de diferentes artigos utilizando wetlands para águas residuais de extração de variados minerais, que geram pirita em sua maioria, onde o uso de pântanos construídos visa melhorar a qualidade da água por meio de processos biológicos (microrganismos e plantas), químicos e físicos. Os componentes típicos de wetlands são: fundo de solo, vegetação, superfície de água e pode conter também no meio rochas, cascalhos ou outros materiais. Os wetlands podem ser superficiais ou subsuperficiais, onde os melhores são os subsuperficiais. As principais limitações para o tratamento de DAM por Wetlands é o efeito de toxicidade que os metais pesados produzem em plantas e microrganismos.	Pat-Espadas, A.M; Portales, R.L; Amabilis-Sosa, L.E., Gomez, G. & Vidal, G.

Artigo, 2019	Bioremediation of heavy metals by microbial process	Revisão sobre biorremediação de hidrocarbonetos por meio de modificação genética de microorganismos para reduzir os contaminantes	Rajasthan, Índia	<p>Utilização de microrganismos na biorremediação para economia de tempo e por ser difícil remediar solos. No entanto, há uma limitação do processo de biorremediação porque vários microrganismos não são capazes de converter metais pesados tóxicos em suas formas não tóxicas e, portanto, resultam em efeitos inibitórios na atividade microbiana. Assim, para aumentar o potencial de biodegradação de microrganismos, a engenharia genética está sendo utilizada. Os métodos biológicos usando as metodologias <i>in situ</i>, têm potencial para desenvolvimento por micróbios geneticamente modificados (GEMs). Por essa razão, a biorremediação é uma forma bem organizada e barata de lidar com águas subterrâneas e solos contaminados.</p>	Verma, S. e ,Kuila, A.
Tese, 2020	Tratamentos de água fluvial contaminada com drenagem ácida de mineração (DAM) visando a remoção de sulfato: bioestimulação de bactérias redutoras de sulfato e eletrocoagulação	Bioestimulação das Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS), e a eletrocoagulação (EC)	Florianópolis - SC	<p>A tese trata da bioaumentação de bactérias redutoras de sulfato e essa bioestimulação foi realizada por meio dos preparos quitina comercial e no outro casca de camarão, sendo que a casca de camarão foi mais eficiente e isso após 41 dias e por meio de outra técnica. eletroredução em 5h removeu 70% dos sulfatos e com <math>65\text{A.m}^{-2}</math> de exposição contínua.</p>	Rodrigues, C.

Artigo, 2021	Co-treatment of acid mine drainage and municipal wastewater effluents: Emphasis on the fate and partitioning of chemical contaminants.	Mistura de esgoto doméstico em águas de mineração	Brits, África do Sul	Mistura de resíduos da coleta municipal e águas da mineração de carvão, sendo que a partição é 1:7 de Dam por esgoto como pré tratamento, pois depois foi utilizado cal e biorremediação na etapa seguinte. Sendo que em aproximadamente 95% de Fe, Al, Mn e Zn e 92% de sulfatos foram reduzidos com a mistura. Foram analisados o efeito do tempo, temperatura e a razão (quantidade de cada efluente) para melhor tratamento. Mas na visão de aplicação real se torna inviável devido a quantidade de esgoto comparada com água ácida.	Masindi , V.; Foteinis, S.; Chatzisymeon, E.
Artigo, 2021	Performance of microbial community dominated by <i>Bacillus</i> spp. in acid mine drainage remediation systems: A focus on the high removal efficiency of $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Al}^{3+}$ , $\text{Cd}^{2+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Pb}^{2+}$ , and $\text{Sr}^{2+}$ .	Uso de cepas de <i>Bacillus</i> spp. em reatores demonstrou eficiência na redução de sulfatos, aumento do pH e remoção de metais pesados.	Cape Town, África do Sul	A drenagem de mina foi tratada com diferentes espécies de <i>Bacillus</i> sp. em reator, mostrou-se eficiente, com redução de sulfatos e aumento do pH, onde a proliferação destes com adição de diferentes tipos de substratos, reduziu também a quantidade de metais pesados. O consórcio de várias bactérias foi eficiente na remoção de vários metais pesados dentro do biorreator, fazendo com que muitos metais decantassem.	Akinpelu, E.; Ntwampe, S.K.O.; Foddo-Kenku, E.; Nchu, F.; Angadam, J.O.
Artigo, 2022	Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation and valorisation in circular economy: A review	Revisão de diferentes métodos de tratamento de drenagem de mina	África do Sul	Trata sobre o uso de técnicas mais ecológicas ou consórcio de técnicas para reduzir os impactos ambientais das Drenagens ácidas de minas (DAM)	Masindi, V., Foteinis, S., Renforth, P., Ndiritu, J., Maree, J.P., Tekere, M., Chatzisymeon, E

Artigo, 2022	Alternative Low-Cost Treatment for Real Acid Mine Drainage: Performance, Bioaccumulation, Translocation, Economic, Post-Harvest, and Bibliometric Analyses	Utilização de duas espécies de plantas para fitorremediação de águas contaminadas por DAM de mineração de carvão	Lampung Selatan, Indonesia	A utilização de <i>Eichhornia crassipes</i> e <i>Pistia stratiotes</i> para o tratamento de DAM. Os resultados indicaram que a DAM continha inicialmente Fe, Mn, Al, Ca e Mg. <i>E. crassipes</i> reduziu com sucesso esses teores em até 69%, enquanto <i>P. stratiotes</i> removeu até 62%, indicando que são plantas com grande potencial de fitorremediação	Wibowo, Y.G.; Safitri, H.; Malik, I.B.I.; Priyanto, S. e Priyanto, S.
Artigo, 2023	Highly Efficient Modified Constructed Wetlands Using Waste materials for natural Acid mine Drainage treatment	Utilização de wetlands para tratamento de efluentes de mineração de carvão, usando materiais residuais para construção.	Lampung Province, Indonesia	O estudo mostrou uma inovação eficiente ao modificar o Wetland, onde a incorporação da absorção vegetal por meio da fitorremediação, facilitada pela <i>Eichhornia crassipes</i> , é potencializada pela ação de precipitação do CaO derivado de resíduos de conchas. Aprimoramentos adicionais são obtidos com as propriedades de adsorção do biochar, aliadas à capacidade de filtração do cascalho e da areia.	Wibowo, Y.G.; Wijaya, C.; Yudhoyono, A.; Sudibyo; Yuliansyah, A.T.; Safitri, H.; Tsabitah, N.; Nur'ani,H.; Khairurrijal, K. and Petrus, H.T.B.M.

Quadro 02. Dados de estudos referentes à aplicação de técnicas de tratamento alternativas ao uso de produtos químicos em áreas impactadas por drenagem ácida de mina.

Fonte: autor (2025)

Já os pântanos construídos ou wetlands, são sistemas artificiais projetados para tratar efluentes contaminados por meio da interação entre plantas, microrganismos e substratos físico-químicos. Embora não seja uma tecnologia recente, seu uso tem se expandido em razão da eficácia na remoção de metais pesados, da compatibilidade com áreas remotas e do baixo custo de operação quando comparado a sistemas ativos (Pat-Espadas et al., 2018).

Em sua revisão, Pat-Espadas et al. (2018) analisaram experiências em diversas regiões mineradas, incluindo Estados Unidos, Alemanha, Canadá, Malásia e Zimbábue, e constataram um padrão comum: pH extremamente ácido e alta concentração de metais como zinco, cobre, manganês e alumínio. Essas condições afetam negativamente microrganismos e espécies vegetais, comprometendo a eficácia de alguns sistemas. Os autores observaram que wetlands construídos são amplamente utilizados devido à sua comprovada eficiência na remoção de ferro, à resiliência frente a flutuações de vazão e ao apelo estético e ecológico na paisagem.

Masindi et al. (2022), analisou vários estudos e formas de reaproveitar metais dos efluentes de mineração já estudados no mundo, chegando à conclusão de que a combinação de tratamentos passivos e ativos seria uma ótima forma de tratar essas áreas e dependendo da técnica aplicada retirar alguns metais para reuso. Também analisou que as técnicas de não geração de drenagem deveriam ser mais estudadas e também aplicadas, como forma de evitar danos ambientais.

A Figura 4 ilustra um modelo simplificado de wetland horizontal, onde a DAM percorre diferentes compartimentos: um canal com calcário para neutralização inicial, seguido por zonas de substrato, áreas com plantas macrófitas e, por fim, lagoas com macroalgas, que promovem a remoção de metais residuais e o polimento do efluente. A imagem representa a sucessão de processos físicos, químicos e biológicos que, integrados, reduzem a acidez e os contaminantes do efluente.

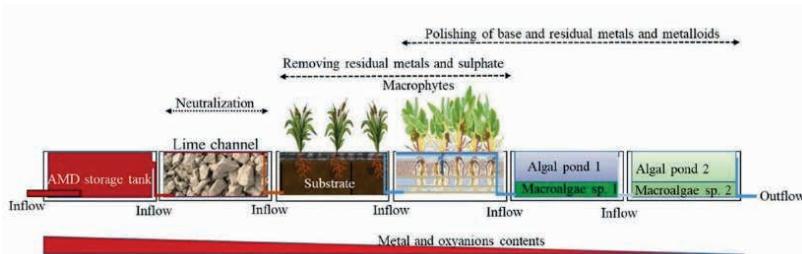


Figura 4. Esquema de tratamento passivo de DAM com barreira de calcário e macrófitas aquáticas.

Fonte: Retirada do artigo de Masindi et al., 2022.

Pat-Espadas et al. (2018) também destacam que a eficiência na remoção de metais varia conforme o tipo de fluxo: sistemas de fluxo subsuperficial apresentam melhores resultados para alumínio, manganês, níquel e zinco, enquanto ambos os tipos são eficazes para ferro. A seleção de materiais de suporte (como calcário, cascalho, areia e bentonita) e de matéria orgânica complementar (como esterco bovino, carvão ou escórias industriais) é fundamental para estimular a atividade microbiana, promover alcalinização e facilitar a precipitação de metais.

A presença de plantas nativas bem adaptadas ao ecossistema local é igualmente relevante: evita competição biológica, garante estabilidade ecológica e melhora a absorção de contaminantes. A integração entre plantas, substratos e microbiota local é o que confere aos wetlands sua capacidade sinérgica de tratamento.

Complementando essa abordagem, o estudo de Wibowo et al. (2023) propõe um modelo de wetland vertical experimental baseado em caixas de vidro (Figura 5), simulando camadas de areia, cascalho, biochar (carvão ativado por pirólise) e conchas calcinadas (CaO). Na superfície, foram inseridas plantas aquáticas (*Eichhornia crassipes*) para promover fitorremediação. A DAM utilizada foi coletada de uma mina abandonada na Indonésia, com pH 2,87 e concentração de ferro de 263 mg/L.

Após 7,5 dias de exposição no sistema, os resultados indicaram remoção de 90% do ferro, redução de sulfatos e aumento do pH para 6,97. Os autores atribuíram a eficácia à combinação de adsorção pelo biochar, precipitação química com conchas calcinadas, filtração física pelas camadas minerais e absorção radicular pelas plantas. Além disso, o estudo observou que tanto o biochar quanto as conchas atuaram na captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, apontando para benefícios colaterais no controle de gases de efeito estufa.

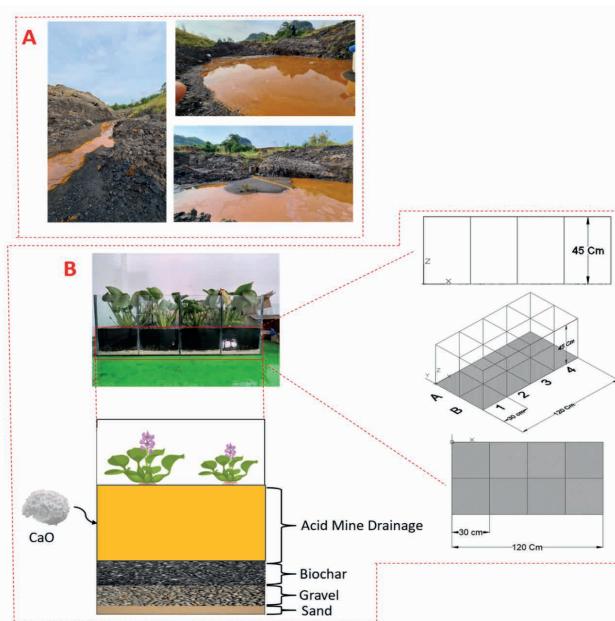


Figura 5. (A) DAM de mina de carvão abandonada na Indonésia; (B) Wetland construída em escala laboratorial com camadas de biochar e plantas aquáticas em fluxo vertical.

Fonte: Adaptado de Wibowo et al., 2023.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tratamento de efluentes de forma passiva é uma opção ao uso de reagentes químicos, pois além de ser melhor ao meio ambiente por usar componentes presentes no local ou resíduos da indústria ou pecuária é possível de ser aplicado em áreas remotas e sem equipe diária para tratar. Os inúmeros métodos passivos de tratamento de DAM abordados na revisão focaram em soluções aplicáveis em áreas mineradas abandonadas, de difícil acesso e sem infraestrutura para operação contínua. Frente aos altos custos e limitações dos sistemas ativos, alternativas como a biorremediação, os wetlands construídos, as barreiras reativas e o uso de resíduos industriais ou naturais demonstraram potencial técnico e ambiental relevante.

A revisão evidenciou que métodos passivos são especialmente eficazes em condições de baixo fluxo hidráulico e permitem operação duradoura, com manutenção mínima, alcançando vida útil de até 20 anos. Além disso, técnicas conjugadas, que combinam diversos mecanismos de retenção, precipitação e transformação química e biológica, mostraram melhores resultados na remoção de diferentes metais pesados.

A aplicação de wetlands construídos com diferentes substratos — como calcário, biochar, cascalho e conchas calcinadas, associada ao uso de plantas nativas hiperacumuladoras e microrganismos adaptados, revelou-se promissora. O estudo de Wibowo et al. (2023), por exemplo, ilustra com clareza a eficiência desse tipo de sistema em campo experimental, com significativa redução de ferro e recuperação do pH. A proposta de incluir um canal de polimento final com calcário na saída do sistema, como reforçado nesta revisão, amplia a segurança do tratamento e complementa a ação das etapas anteriores.

Diante disso, conclui-se que a adoção de tecnologias passivas, sustentáveis e adaptadas às características locais representa uma estratégia viável e urgente para mitigar os impactos da mineração de carvão, especialmente nas regiões onde os passivos ambientais continuam sem solução. Investir em pesquisas aplicadas, testes de campo e políticas de incentivo à remediação biológica pode transformar modelos pontuais em soluções escaláveis, com ganhos para a qualidade ambiental, para a saúde pública e para a recuperação de ecossistemas historicamente degradados.

## REFERÊNCIAS

AKCIL, A.; KOLDAS, S. **Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies.** Journal of cleaner production, v. 14, n. 12-13, p. 1139-1145, 2006.

AKINPELU, E.; NTWAMPE, S.K.O.; FODDO-KENKEU, E.; NCHU, F.; ANGADAM, J. O. **Performance of microbial community dominated by *Bacillus* spp. in acid mine drainage remediation systems: A focus on the high removal efficiency of SO<sub>4</sub> 2-, Al<sup>3+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, and Sr<sup>2+</sup>.** Heliyon, p. e 07241, 2021.

ANDERSEN, S. L. F.; FLORES, R. G.; MADEIRA, V. S.; JOSE, H. J.; MOREIRA, R. F. **Synthesis and Characterization of Acicular Iron Oxide Particles Obtained from Acid Mine Drainage and Their Catalytic Properties in Toluene Oxidation.** Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, n. 2, p. 767-774, 2012.

ÁVILA, D. C. J.; SPAGIARI, M. S.; FOSSATTI, J.; BIZANI, D. **Análise do crescimento de microrganismos em drenagem ácida de mina com ajuste de pH.** Cippus, v. 2, n. 2, p. 179-190, 2013.

BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável:** desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2001.

BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. **Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração.** Série Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, 2002.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030):** geologia, mineração e transformação mineral. 2010. 157p. (Texto para consulta pública).

BRASIL. Ministério Público Federal. **Ação Civil Pública nº 93.800.** Florianópolis: MPF, 2010.

CAMARGO, F.A.O. et al. Uso de microorganismos para remediação de metais. In: CERETTA, C.A., SILVA, L.S.; REIHCERT, J.M. (Ed.). **Tópicos Especiais em Ciências do Solo.** Viçosa: Editora SBCS, 2007, v5., p.468-496.

DEMARCO, C. F. **Seleção de macrófitas aquáticas com potencial de fitorremediação no arroio Santa Bárbara, município de Pelotas/RS.** 2016. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. 2016.

DUARTE FILHO, P. F. M.; DIAS, C. S. **Potencial biotecnológico da microalga *Synechococcus nidulans* para tratamento de águas ácidas de drenagem da região de mineração em Candiota – RS.** Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa-Congrega Urcamp, p. 351-366, 2017.

FERRAZ, F. **Aperfeiçoamento técnico dos serviços de engenharia em atividades de mineração:** 2o trabalho, 3o relatório, disposição de rejeitos. Belo Horizonte, 1992. 62 p

GALHARDI, J.A.; SOLDERA, B.C. **Efeitos da drenagem ácida de mina sobre a qualidade das águas subterrâneas:** preceitos legais e técnicos. Holos Environment (2018), 18(1): 87-109. <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12247/8214>

GIMENEZ, A. R. **Estudo do potencial das conchas de moluscos para o tratamento da drenagem ácida de mineração de carvão.** 2017. 143f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2017.

GUPTA, V. K.; et al. **Recent advances in the use of industrial waste materials for the treatment of acid mine drainage.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 12345-12360, 2021.

HAN, X.; ZHANG, D.; YAN, J.; ZHAO, S.; LIU, J. **Process development of flue gas desulphurization wastewater treatment in coal-fired power plants towards zero liquid discharge:** Energetic, economic and environmental analyses. *Journal of Cleaner Production*, v. 261, p. 121144, 2020.

INFO ESCOLA, consulta realizada em maio de 2025. <https://www.infoescola.com/geografia/mineracao-de-carvao-no-brasil/> IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas** – Relatório de Pesquisa. 46 páginas. 2012.

KREBS, A. S. J.; AMBONI, T. M.; ROMANO NETO, R.; ZANUZ, M.; GOMES, C. J. B.; AMARAL, J. E. **Monitoramento das bocas de minas abandonadas com drenagens ácidas, na área correspondente à Bacia Carbonífera de Santa Catarina**. In.: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, p. 1–16, 2010.

LEMOS, J. L. S.; CARLOS, M. C.; FARIAS, Y. P. T. M. M.; SANTOS, R. L. C. D. **Revisão acerca da utilização de microorganismos na biorremediação de rejeitos industriais contendo metais pesados**. Série Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, v. 43, 2008.

LINS, F. A.; RIZZO, A. C.; CUNHA, C. D.; LIMA, F. M. Tecnologias para a sustentabilidade ambiental. Melfi A. et al. (Orgs) Recursos Minerais no Brasil: Problemas e Desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, p. 282-287, 2016.

MACAN, J. M.; TEIXEIRA, G. A.; PICH, C. T.; PEDROSA, R. C.; FÁVERE, V. T.; GEREMIAS, R. **Avaliação da toxicidade de drenagem ácida de mina de carvão, utilizando parâmetros físico-químicos e bioensaios**. Revista Brasileira de Biociências, v. 10, n. 3, p. 275–280, 2012.

MASINDI, V.; FOTEINIS, S.; CHATZISYMEON, E. **Co-treatment of acid mine drainage and municipal wastewater effluents: Emphasis on the fate and partitioning of chemical contaminants**. Revista Journal of hazardous materials, v.421. 2021. Edinburgh, United Kingdom.

MASINDI, V., FOTEINIS, S., RENFORTH, P., NDIRITU, J., MAREE, J.P., MEMORIA, T., CHATZISYMEON, E. **Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review**. Ecological Engineering, 2022.

MELLO, J. M.; DUARTE, L. A.; LADEIRA, A. C. Q. **Biorremediação de drenagem ácida de minas: uma revisão**. Revista de Engenharia Ambiental, v. 11, p. 49-62, 2014.

NAIDU, G.; RYU, S.; THIRUVENKATACHARI, R.; CHOI, Y.; JEONG, S.; VIGNESWARAN, S. **A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage**. Environmental pollution, v. 247, p. 1110-1124, 2019.

PAT-ESPADAS, A. M.; PORTALES, R. L.; AMABILIS-SOSA, L. E.; GÓMEZ, G.; VIDAL, G. **Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment**. Water, v. 10, n. 11, p. 1685, 2018.

PORTAL MINERAÇÃO, consulta em maio de 2025 <https://portaldamineracao.com.br/sobre-a-mineracao/historia/>

RITCEY, G.M. **Tailings Management Problems and Solutions in the Mining Industry**. Elsevier, Amsterdam, 1989.

RODRIGUES, C. **Tratamentos de água fluvial contaminada com drenagem ácida de mineração (DAM) visando a remoção de sulfato: bioestimulação de bactérias redutoras de sulfato e eletrocoagulação**. 2020. 171f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2020.

SATO, Y.; HAMAI, T.; HORI, T.; HABE, H.; KOBAYASHI, M.; SAKATA, T. **Year-round performance of a passive sulfate-reducing bioreactor that uses rice bran as an organic carbon source to treat acid mine drainage**. Mine Water and the Environment, v. 37, n. 3, p. 586-594, 2018.

SKOUSEN, J.; ROSE, A.; GEIDEL, G.; FOREMAN, J.; EVANS, R.; HELLIER, W. **Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage**. National Mine Land Reclamation Center, Morgantown, v. 131, 1998.

SKOUSEN, J. G.; ZIEMKIEWICZ, P. F.; MCDONALD, L. M. **Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies**. The Extractive Industries and Society, v. 6, n. 1, p. 241-249, 2019.

SOBRAL, L. F.; PAIVA, C. A. O.; SANTOS, F. C. **Adubação organomineral no milho associada a microrganismos solubilizadores de fósforo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 137), 19p., 2018.

TANG, H.; XIANG, G.; XIAO, W.; YANG, Z.; ZHAO, B. **Microbial mediated remediation of heavy metals toxicity: mechanisms and future prospects**. Frontiers in plant Science, vol.15. Suíça, julho 2024.

TRINDADE, R.B.E; BARBOSA FILHO, O. **Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente**. editores: Roberto de Barros Emery Trindade (CETEM) e Olavo Barbosa Filho (MCT PUC-Rio). Rio de Janeiro – RJ – maio de 2002.

VERMA, S.; KUILA, A. **Bioremediation of heavy metals by microbial process**. Environmental technology & Innovation, vol 14. Rajasthan, Índia, 2019.

WIBOWO, Y.G.; SAFRI. M.; WIJAYA, C.; HALOMOAN, P.; YODHOYONO, A. **Constructed Wetlands for Treatment of Acid Mine Drainage: A Review**. Jurnal Presipitasi, Vol. 19, Nº2, 2022.

WIBOWO, Y.G.; WIJAYA, C.; YODHOYONO, A.; SUDIBYO; YULIANSYAH, A.T.; SAFITRI, H.; TSABITAH, N.; NUR'ANI, H.; KHAIRURRIJAL, K.; PETRUS, H.T.B.M. **Highly Efficient Modified Constructed Wetlands Using Waste Materials for Natural Acid Mine Drainage Treatment.** Revista Sustainability, vol 15, 2023.

ZHENG FU, B. I. A. N.; INYANG, H. I.; DANIELS, J. L.; FRANK, O. T. T. O.; STRUTHERS, S. **Environmental issues from coal mining and their solutions.** Mining Science and Technology, v. 20, n. 2, p. 215-223, 2010.