

## REÚSO DE EFLUENTE TRATADO COMO FONTE ALTERNATIVA DE ÁGUA PARA ATIVIDADES MINERÁRIAS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.15.24.II-005>

João Pedro Machado de Lima (\*), Miriam Cristina Santos Amaral

\* Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, [jpedro\\_md@hotmail.com](mailto:jpedro_md@hotmail.com)/[jpedromdl@ufmg.br](mailto:jpedromdl@ufmg.br)

### RESUMO

Embora globalmente a mineração não seja o maior consumidor de água, ela tem um impacto significativo em regiões onde há escassez hídrica. Com mais de 40 mil operações de mineração em todo o mundo, as empresas do setor têm buscado soluções para melhorar a gestão da água, incluindo o reúso de efluentes tratados. O objetivo principal deste trabalho é analisar o reúso de efluentes tratados como uma fonte alternativa de água para a mineração, por meio de casos de sucesso em diferentes regiões. Para tal, utilizou-se metodologia qualitativa e exploratória, com base em uma revisão bibliográfica de fontes acadêmicas e relatórios. A pesquisa identificou várias formas de reúso de efluentes tratados na mineração, tanto em nível interno quanto externo, com exemplos de aplicação bem-sucedida em países como Austrália, Peru e Mongólia. O trabalho discute outras fontes alternativas de água para a mineração, como águas subterrâneas, pluviais e a dessalinização, mas aponta o reúso de efluentes tratados como uma solução mais viável devido ao menor consumo de energia e menores custos de investimento. Identificou-se, ainda, que o reúso de efluente tratado pode ajudar a minimizar o impacto ambiental negativo das mineradoras, melhorar a sustentabilidade e reduzir conflitos com as comunidades locais em áreas onde a água doce é limitada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reúso de efluente tratado, Mineração verde, Novas fontes de água, Sustentabilidade, Escassez hídrica.

### INTRODUÇÃO

Embora a mineração não seja um dos maiores setores consumidores de água em escala global, ela pode frequentemente representar um consumidor significativo de água localmente nas regiões onde ocorre, especialmente quando se entende que boa parte está presente em regiões consideradas de escassez hídrica. De acordo com a *Global Metals and Mining Industry Coverage*, hoje o mundo tem mais de 40.000 unidades de atividades minerárias, incluindo minas, projetos e instalações de processamento. O ranking é liderado pelos EUA e Canadá (33%), representantes da América do Norte, seguidos de perto por países da Ásia/Pacífico (31,4%), depois América Latina (13,6%), Europa e Rússia (11,2%) e, finalmente, nações da África/Oriente Médio (10,8%) (S&P Capital IQ, 2024).

Em meio ao crescente número de atividades minerárias, as empresas de mineração estão demonstrando preocupações com o problema da escassez de água, ao mesmo tempo em que buscam melhorar as práticas de gestão da água em suas operações. As empresas mineradoras têm focado seus esforços na redução da pegada hídrica, na reutilização da água nos processos internos e no tratamento da água residual para níveis melhores, visando capturar e reciclar toda a água disponível.

Para suprir a crescente demanda, diferentes fontes de água estão se tornando ainda mais populares na tentativa de abastecer as operações minerárias. Neste artigo, os autores focam em apresentar como o reúso de efluente tratado surge como possibilidade para complementar a demanda hídrica das empresas de mineração, por meio de casos de sucesso reportados no mundo.

### OBJETIVOS

#### Geral

Entender as possibilidades de reúso de efluente tratado como fonte alternativa de fonte hídrica nas atividades minerárias por meio de casos de sucesso ao redor do mundo.

#### Específicos

- Apresentar as formas com que o setor da mineração interfere nos recursos hídricos da área em que atua.
- Identificar as diferentes modalidades de reúso de efluente tratado existentes na literatura.
- Contextualizar como o reúso surge como uma alternativa de nova fonte de água e indicar pontos que o tornam como vantajosa frente às demais existentes.

## **METODOLOGIA**

A natureza da presente pesquisa é básica, com abordagem qualitativa, tendo em vista que seus resultados são baseados em interpretações indutivas sem utilizar ferramentas estatísticas ou mesmo numéricas. Já com relação aos fins, entende-se que os autores primaram por uma pesquisa exploratória, por sua natureza de sondagem. Com relação aos meios de investigação, a pesquisa é bibliográfica, visto que o estudo foi desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, jornais, sítios eletrônicos, ou seja, material disponível para acesso pelo público em geral. As definições foram aplicadas mediante as classificações estabelecidas por Moresi (2003).

Para a busca de material a ser utilizado como base para o estudo, foram utilizadas as ferramentas e sítios eletrônicos mais usuais: Google Scholar, Science Direct e Periódicos da CAPES. Foram aplicadas as seguintes palavras-chave nas buscas, tanto em português quanto em inglês: “mineração”, “reúso de efluente tratado”, “*mining*”, “*wastewater reuse*” e “*reuse in mining activities*”.

## **RESULTADOS**

### **Interferência da mineração em recursos hídricos**

Os recursos hídricos são o compartimento ambiental mais vulnerável aos impactos diretos da mineração (Santana *et al.*, 2020). A indústria de mineração é um dos principais contribuintes para a poluição da água, sendo o efluente a principal fonte dessa poluição. Os volumes de resíduos sólidos e efluentes gerados pelas atividades de mineração têm um impacto direto na qualidade da água circundante e são potenciais fontes de poluição do solo e da água, especialmente se não forem devidamente tratados.

Os efluentes líquidos de mineração são problemáticos devido à ocorrência de metais pesados, alta temperatura, concentração de sólidos suspensos e, especialmente, pelo nível de acidez, que têm o potencial de afetar a qualidade da água que receberá o efluente, bem como do solo e de água subterrânea em casos de eventuais vazamentos. Para reduzir a chance de contaminação, é possível construir barragens de evaporação ou implementar um processo de tratamento mais eficiente para alcançar o nível de qualidade definido pela agência ambiental regulamentadora.

A drenagem ácida de mina (DAM) é uma das principais fontes líquidas de poluição. A DAM é uma forma de água residual, caracterizada por baixo pH, altos teores de Sólidos Totais Dissolvidos (SDT), altos níveis de sulfatos e elevados teores de metais pesados, como Co, Cr, Cu, Fe, Mn e Ni, sendo um contribuinte significativo para a poluição da água residual (Santana *et al.*, 2020). A formação da DAM é resultado de processos físicos, químicos e biológicos que influenciam a interação entre os contaminantes nas águas das minas e o solo ao redor (Satapathy *et al.*, 2009). Assim, as atividades de mineração podem acelerar os processos naturais de dissolução de metais e impactar negativamente o meio.

A poluição, especialmente das águas superficiais, tem aumentado nos últimos anos e se tornou um grave problema ambiental em todo o mundo, em paralelo às mudanças climáticas, que são influenciadas pela água em geral. Na China, por exemplo, a exploração e a utilização de recursos minerais têm causado altos níveis de poluição da água (Sun *et al.*, 2023). É importante focar nisso porque a China está sofrendo com a poluição das águas superficiais e a escassez de água pela poluição, levantando preocupações sobre a segurança da água e a saúde ambiental e humana.

Outro impacto potencial causado pela operação de mineração é a redução do nível do lençol freático. Considerando o processo completo de extração mineral, há inicialmente a necessidade de baixar o nível do lençol freático durante a abertura da cava, com a formação de barragens para conter sedimentos e depósitos de rejeitos, bem como para tratar efluentes.

### **Mudança de paradigma de reúso de efluente tratado na mineração**

A mudança de paradigma na gestão de águas residuais envolve tratar a geração e manejo de efluentes não como um ponto de custo ou mesmo apenas atendimento aos requisitos dos órgãos ambientais, mas como um recurso valioso e uma potencial fonte de receita. Essa nova perspectiva enfatiza a importância de se investir em tecnologias avançadas de tratamento e estratégias inovadoras de reutilização para transformar águas residuais em uma fonte viável de água nova, assim como de energia e outros recursos.

Ao aproveitar o valor financeiro existente ao redor da temática de efluentes, as indústrias podem reduzir os impactos ambientais negativos citados no item anterior, melhorar a sustentabilidade e gerar benefícios econômicos para si. Essa mudança de paradigma não só se alinha com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (especialmente o ODS 6 – Água potável e saneamento), como também incentiva o desenvolvimento de economias circulares, em que os recursos são continuamente reutilizados e reciclados.

Mesmo que pareça inalcançável, existem casos bem-sucedidos de reutilização de águas residuais tratadas ao redor do mundo em mineração. As aplicações mais comuns são irrigação, agricultura, indústria e até água potável para comunidades locais.

### **Formas de reúso na mineração**

A gestão da água apresenta-se como uma alternativa para compreender as necessidades e controlar a aplicação de água, visando reduzir perdas e otimizar seu uso. Esse entendimento começa com o sistema existente da mina para produzir um modelo preciso de água no local através de tecnologias ou métodos eficazes de medição de água (Gunson *et al.*, 2012). Durante esse processo, diferentes decisões relacionadas à água surgirão, podendo envolver três fatores principais, conforme apresentado por Saenz e Ostos (2021): fonte de água, papel da água e gestão da água. As empresas de mineração devem, portanto, encontrar o equilíbrio e a combinação desses três fatores de acordo com o contexto e as circunstâncias do projeto.

Atualmente, a reutilização de águas residuais na indústria de processamento mineral pode ser dividida em duas estratégias principais: reúso interno e reúso externo. O reúso interno pode ocorrer quando há reutilização das águas residuais produzidas na planta de processamento mineral, dentro do mesmo fluxo de processamento mineral. Outros exemplos são para utilização em descargas de banheiros e lavagem de caminhões e ambientes. Já a modalidade externa ocorre quando, por exemplo, há aplicação de efluente tratado de indústrias minerárias para agricultura, o que já apresenta casos por diferentes partes do mundo.

Mercuri *et al.* (2005) identificaram que a água produzida nas atividades de mineração de carvão na Austrália foi eficaz no plantio sem impactar negativamente no crescimento das espécies. A Austrália apresenta outros casos de sucesso, como a construção de uma tubulação de 16km pela empresa Xstrata para compartilhar água entre várias indústrias, tanto de fontes novas quanto de reúso, principalmente para irrigar pastagens perenes (Lévy *et al.*, 2006). Semelhante, foi identificado por Rimawi *et al.* (2009), que estudaram uma região de clima árido na Jordânia, com aplicação de efluente tratado de mina de fosfato para irrigação de variadas espécies de vegetais e grãos, concluindo que águas residuais de minas podem ser usadas para irrigação.

A Austrália apresenta outros casos de sucesso, como a construção de uma tubulação de 16km pela empresa Xstrata para compartilhar água entre várias indústrias, tanto de fontes novas quanto de reúso, principalmente para irrigar pastagens perenes (Lévy *et al.*, 2006). As minas Queensland Alumina, Cadia Hill e a mina de carvão Commodore usam efluentes tratados de estações de tratamento de esgoto próximas para seu abastecimento de água (Gunson *et al.*, 2012).

Essa relação é importante por surgir como uma forma de tornar o balanço hídrico positivo das minas, bem como por gerar impactos positivos nas relações com comunidades. Isso ocorre porque torna possível com que as empresas comercializem com outras, com preços até competitivos, ao invés de despejar efluentes na natureza. Além disso, ao gerar água para reúso, tem-se menor necessidade de consumo de fontes superficiais e subterrâneas, o que gera menos conflito por uso do recurso.

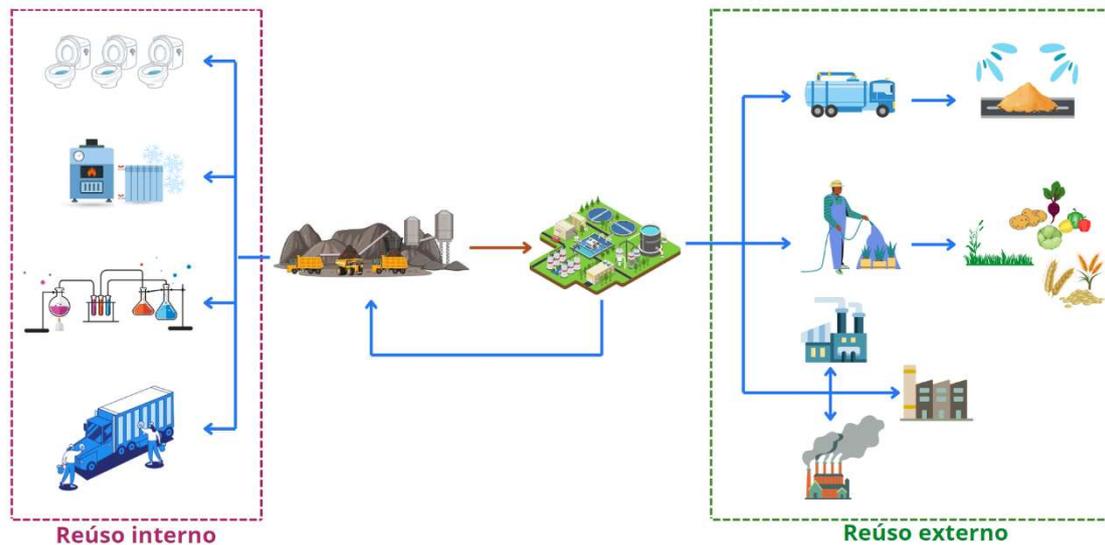
Fraser & Kunz (2018) apresentam em sua pesquisa dois casos interessantes de aplicação de reúso. No Peru, o uso de águas residuais municipais tratadas proporcionou à mineradora acesso a uma fonte de água que não estava incluída nas alocações hídricas destinadas à agricultura, evitando a competição com os agricultores pelo suprimento escasso de água doce. Isso ajudou o projeto a expandir e a evitar conflito entre a empresa e a comunidade. Houve, com isso, ganhos econômicos e sociais significativos. Já na Mongólia, a introdução de reúso gerou ganhos em termos de gestão hídrica, ao possibilitar que a gestão de dados sobre o uso da água pelas minas fosse reportada de forma uniforme entre as empresas envolvidas e a comunidade, criando uma plataforma para o fortalecimento da governança hídrica a longo prazo. Isso facilitou a identificação de oportunidades para redução e otimização de consumo de água doce.

Gunson *et al.* (2012) apresentam, ainda, possibilidades menos nobres para o efluente tratado. Desde aplicação para resfriamento de sistemas elétricos, caldeiras ou mesmo para lubrificação de equipamentos mecânicos, a água de reúso pode ser utilizada. Após o devido tratamento, é possível, ainda, fazer uso para mistura de reagentes e para diluição em processos de flotação, por exemplo. Estes últimos casos são de grande importância direta para os empreendimentos, por terem impacto direto na redução de água nova para os processos industriais dentro da mina.

O reúso na indústria pode ser comprovada como possibilidade pelas aplicações ocorridas na planta de Wollongong, na Austrália. Por meio de um sistema de lodo ativado seguido de tratamento terciário, com uso UV e cloração, o efluente foi tratado e utilizado como lavagem de carvão em Port Kembla Coal. Ainda foi possível aplicar a água para irrigação de parques locais e do Wollongong Golf Club, bem como foram gerados volumes de água de ótima qualidade por microfiltração/osmose reversa para uso nas operações da fábrica de aço da BlueScope (Sydney Water, 2024). Por meio

desse sistema completo, não foi necessário descarte de efluente para a natureza, contribuindo positivamente para relação da empresa com o meio ambiente.

A Figura 1 ilustra as diversas formas de reúso envolvendo a mineração citadas neste tópico, com a separação das modalidades de reúso interno e externo.



**Figura 1 - Formas de reúso envolvendo a mineração. Fonte: Próprios autores, 2024.**

### Reúso frente a outras fontes alternativas de água

Cerca de 3% da quantidade total de água na Terra está disponível na forma doce (Musie & Gonfa, 2023). Uma pequena parte, 0,06%, dela está na forma de calotas polares congeladas ou geleiras, águas subterrâneas e água balneáveis, enquanto lagos e rios representam 0,3% da porção total de água doce (Musie & Gonfa, 2023). Analisando tais dados, é simples compreender a importância de tentar desenvolver novas fontes de água como estratégia para enfrentar a escassez hídrica, principalmente pela preferência de uso ser para uso humano e dessedentação animal, quando em situações de escassez mais intensa.

Na mineração, já são conhecidas novas fontes de água. Além das águas superficiais, as mais comuns, existem águas subterrâneas, pluviais, águas naturalmente contaminadas, águas do mar e fontes de terceiros, sendo esta última categoria predominantemente efluentes industriais ou municipais.

A água subterrânea é a classificação dada à água que flui abaixo da superfície do solo, na forma de aquíferos, em função das formações geológicas. Válido destacar que, se a captação de águas subterrâneas for superior à recarga por um longo período ocorre o fenômeno de superexploração, sendo possível que isso se transforme num esgotamento persistente das águas subterrâneas. Como consequência, os níveis dessas águas poderão diminuir, o fluxo natural também poderá ser afetado e a intrusão de água salgada poderá ser outro problema, a depender da região. Outro ponto de atenção em relação ao uso de água subterrânea é o longo tempo de residência que elas possuem em comparação às águas superficiais, numa escala de centenas a milhares de anos para se reestabelecer (Satapathy *et al.*, 2009).

Em contexto local, se a mineradora priorizar uso de águas subterrâneas como fonte principal, isso pode se tornar uma competição com os usuários domésticos. Diante desse cenário, cria-se um problema social devido ao impacto direto na disponibilidade hídrica, que atinge também os proprietários agrícolas. Por exemplo, na Mongólia, grande parte dos projetos minerários captavam água em aquíferos subterrâneos profundos para utilizar na operação. Essa foi uma das principais causas de mudança na legislatura local para implementar uma lei que proíbe o uso de águas subterrâneas para a mineração (Fraser & Kunz, 2018). Caso semelhante ocorreu no Chile, em que o governo lançou legislações restringindo o consumo de água de aquíferos para uso de atividades minerárias (Toro *et al.*, 2022).

A água da chuva, por sua vez, exige grandes reservatórios, não sendo um problema para as mineradoras, entretanto, se estiverem localizadas em áreas de seca, não poderão confiar suas operações nessa fonte como a principal. Esse método não é adequado em áreas de baixas ou escassas precipitações, além do fato de que as chuvas são imprevisíveis, ainda que a precipitação média anual de uma determinada área ajude na previsão. Destaca-se, ainda, que as precipitações sofrem grandes influências do aquecimento global e das alterações climáticas que muito tem avançado nos últimos anos.

A opção de utilizar água naturalmente contaminada também não é muito positiva devido à alta concentração de metais, em função de que a água já saturada com minerais pesados necessita de tecnologias avançadas de tratamento para extrair água útil, o que pode requerer investimentos financeiros altos, a depender da qualidade da água a ser tratada para reaplicação.

Quando se pensa na dessalinização como alternativa, muitos fatores diminuem o interesse em aplicar o método, em especial os impactos ambientais gerados. Os impactos ambientais da dessalinização são atribuídos principalmente às descargas do concentrado, que podem prejudicar a qualidade da água costeira e afetar a vida marinha, se despejado diretamente no mar, exigindo tratamento. O concentrado é um grande dificultador em função de transportar resíduos líquidos, o que inclui produtos químicos utilizados no pré-tratamento, produtos de corrosão e retrolavagem. O processo de dessalinização também já é conhecido por ser intensivo no consumo de energia, o que exige melhorias nos sistemas de tratamento para recuperar parte da energia investida ou associar fontes de energia renovável aos sistemas de membranas, a fim de reduzir os custos econômicos (Crutchik & Campos, 2021). As membranas representam outro problema, em função dos custos de compra e do impacto ambiental do descarte, tendo em vista a vida útil dos sistemas.

Dito isso, o reúso de águas residuárias tanto industriais quanto domésticas apresenta diversas vantagens sobre as demais alternativas citadas. Em relação à dessalinização de água do mar, tem-se menor consumo energético para produção, bem como tem potencial viabilidade em zonas mais distantes do mar (Crutchik & Campos, 2021). Outra vantagem está na necessidade de investimento potencialmente baixo para modernizar a infraestrutura de estações de tratamento de efluentes já existentes (Mavhungu et al., 2020).

Além dessas vantagens, a aplicação de água de reúso apresenta pontos positivos por reduzir a pegada hídrica das estações de tratamento de efluentes, bem como diminuir os riscos de poluição dos recursos hídricos, enquanto ainda gera volumes do bem mais essencial para as atividades industriais e humanas: água. O compilado das vantagens e desvantagens apresentadas para cada possibilidade de fonte hídrica consta na Figura 2.

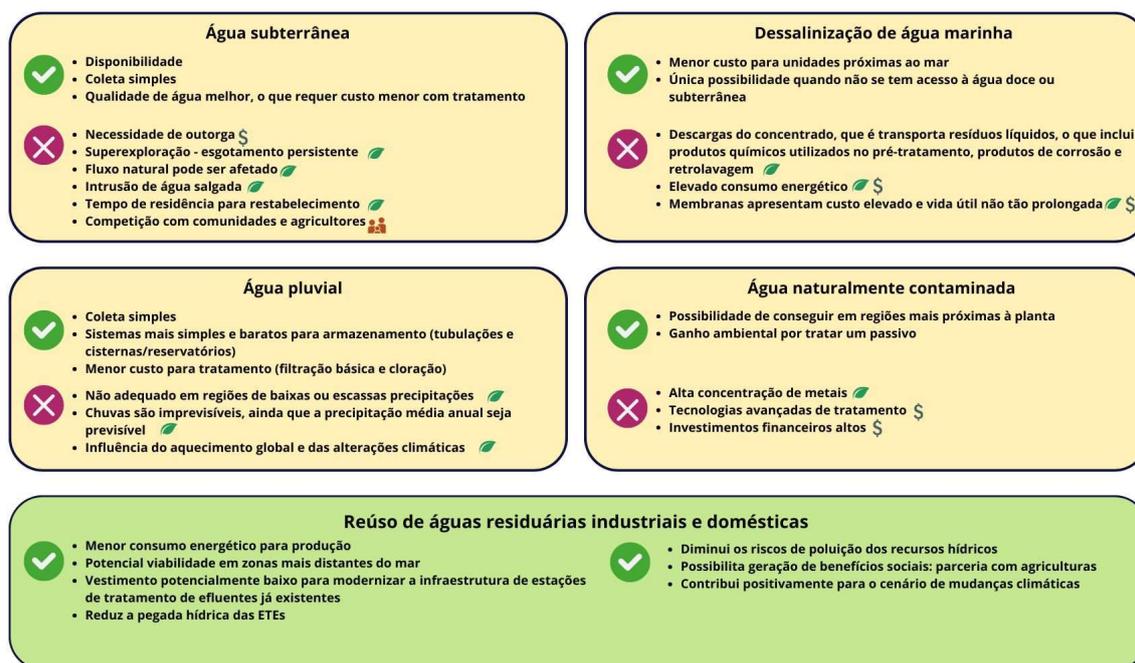


Figura 2 – Vantagens e desvantagens de cada fonte hídrica. Fonte: Próprios autores, 2024.

## CONCLUSÕES

O cenário de consumo hídrico acelerado com relação direta de crescimento das atividades minerárias foi discutido como um ponto de necessidade de desenvolvimento de novas formas de água. Quando comparado com demais fontes, como água subterrânea, água de mar, águas pluviais e, até mesmo, águas contaminadas, o reúso de efluente tratado surge como uma oportunidade de ampliação de disponibilidade do recurso a ser utilizado tanto pelo próprio gerador do efluente quanto por fontes terceiras.

Foram apresentadas, portanto, variadas formas de reúso no decorrer do artigo, em diversas partes do mundo, as quais se dividem em modalidade de reúso interno e externo, em relação às fontes e formas de aplicação. Os casos ratificam que, para além do menor consumo, o reúso é uma metodologia que contribui positivamente para o cenário de mudanças climáticas e atua como subsídio para auxiliar o avanço dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Recomenda-se a continuidade do estudo com foco em explorar legislações dos diversos países acima discutidos, no sentido de analisar se o que há instituído favorece ou não o desenvolvimento de métodos de reúso tanto para atividades minerárias quanto para demais setores industriais, considerados grandes consumidores de água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Crutchik, D., & Campos, J. L. Municipal Wastewater Reuse: Is it a Competitive Alternative to Seawater Desalination? *Sustainability*, 13(12), 6815, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13126815>
2. Gunson, A. J., Klein, B., Veiga, M., & Dunbar, S. Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 71–82, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.020>
3. Lévy, V., Fabre, R., Boebel, B., & Hertle, C. Water use in the mining industry – threats and opportunities. *Proceedings of Water in Mining*. 2006.
4. Mavhungu, A., Masindi, V., Foteinis, S., Mbaya, R., Tekere, M., Kortidis, I., & Chatzisyseon, E. Advocating circular economy in wastewater treatment: Struvite formation and drinking water reclamation from real municipal effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103957, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103957>
5. Mercuri, A. M., Duggin, J. A., & Grant, C. D. The use of saline mine water and municipal wastes to establish plantations on rehabilitated open-cut coal mines, Upper Hunter Valley NSW, Australia. *Forest Ecology and Management*, 204(2–3), 195–207, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.09.008>
6. Moresi, E. *Metodologia da Pesquisa*. Universidade Católica de Brasília – UCB. 2003.
7. Musie, W., & Gonfa, G. Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon*, 9(8), e18685, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>
8. Rimawi, O., Jiries, A., Zubi, Y., & El-Naqa, A. Reuse of mining wastewater in agricultural activities in Jordan. *Environment, Development and Sustainability*, 11(4), 695–703, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10668-007-9137-9>
9. Saenz, C., & Ostos, J. Making or breaking social license to operate in the mining industry: Factors of the main drivers of social conflict. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123640, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123640>
10. Santana, C. S., Montalván Olivares, D. M., Silva, V. H. C., Luzardo, F. H. M., Velasco, F. G., & de Jesus, R. M. Assessment of water resources pollution associated with mining activity in a semi-arid region. *Journal of Environmental Management*, 273, 111148, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111148>
11. Satapathy, D. R., Salve, P. R., & Katpatal, Y. B. Spatial distribution of metals in ground/surface waters in the Chandrapur district (Central India) and their plausible sources. *Environmental Geology*, 56(7), 1323–1352, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1230-3>
12. S&P Capital IQ. Global Metals and Mining Industry Coverage. Global Mining Properties. 2024. Disponível em: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/campaigns/world-mining-intelligence-coverage> Acesso em: 30/09/2024.
13. Sun, H., Hu, X., Yang, X., Wang, H., & Cheng, J. Estimating water pollution and economic cost embodied in the mining industry: An interprovincial analysis in China. *Resources Policy*, 86, 104284, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104284>
14. Sydney Water. Wollongong Water Resource Recovery Facility. 2024. Disponível em: <https://www.sydneywater.com.au/education/wastewater-recycling/water-recycling/wollongong-water-recycling-plant.html> Acesso em 30/09/2024;
15. Toro, N., Gálvez, E., Robles, P., Castillo, J., Villca, G., & Salinas-Rodríguez, E. Use of Alternative Water Resources in Copper Leaching Processes in Chilean Mining Industry—A Review. *Metals*, 12(3), 445, 2022. <https://doi.org/10.3390/met12030445>