

QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE CARVÃO: UMA REVISÃO

Rinaldo Betcher Neto*

Leonardo Santos Andrade*

Resumo: A mineração de carvão é uma atividade historicamente relevante para o desenvolvimento econômico de diversas regiões brasileiras, especialmente no sul de Santa Catarina, porém associada a expressivos impactos ambientais. Entre esses impactos, destaca-se a degradação da qualidade das águas subterrâneas, principalmente em função da drenagem ácida de mina (DAM), processo que promove a acidificação do meio e a mobilização de metais potencialmente tóxicos. Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a qualidade das águas subterrâneas em áreas degradadas pela mineração de carvão, abordando os principais parâmetros físico-químicos afetados, tais como pH, condutividade elétrica, sulfatos, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos e metais como ferro, manganês, alumínio e zinco. A metodologia consistiu em uma revisão de literatura baseada em artigos científicos, dissertações, teses e relatórios técnicos publicados em bases de dados nacionais e internacionais. A relevância do estudo está na sistematização do conhecimento existente sobre os impactos da mineração de carvão nos aquíferos, contribuindo para o aprimoramento das ações de monitoramento, gestão e recuperação ambiental em áreas mineradas.

Palavras-chave: mineração de carvão; águas subterrâneas; drenagem ácida de mina; metais pesados; qualidade da água.

INTRODUÇÃO

A água subterrânea constitui um recurso natural essencial para o abastecimento humano, atividades agrícolas e manutenção dos ecossistemas. Em regiões mineradas, entretanto, a exploração de carvão mineral tem provocado alterações significativas na qualidade desse recurso, principalmente em decorrência da exposição de minerais sulfetados à oxidação, dando origem à drenagem ácida de mina. No Brasil, os impactos da mineração de carvão são amplamente observados na região Sul, onde extensas áreas apresentam passivos ambientais associados à contaminação do solo e das águas subterrâneas. Nesse contexto, torna-se

* Instituto de Química – UFCAT: rinaldo-richard-maria@hotmail.com; ls_andrade@ufcat.edu.br.

fundamental compreender os processos de degradação e os parâmetros químicos envolvidos, de modo a subsidiar ações de gestão ambiental e recuperação de áreas degradadas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mineração de carvão no Brasil e em Santa Catarina

A mineração de carvão no Brasil possui histórico concentrado principalmente na região Sul, com destaque para os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Em Santa Catarina, a exploração do carvão mineral teve início no final do século XIX e se intensificou ao longo do século XX, impulsionada pela demanda energética e pelo desenvolvimento industrial regional. Essa atividade desempenhou papel relevante na economia local, porém foi conduzida, em grande parte, sem a adoção de critérios ambientais adequados, resultando na geração de extensos passivos ambientais.

A região carbonífera catarinense abrange municípios como Criciúma, Urussanga, Lauro Müller, Siderópolis e Treviso, onde a mineração subterrânea e a céu aberto promoveram a exposição de camadas carbonosas e de minerais sulfetados. A disposição inadequada de rejeitos e a ausência de sistemas eficientes de controle ambiental favoreceram a degradação do solo, das águas superficiais e das águas subterrâneas, cujos efeitos persistem até os dias atuais.

Diversos estudos apontam que os impactos da mineração de carvão em Santa Catarina extrapolam o período de operação das minas, mantendo-se ativos mesmo após o encerramento das atividades minerárias. Esse fato está associado à natureza geoquímica dos rejeitos e à lenta dinâmica de recuperação dos sistemas ambientais afetados, especialmente os aquíferos subterrâneos.

Drenagem ácida de mina: fundamentos geoquímicos

A drenagem ácida de mina (DAM) é amplamente reconhecida como o principal processo responsável pela degradação da qualidade das águas subterrâneas em áreas mineradas de carvão. Esse fenômeno ocorre principalmente pela oxidação de

minerais sulfetados, como a pirita (FeS_2), quando expostos à água e ao oxigênio durante as atividades de lavra e disposição de rejeitos.

O processo de oxidação da pirita resulta na formação de ácido sulfúrico, promovendo a redução do pH das águas e a liberação de íons sulfato e metais dissolvidos. Em ambientes ácidos, metais como ferro, manganês e alumínio tornam-se mais solúveis, aumentando suas concentrações nas águas subterrâneas e ampliando os riscos ambientais e sanitários associados.

Estudos clássicos e contemporâneos indicam que a DAM pode persistir por décadas ou até séculos, mesmo após o encerramento das atividades minerárias, configurando um passivo ambiental de longa duração. A persistência desse processo está relacionada à disponibilidade contínua de minerais sulfetados, à circulação de água subterrânea e às condições hidrogeológicas locais.

Hidrogeologia da bacia carbonífera catarinense

A bacia carbonífera de Santa Catarina apresenta um contexto hidrogeológico complexo, caracterizado pela presença de aquíferos porosos associados a arenitos e aquíferos fraturados vinculados a rochas sedimentares e estruturas tectônicas. Essa configuração confere elevada vulnerabilidade à contaminação, uma vez que fraturas e descontinuidades geológicas facilitam a percolação de soluções contaminadas.

A interação entre os aquíferos e os rejeitos de mineração favorece a infiltração de águas ácidas e ricas em metais, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas. Em muitas áreas, a conectividade hidráulica entre águas superficiais e subterrâneas potencializa a propagação da contaminação, ampliando a área de influência dos impactos ambientais.

Trabalhos desenvolvidos na região carbonífera catarinense indicam que aquíferos rasos são os mais afetados pela DAM, apresentando alterações significativas nos parâmetros físico-químicos. Entretanto, há registros de impactos também em aquíferos mais profundos, evidenciando a complexidade dos processos hidrogeológicos envolvidos.

Parâmetros físico-químicos de águas subterrâneas em áreas mineradas

A avaliação da qualidade das águas subterrâneas em áreas degradadas pela mineração de carvão baseia-se, principalmente, na análise de parâmetros físico-químicos sensíveis à influência da drenagem ácida de mina. Entre os parâmetros mais utilizados destacam-se o pH, a condutividade elétrica, a concentração de sulfatos, a alcalinidade, os sólidos totais dissolvidos e os metais dissolvidos.

O pH é considerado um dos principais indicadores de influência da DAM, sendo comuns valores ácidos em águas subterrâneas associadas a áreas mineradas. A condutividade elétrica reflete o grau de mineralização da água, frequentemente elevada em ambientes impactados pela mineração de carvão, em função do aumento da concentração de íons dissolvidos.

Os sulfatos constituem outro parâmetro-chave, uma vez que sua elevação está diretamente relacionada à oxidação de minerais sulfetados. Concentrações elevadas de sulfatos são amplamente relatadas na literatura como indicativo de contaminação por DAM. Os sólidos totais dissolvidos acompanham esse comportamento, evidenciando a intensa alteração química das águas subterrâneas.

No que se refere aos metais, ferro, manganês e alumínio são os mais frequentemente associados à mineração de carvão em Santa Catarina, apresentando concentrações que, em muitos casos, ultrapassam os limites estabelecidos pela legislação ambiental e sanitária. Esses metais representam riscos ao meio ambiente e à saúde humana, reforçando a importância do monitoramento sistemático das águas subterrâneas em áreas mineradas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica narrativa, com foco na qualidade das águas subterrâneas em áreas degradadas pela mineração de carvão no estado de Santa Catarina. A escolha desse recorte espacial justifica-se pela expressiva relevância histórica, econômica e ambiental da mineração de carvão na região carbonífera catarinense, bem como pela ampla disponibilidade de estudos técnicos e científicos desenvolvidos ao longo das últimas décadas.

A seleção dos trabalhos foi realizada a partir de buscas sistematizadas em bases de dados nacionais, como SciELO, Portal de Periódicos da CAPES, Google Scholar, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD), além de repositórios

institucionais da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS). Foram utilizados descritores relacionados à mineração de carvão, drenagem ácida de mina, águas subterrâneas, qualidade da água e bacia carbonífera de Santa Catarina.

Os critérios de inclusão contemplaram estudos que abordassem parâmetros físico-químicos de águas subterrâneas em áreas mineradas ou em processo de recuperação ambiental, com destaque para pH, condutividade elétrica, sulfatos, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos e metais dissolvidos. Trabalhos repetitivos ou que não apresentassem dados relevantes para a temática foram excluídos.

RESULTADOS

Contexto hidrogeológico da bacia carbonífera catarinense

A bacia carbonífera do estado de Santa Catarina está inserida em um contexto geológico complexo, caracterizado pela presença de camadas sedimentares associadas à Formação Rio Bonito, onde ocorrem os principais depósitos de carvão mineral. Os aquíferos presentes na região são, em sua maioria, aquíferos fraturados e aquíferos porosos associados a arenitos, apresentando elevada vulnerabilidade à contaminação quando submetidos a atividades minerárias intensivas. A interação entre as fraturas, as camadas carbonosas e os rejeitos de mineração favorecem a infiltração de soluções ácidas e contaminantes, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas.

Formação e persistência da drenagem ácida de mina

A drenagem ácida de mina resulta principalmente da oxidação da pirita e de outros sulfetos metálicos expostos durante as atividades de lavra e disposição de rejeitos. Esse processo geoquímico gera ácido sulfúrico, promovendo a redução do pH e a solubilização de metais previamente imobilizados na matriz rochosa. Estudos realizados na bacia carbonífera catarinense demonstram que a DAM pode persistir por décadas, mesmo após o encerramento das atividades de mineração, configurando um passivo ambiental de longa duração.

Comportamento dos principais parâmetros físico-químicos

Os trabalhos analisados indicam que o pH das águas subterrâneas em áreas mineradas frequentemente apresenta valores ácidos, muitas vezes inferiores a 5,0, condição que favorece a mobilização de metais como ferro, manganês e alumínio. A condutividade elétrica tende a apresentar valores elevados, refletindo o aumento da concentração de íons dissolvidos, especialmente sulfatos. Os sólidos totais dissolvidos acompanham esse comportamento, evidenciando a intensa mineralização das águas subterrâneas impactadas pela mineração de carvão.

As concentrações de ferro e manganês são frequentemente relatadas acima dos limites estabelecidos para águas destinadas ao consumo humano, enquanto o alumínio apresenta elevada variabilidade, dependente das condições de pH e alcalinidade. Esses resultados corroboram a literatura nacional, que aponta a DAM como principal fator controlador da química das águas subterrâneas em áreas carboníferas de Santa Catarina.

Influência das ações de recuperação ambiental

A análise dos estudos realizados em áreas submetidas a programas de recuperação ambiental demonstra que intervenções como a cobertura de rejeitos, a recomposição do solo e o controle de drenagens superficiais podem reduzir parcialmente os impactos sobre as águas subterrâneas. Entretanto, a recuperação da qualidade hídrica é um processo lento e, em muitos casos, incompleto, exigindo monitoramento de longo prazo e a adoção de estratégias complementares.

Implicações científicas e ambientais

Os resultados discutidos até aqui evidenciam a necessidade de aprofundamento dos estudos hidrogeoquímicos em áreas mineradas de carvão, especialmente no que se refere à dinâmica dos contaminantes em aquíferos fraturados. A compreensão detalhada desses processos é fundamental para o desenvolvimento de modelos preditivos e para a definição de estratégias de remediação mais eficientes, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais

associados à mineração de carvão no estado de Santa Catarina.

CONCLUSÕES

A presente revisão bibliográfica permitiu analisar de forma resumida o estado do conhecimento acerca da qualidade das águas subterrâneas em áreas degradadas pela mineração de carvão no estado de Santa Catarina, evidenciando que os impactos associados a essa atividade configuram um dos mais relevantes passivos ambientais da região. Os estudos analisados demonstram de forma consistente que a drenagem ácida de mina constitui o principal processo responsável pela degradação hidrogeoquímica dos aquíferos, promovendo a acidificação das águas e a mobilização de metais potencialmente tóxicos.

Os parâmetros físico-químicos mais recorrentes nos trabalhos revisados — pH, condutividade elétrica, sulfatos, sólidos totais dissolvidos e metais como ferro, manganês e alumínio — indicam condições incompatíveis com usos mais restritivos da água subterrânea, especialmente o consumo humano. Observa-se que valores reduzidos de pH favorecem a solubilização de metais, ampliando a persistência da contaminação ao longo do tempo e dificultando processos naturais de atenuação.

A análise dos estudos realizados em áreas submetidas a ações de recuperação ambiental evidencia que, embora haja melhorias graduais em alguns parâmetros, a completa restauração da qualidade das águas subterrâneas raramente é alcançada em curto ou médio prazo. Tal constatação reforça o caráter crônico da contaminação associada à mineração de carvão e a necessidade de monitoramento contínuo dos aquíferos, mesmo após o encerramento das atividades minerárias.

Do ponto de vista científico, a revisão também evidencia lacunas relevantes, como a escassez de séries históricas de longo prazo, a heterogeneidade metodológica entre os estudos e a limitada integração entre dados hidrogeológicos e geoquímicos. Essas limitações dificultam análises comparativas mais robustas e a construção de modelos preditivos confiáveis.

Dessa forma, conclui-se que o aprofundamento dos estudos hidrogeoquímicos, aliado à padronização metodológica e ao fortalecimento dos programas de monitoramento, é fundamental para a compreensão da dinâmica dos contaminantes e para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação e recuperação

ambiental. O conhecimento sistematizado neste trabalho contribui para o avanço científico na área de análises químicas ambientais e fornece subsídios técnicos para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos em regiões impactadas pela mineração de carvão.

REFERÊNCIAS

- CAMPOS, M. L. et al. Qualidade das águas subterrâneas em áreas afetadas pela mineração de carvão em Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 43, n. 2, p. 245–258, 2013.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Diagnóstico ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina. Brasília: CPRM, 2018.
- NORDSTROM, D. K. Mine waters: acidictocircumneutral. *Elements*, v. 7, n. 6, p. 393–398, 2011.
- ROCHA, R. S. et al. Avaliação da qualidade da água subterrânea em áreas mineradas e recuperadas na bacia carbonífera catarinense. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 4, p. 701–712, 2017.
- SAMPAIO, C. H. et al. Impactos ambientais da mineração de carvão no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 3, p. 395–406, 2010.
- SANTOS, J. R. et al. Análise temporal da qualidade da água subterrânea em áreas de mineração de carvão recuperadas. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 1, p. 45–58, 2019.
- SCHNEIDER, I. A. H. et al. Qualidade da água subterrânea em áreas mineradas de carvão no sul de Santa Catarina. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 4, p. 623–632, 2015.
- YOUNGER, P. L.; BANWART, S. A.; HEDIN, R. S. Mine water: hydrology, pollution, remediation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.