

IMPACTO AMBIENTAL DA PERCOLAÇÃO DE METAIS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO APÓS O ROMPIMENTO DE BARRAGEM EM MARIANA: IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE

Otniel Alencar Bandeira¹, Susana Inés Segura-Muñoz² e Palmeri Alencar Bandeira³

¹Doutor em Saúde Pública pela Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil.
(otnielalencar@gmail.com).

²Professora do Programa de Pós- Graduação em Enfermagem em Saúde Pública -
Universidade de São Paulo – USP, Ribeirão Preto, Brasil.

³Mestre em Atenção à Saúde pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás,
Goiânia, Brasil.

Recebido em: 15/11/2024 – Aprovado em: 15/12/2024 – Publicado em: 30/12/2024
DOI: 10.18677/EnciBio_2024D10

RESUMO

A mineração é uma atividade econômica de grande relevância no Brasil, especialmente no Estado de Minas Gerais. Em 2015, o rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG provocou o extravasamento de milhões de toneladas de rejeitos, que se depositaram sobre o solo e nos corpos d'água da região. Esse desastre impactou diretamente 663,2 km de recursos hídricos, afetando 41 municípios nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Diante da escala dos danos ao ecossistema e da escassez de informações sobre seus efeitos na saúde, esta pesquisa teve como objetivo investigar a percolação e lixiviação dos metais presentes nos rejeitos no meio ambiente. Amostras de solo natural e rejeitos foram coletadas no local mais afetado, em Paracatu de Baixo-MG, para análises físicas e químicas. A simulação de percolação em cilindros experimentais revelou que houve deslocamento de metais tanto horizontalmente quanto verticalmente. Esses achados fornecem uma compreensão preliminar sobre as possíveis consequências ambientais após o rompimento da barragem em Mariana. Os resultados evidenciam a importância de realizar estudos de médio e longo prazo nas áreas afetadas, com foco no desenvolvimento de estratégias de remediação que minimizem os impactos negativos à saúde das comunidades locais.

PALAVRAS-CHAVE: Estudo experimental; Metais; Rompimento de barragem.

ENVIRONMENTAL IMPACT OF METAL PERCOLATION FROM MINING WASTE POST-DAM COLLAPSE IN MARIANA, BRAZIL: IMPLICATIONS FOR HEALTH

ABSTRACT

Mining is a significant economic activity in Brazil, particularly in the state of Minas Gerais. In 2015, the collapse of the Fundão dam in Mariana-MG resulted in millions of tons of mining waste being released, which subsequently settled on the soil and in nearby water bodies. This disaster directly impacted 663.2 kilometers of water bodies, affecting 41 municipalities across the states of Minas Gerais and Espírito Santo. Given the scale of environmental damage and the lack of health-related

studies on such impacts, this research aimed to evaluate the percolation and leaching of metals from these wastes into the environment. Samples of natural soil and waste were collected in one of the most affected locations, Paracatu de Baixo-MG, for physical and chemical analysis. The results from percolation simulations in experimental cylinders showed horizontal and vertical movement of metals. These findings provide preliminary insights into the environmental consequences of the dam's collapse in the Mariana region. The study underscores the need for continued medium- and long-term research in areas affected by mining waste, focusing on developing remediation strategies to reduce adverse health effects for communities impacted by this type of disaster.

KEYWORDS: Experimental study; Metals; Dam failure.

INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo, estimada atualmente em cerca de 29 bilhões de toneladas, ficando atrás apenas da Austrália, com aproximadamente 48 bilhões de toneladas (MONTE *et al.*, 2021). De acordo com dados recentes do U.S. Geological Survey (USGS, 2020), a produção brasileira de minério de ferro em 2019 foi estimada em cerca de 400 milhões de toneladas, representando aproximadamente 17% da produção global. Esse volume consolida o Brasil como um dos principais produtores de aço, junto com a Austrália e a China.

A extração de minério de ferro no Brasil ocorre em diversas jazidas e o transporte é feito predominantemente por ferrovias. Há também o uso de minerodutos, nos quais o minério é misturado com água para formar uma polpa, facilitando o transporte até as usinas siderúrgicas ou portos de exportação (MENEZES *et al.*, 2018; SOUZA, 2021).

Nas usinas, o minério passa por um processo de beneficiamento, incluindo a pelotização, que visa reduzir o teor de umidade. Esse processo gera resíduos denominados rejeitos de mineração, que são uma mistura aquosa de partículas minerais e podem conter grandes quantidades de ferro (MILONAS, 2019; GUIMARÃES, 2022). Esses rejeitos, que geralmente não possuem valor econômico, são armazenados em barragens de contenção. No entanto, a falta de manutenção adequada dessas estruturas pode levar ao rompimento das barragens, causando danos ambientais graves e, muitas vezes, irreversíveis (UNB, 2018; BABBOU-ABDELMALEK *et al.*, 2019; KEESSTRA *et al.*, 2021; PRAVEENA; OMAR, 2022). Entre as principais causas de rompimentos estão problemas de fundação, capacidade insuficiente de vertedouros, instabilidade do talude, controle inadequado da erosão e falhas nas inspeções e procedimentos de segurança ao longo do ciclo de vida das barragens (ANDRADE, 2021).

A Lei Federal nº 12.334, promulgada em 2010, instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens, que regulamenta o armazenamento de água, a destinação de rejeitos e o acúmulo de resíduos industriais. Essa legislação também criou o Sistema de Informação de Segurança de Barragens. Contudo, desastres envolvendo barragens ainda ocorrem. Um dos eventos mais recentes e trágicos foi o rompimento da barragem de Brumadinho em 2019, que liberou aproximadamente 12 milhões de m³ de rejeitos, causando a morte de centenas de pessoas e impactos ambientais graves em rios e áreas de preservação (IBAMA, 2019).

Os rejeitos depositados nos corpos hídricos geram poluição, que pode comprometer a qualidade da água. A poluição da água é caracterizada por mudanças nas propriedades físicas, químicas ou biológicas, representando riscos à

saúde humana e à fauna aquática, além de prejudicar múltiplos usos dos recursos hídricos (SANTOS *et al.*, 2022).

As principais consequências dos desastres em barragens incluem o impacto nos usos dos recursos hídricos nas bacias afetadas, como a geração de energia, indústria, pesca e atividades recreativas. Em termos de qualidade da água, o impacto levou à interrupção do abastecimento público de algumas cidades e afetou diversos outros usuários (BRASIL, 2021). Esse contexto exige que as comunidades busquem fontes alternativas, como poços artesianos, levantando questões sobre a possível transferência de metais dos rejeitos para as águas subterrâneas devido ao efeito de percolação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta de rejeitos e solo foi realizada em Paracatu de Baixo, uma das sub-regiões de Mariana-MG (latitude 20°19'17" Sul, 43°13'51" Oeste), local escolhido por ter sido um dos primeiros a ser atingido pela lama, foi depositada uma espessa camada de rejeitos na superfície. A coleta foi realizada no topo (0 a 60 cm), sendo descartados os 5 cm superiores de rejeitos. Além disso, solo naturais coletados (0-20 cm), na mesma zona (20°18'26.20" Sul, 43°13'55" Oeste) no topo do contorno da área protegida aonde não foi afetado pela lama/rejeito. Foram transportados a amostras de rejeito e solo natural até o laboratório (Ecotoxicologia e Ecologia Aplicada Nuclear de Itirapina-SP – USP) para homogeneização, peneiramento manual, secagem ao ar livre e secagem em estufa a $40 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas. Após o processo, consistiu no armazenamento em saco plástico estéril e colocado em caixa de polietileno no laboratório.

Ensaio de percolação

O ensaio de percolação foi realizado por meio da utilização de simuladores verticais preenchido com solo e percolado com água, segundo Chelinho (2011), estes simuladores permitem compreender o comportamento dos metais no ambiente edáfico e suas transferências para o ambiente aquático.

Os simuladores utilizados nesta etapa foram construídos e instalados na casa de vegetação com estrutura metálica revestida com tela branca, localizada no Campus II da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Ocorreu, na cidade de São Carlos, São Paulo, no ano 2019 em casa de vegetação estrutura metálica revestida com tela branca, localizado no Campus II da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Os simuladores foram construídos com cano de policloreto de vinila (PVC) em formato cilíndrico 150 cm de altura, 9,7 cm de diâmetro e volume de 9,601 cm³ (Figura 1).

FIGURA 1 - Simuladores utilizados para coletar água percolada pelo rejeito e solo natural.



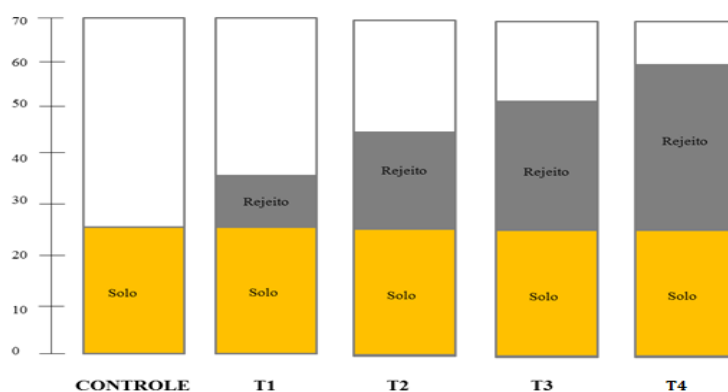
Fonte: Elaborado e autorizado a publicação das fotos pelos autores.

No fundo dos simuladores cilíndricos foram instaladas telas para impedir perda de material sólido. Considerando as irregularidades topográficas da região e com o intuito de simular um cenário mais realístico das áreas afetadas pelo rejeito, os simuladores foram preenchidos em triplicatas, considerando uma altura útil de 130 cm, com as seguintes proporções de solo natural não contaminado (SN) de Mariana - MG e rejeito (R), as proporções utilizadas, foram:

- **C_{ontrol}e**: simulador controle com 100% da altura preenchida com SN (52 cm de altura);
- **T1**: 40% da altura preenchida com SN (52 cm) e 15% com R (19,5 cm);
- **T2**: 40% da altura com SN (52 cm) e 30% com R (39 cm);
- **T3**: 40% da altura com SN (52 cm) e 45% com R (58,5 cm);
- **T4**: 40% da altura com SN (52 cm) e 60% com R (78 cm).

Na Figura 2 está apresentado um esquema dos simuladores, para percolação da água no solo contaminado com rejeito.

FIGURA 2 - Esquema do delineamento experimental dos simuladores



Fonte: Elaborado pelos autores.

Posteriormente, foram simuladas duas chuvas a cada 15 dias de 150 mm, valor referente às médias históricas mensais em Mariana-MG e volume necessário para que ocorra quantidade de água percolada suficiente para as análises físico-

químicas. Os parâmetros utilizados para avaliação das variáveis físicas e químicas da água no simulador estão apresentados no Quadro 1.

QUADRO 1 – Variáveis e métodos analíticos (APHA et al., 2005) utilizados para análise físicas e químicas da água percolada

VARIÁVEL	UNIDADE	MÉTODO ANALÍTICO
Potencial Hidrogeniônico	Adimensional	Eletrométrico (SM 4500-OG)
Oxigênio dissolvido	mg O ₂ /L	Eletrométrico (SM 4500 - H + B)
Turbidez	uT(NTU)	Turbidimetria (SM 2130)
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	Titrimetria com EDTA (SM 2340 C)
Temperatura	°C	Eletrométrico (SM 4500-OG)
Metais: Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn, Hg, Ni, Se, Tl e Zn.	mg/L	Espectrofotometria de absorção atômica (SM 3111B)

SM: Standard Methods e nos resultados as duas simulações foram identificadas como S1 e S2.

As amostras de água percoladas foram coletadas e armazenadas em recipiente de plástico devidamente rotulado de 500 mL. Em seguida, utilizou-se uma pipeta calibrada para adicionar 1 mL de ácido nítrico P.A e homogeneizar. A seguir, as amostras foram para o laboratório, armazenadas em geladeira e mantidas em resfriamento até momento da análise.

Os extratos obtidos nos ensaios de percolado do simulador foram enviados para a Universidade Rovira i Virgili, Espanha. As doses de Al, As, Cd, Pb, Cr, Sn, Mn, Hg, Ni, Se, Tl, Cu, Fe e Zn foram medidas por espectroscopia de Induzido-Espectroscopia de Massa (ICP-MS, Perkin Elmer Elan 600) em Rovira i Laboratório de Toxicologia e Saúde Ambiental da Universidad Virgili. O limite de detecção de Al e Cr é 0,002 mg/L; o original é 0,001 mg/L; Cd e Pb são 0,0001 mg/L; Sn é 0,0005 mg/L; Mn e Fe são 0,01 mg/L; Hg e Ni são 0,0002 mg/L; selênio é 0,004 mg/L; Tl é 0,0001 mg/L Cu é 0,0005 mg/L e Zn é 0,002 mg/L. A curva de calibração é definida pela solução estoque de cada metal com uma concentração exata de 1.000 mg/L, é uma solução padrão de uma concentração específica é preparada para cada metal.

Análises dos resultados dos ensaios de percolação

Foi realizada uma análise descritiva para organizar os dados coletados no software Microsoft Excel® e GraphPad Prism® 8.2.1 (2019) para avaliação da normalidade foi utilizado o teste Shapiro-Wilk, e na sequência foi realizado o teste não-paramétrico Kruskal-Wallis para comparação entre as concentrações de metais pesados do CT, T1, T2, T3 e T4. O nível de significância utilizado foi de $\alpha=0,05$, de modo que valores de $p<0,05$, indicaram a existência de diferenças significantes entre os pontos de comparação. Além do teste de Kruskal-Wallis, foi realizado o teste de comparações Múltiplas de Dunn.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os dados obtidos dos ensaios de percolação de água em solo contaminado, os resultados dos parâmetros temperatura, pH, oxigênio dissolvido (OD), dureza, condutividade, sólidos totais dissolvidos (TDS) e turbidez, apresentados na Tabela 1, são inferiores aos valores máximos permitidos pela Portaria GM/MS nº 888/21 (BRASIL, 2021).

TABELA 1 – Parâmetros físico-químicos na água percolada das simulações de chuva em percoladores experimentais.

Amostras (S1)	Temperatura				pH				OD			
	°C								mg/L			
	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
1 CT	22,1	0,2	22	22,3	4,7	0,17	4,57	4,89	7,64	0,04	7,61	7,68
1 T1	21,8	0,2	21,7	22	4,6	0,07	4,54	4,67	7,4	0,49	6,84	7,71
1 T2	22,3	0,3	22,1	22,6	5,04	0,62	4,67	5,76	7,86	0,47	7,55	8,4
1 T3	22	0,1	21,9	22,1	4,67	0,08	4,57	4,72	7,89	0,16	7,74	8,05
1 T4	22,2	0,1	22,1	22,3	4,67	0,12	4,56	4,79	6,46	0,96	5,35	7,09
Amostras (S2)												
2 CT	23,2	0,1	23,2	23,3	5,58	0,09	5,49	5,67	5,72	0,3	5,48	6,05
2 T1	22,5	0,1	22,4	22,6	6,69	0,17	6,5	6,82	7,08	0,53	6,59	7,65
2 T2	22,9	0,2	22,7	23	5,92	0,09	5,82	5,99	6,24	0,7	5,67	7,02
2 T3	22,9	0,2	22,7	23	5,91	0,12	5,78	5,99	6,42	0,43	6,01	6,87
2 T4	23,2	0,2	23	23,4	5,94	0,01	5,93	5,95	6,63	0,32	6,26	6,85

S1: Primeira simulação de chuva;

S2: Segunda simulação de chuva.

A temperatura nas amostras S1 e S2 tiveram média $22,3 \pm 21,8$ e $23,2 \pm 22,5$ °C com desvio padrão de $0,3 \pm 0,1$ e $0,2 \pm 0,1$ °C, mínimo foi de $22,1 \pm 21,7$ e $23,2 \pm 22,4$ °C e o máximo de $22,6 \pm 22$ e $23,4 \pm 22,6$ °C.

A faixa de temperatura é de 21,8 ° C a 23,2 ° C, incluindo pequenas flutuações, fatores que podem ocorrer devido a causas naturais, como exemplo, sombra. Para (SU *et al.*, 2014) a determinação da temperatura da água é crucial por causa das mudanças fatores de forma que se aplicam à energia e resposta ecológica, os recursos hídricos estão relacionados principalmente aos organismos aquáticos.

O pH médio das simulações está entre 4,73 no S1 e 6,00 no S2. O valor de pH junto com a concentração de OD e temperatura, afeta diretamente a desinfecção da água e obtém melhores resultados quando o valor for inferior a 8. Esse resultado pode ser considerado melhor, porque um baixo pH torna a água mais corrosiva e valores altos aumentam a possibilidade de escalonamento na rede.

Segundo Barbosa (2015), o pH é uma variável importante porque, além do crescimento de microrganismos ou da proliferação de algas, muitos são os fatores que podem afetá-lo. O pH de solo natural de Mariana ligeiramente mais ácido, baixa proporção de argila, duas vezes menos matéria orgânica, baixo teor de troca catiônica. O elevado pH do rejeito pode ser explicado pelo uso do hidróxido de sódio na etapa de gelatinização do processo de beneficiamento do minério. No caso, a capacidade de troca catiônica seja muito superior à do solo de Mariana-MG.

Para OD, há valores entre o S1 e S2, respectivamente, a média foi $7,89 \pm 6,46$ e $7,08 \pm 5,72$ com desvio padrão de $0,96 \pm 0,04$ e $70 \pm 0,30$ mg.L O², valor mínimo de $7,74 \pm 5,35$ e $6,59 \pm 5,48$ e máximo de $8,40 \pm 7,09$ e $7,68 \pm 6,05$.

Quando observado. o parâmetro oxigênio dissolvido, nota-se que os padrões encontram abaixo do recomendado de 5 mg/L O₂ CONAMA 357/05 para águas classe 1. Os baixos valores OD e pH em corpos d'água estão associados ao processo de decomposição da matéria orgânica (SILVA *et al.*, 2006).

Os Resultados de dureza do solo natural e rejeito, encontram-se na Tabela 2 que pode ser visualizada em sequência as duas simulações de chuva.

TABELA 2 - Parâmetro da análise de dureza da água percolada das simulações de chuva em percoladores experimentais.

Amostras (S1)	Dureza			
	mg/L			
	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
1 CT	86	30	38	92
1 T1	238	127	142	394
1 T2	425	33	370	430
1 T3	194	82	170	322
1 T4	302	103	230	434
Amostras (S2)				
2 CT	302	2	22	26
2 T1	303	1	21	22
2 T2	304	14	30	58
2 T3	305	2	32	36
2 T4	306	11	30	50

S1: Primeira simulação de chuva;

S2: Segunda simulação de chuva.

Para dureza há valores entre o S1 e S2, respectivamente, a média foi $425 \pm 86 \text{ mg L}^{-1}$ e $306 \pm 302 \text{ mg L}^{-1}$ com desvio padrão de $127 \pm 33 \text{ mg L}^{-1}$ e $14 \pm 1 \text{ mg L}^{-1}$, valor mínimo de $370 \pm 38 \text{ mg L}^{-1}$ e $32 \pm 21 \text{ mg L}^{-1}$ e máximo de $430 \pm 92 \text{ mg L}^{-1}$ e $50 \pm 22 \text{ mg L}^{-1}$.

A dureza é um dos parâmetros básicos para a análise de amostras de água, pois representa a concentração de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). De acordo com a legislação brasileira para a dureza, o valor máximo da água potável é limitado a 300 mg / L^{-1} , e apenas algumas fontes de água são adequadas para o consumo humano (BRASIL, 2021). Desta forma observa-se que S1 está com o teor acima e S2 todos os teores estão abaixo.

O resultado de turbidez das duas análises da água percolada é apresentada na Tabela 4.

TABELA 4 – Parâmetro da análise de turbidez da água percolada das simulações de chuva em percoladores experimentais.

Amostras (S1)	Turbidez			
	uT			
	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
1 CT	29	10	23	40
1 T1	57	14	43	70
1 T2	143	6	138	149
1 T3	41	16	25	56
1 T4	63	36	28	99
Amostras (S2)				
2 CT	41,7	1,5	40,0	43,0
2 T1	39,0	1,0	38,0	40,0
2 T2	83,0	47,8	52,0	138,0
2 T3	45,7	4,5	41,0	50,0
2 T4	50,0	10,4	43,0	62,0

S1: Primeira simulação de chuva;

S2: Segunda simulação de chuva.

Para às amostras de turbidez observa-se um valor de média S2 teve um aumento em comparação com S1, somente CT e T3 do S2 teve o valor superior S1 e valor máximo analisado S1 de $149 \pm 40 \text{ uT}$ e S2 $138 \pm 40,0 \text{ uT}$.

A Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde estabelece que o valor máximo permitido seja de $1,0 \text{ uT}$ para água subterrânea desinfetada e água filtrada após tratamento completo ou filtração direta, e $5,0 \text{ uT}$ como padrão de aceitação para consumo humano. Para água resultante de filtração lenta o valor máximo permitido é $2,0 \text{ uT}$.

De acordo com a Tabela 13, a turbidez foi verificada e todas as amostras apresentaram alterações em relação o máximo permitido pelo Ministério da Saúde. Os impactos mais evidentes se relacionam à qualidade da água para consumo

humano. Em curto prazo, os valores dos parâmetros alteraram a potabilidade da água, impedindo seu consumo e em longo prazo os impactos ambientais ocorridos nos mananciais foram graves e envolvem metais pesados, tendo efeitos que se potencializarão com o tempo, nas águas, resultando também em efeitos sobre a saúde (RODRIGUES *et al.*, 2020).

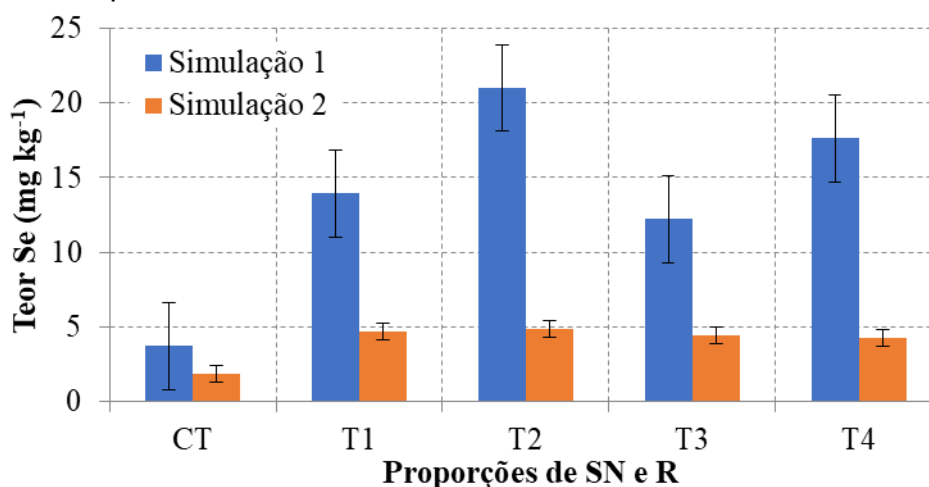
Análises dos ensaios de percolação de água em solo contaminado

Podemos observar, os metais pesados no solo urbano podem entrar no corpo humano por meio da absorção através da pele, da inalação do pó e ingestão pela água. Desta maneira, prejudica a saúde humana de forma indireta por meio da poluição da água (SU *et al.*, 2014).

Os elementos químicos predominantes no rejeito que transbordou da barragem de Fundão com as investigações feitas pelo grupo GIAIA e neste estudo foram realizadas análises dos seguintes metais são: Zn, Cr, Ni, Cu, As, Se, Pb, Sn, Ti, Hg, Cd, Al, Mn e Fe. Porém após realizar a análise estatística observou-se que existem diferenças significativas no teor de metais entre os T1, T2, T3 e T4 em comparação com o CT. Ao se deparar com os resultados estatísticos, a diferença significativa no Cr, Cu e Se, desta maneira vamos apresentar nesta etapa só os resultados dos três metais.

O resultado da análise do metal Se da água percolada nas duas simulações de chuva está apresentado na Figura 3.

FIGURA 3 – Concentração de Se da água percolada nas simulações de chuva em percoladores experimentais



Observando, os valores de Se em todas as concentrações S1 está mais elevada em comparação S2. Os valores da concentração da simulação 1 e 2 CT, T1, T2, T3 e T4, na devida ordem, 3,76 e 1,87; 13,95 e 4,68; 21,00 e 4,85; 12,25 e 4,46; 17,63 e 4,31. Todas as amostras estão acima do valor máximo permitido, de acordo com a água potável pública deve atingir o valor máximo permitido de L. 0,04 mg L⁻¹ (BRASIL, 2021).

A Resolução CONAMA nº 357/2005, estabeleceu a classificação do uso da água e determinou os limites de poluentes, e estipulou que o limite máximo de água doce Classe I é de 0,01 mg L⁻¹.

O Se é um elemento essencial ou tóxico para humanos e animais, dependendo da concentração no momento da administração. Sua deficiência é

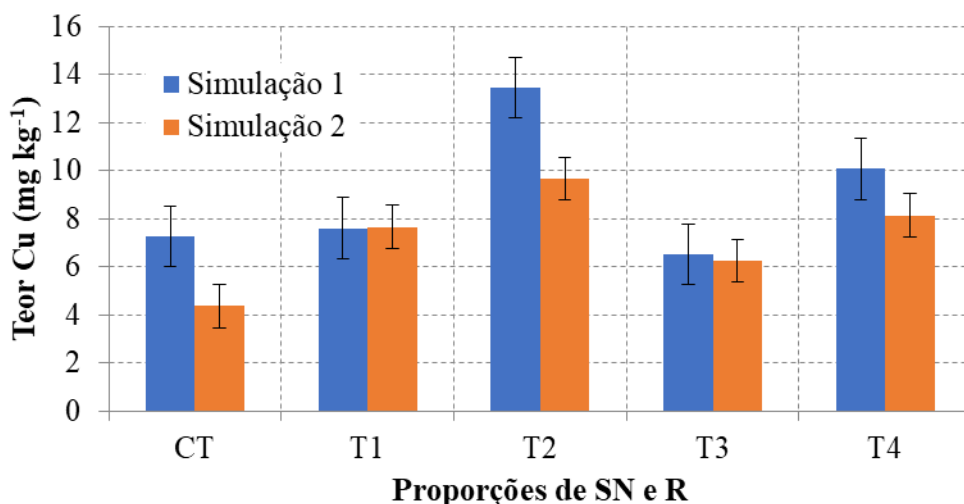
causa de cardiomiopatia, desnutrição, distúrbios, musculares e reprodutivos em vários animais. A quantidade encontrada no sangue é cerca de 100 mg mL^{-1} para humanos, mas, pode variar dependendo da idade, fatores médicos e localização vida pessoal.

Fazendo a média das duas simulações CT-T2, respectivamente, tiveram valores $2,81\text{-}12,92 \text{ mg L}^{-1}$.

Na comparação dos níveis de cromo das amostras CT-T, foram encontradas a existência de diferenças estatisticamente entre os pontos de comparação significantes para CT-T2 ($p=0,05$). Comparando o conteúdo de cromo dos pontos T1, T2, T3 e T4 com os pontos de controle, verificou-se que CT, T2 ($p\sim 0$). Apresentaram diferenças estatisticamente significantes. O teste de comparação múltipla de Dunn foi realizado e diferenças significantes foram determinadas entre certos pontos ($q> 3,312$).

O resultado da análise do metal Cu da água percolada nas duas simulações de chuva está apresentado na Figura 4.

FIGURA 4 – A análise do metal Cu da água percolada nas duas simulações de chuva



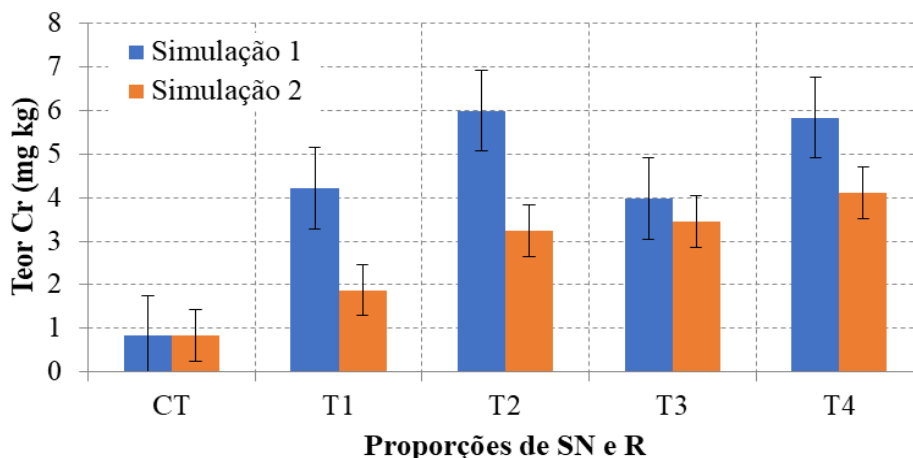
Devido à presença de canos de cobre na água potável, este elemento geralmente aparece na água. Algumas aplicações industriais que contêm cobre são na fabricação de cabos e fios condutor, interruptor e caldeira. Na agricultura é utilizado como inseticida, algicida e agente antibacteriano na purificação de água.

Fazendo a média das duas simulações CT-T2, respectivamente tiveram valores $0,83\text{-}4,61$. Na comparação dos níveis de cromo das amostras CT-T, foram encontradas da existência de diferenças estatisticamente entre os pontos de comparação significantes para CT-T2 ($p=0,05$).

Comparando o conteúdo de cromo dos pontos T1, T2, T3 e T4 com os pontos de controle, verificaram-se que CT e T2 ($p\sim 0$). Apresentaram diferenças estatisticamente significantes. O teste de comparação múltipla de Dunn foi realizado e diferenças significantes foram determinadas entre certos pontos ($q> 3,082$).

O resultado da análise do metal Cr da água percolada nas duas simulações de chuva está apresentado na Figura 5.

FIGURA 5 – A análise do metal Cr da água percolada nas duas simulações de chuva



Geralmente, a presença de Cr nas águas subterrâneas está relacionada à poluição produzida pelo homem e a atividades como a indústria de processamento de metal, curtimento, mineração e processamento de metal, indústria de fabricação de pigmentos e inibidores de corrosão.

Porém, a contaminação desses metais depende das propriedades da mobilidade da água no solo, tais como: teor de argila, óxido de ferro Fe_2O_3 , matéria orgânica e pH predominante ácido. Como o Cr tem efeitos tóxicos mesmo em baixos níveis de concentração e é amplamente distribuído no meio ambiente, o problema do cromo tornou-se um problema de saúde pública (RODRIGUES *et al.*, 2020).

O teor de cromo no SN é de $11,96 \text{ mg.kg}^{-1}$ já é bastante elevado, sendo que em rejeição sua concentração é $19,46 \text{ mg.kg}^{-1}$ maior que o solo natural. As concentrações de cromo na água que foi percolado e a proporção entre os SN e R em cada tratamento nos dá ideia que substrato CT deu igual S1 e S2, entretanto, os demais tratamentos S1 foram mais elevados que a simulação 2. Fazendo a média das duas simulações CT-T2 e CT-T4, respectivamente tiveram valores $0,83\text{-}4,61$ e $0,83\text{-}4,98 \text{ mg kg}^{-1}$.

Na comparação dos níveis de cromo das amostras CT-T, foram encontradas da existência de diferenças estatisticamente entre os pontos de comparação significantes para CT-T2 e CT-T4 ($p=0,05$).

Comparando o conteúdo de Cr dos pontos T1, T2, T3 e T4 com os pontos de controle, verificaram-se que CT, T2, T4 ($p \sim 0$). Apresentaram diferenças estatisticamente significativas. O teste de comparação múltipla de Dunn foi realizado e diferenças significativas foram determinadas entre certos pontos ($q > 3,312$) e ($q > 3,853$).

Um dos problemas apontados pela Organização Mundial de Saúde (1999) sobre acidentes envolvendo substâncias tóxicas é a ausência de pessoas ou de organizações para fazer um parecer objetivo, imparcial e holístico do acidente, do ponto de vista da saúde pública. A OMS destaca que os pesquisadores em saúde pública, em geral, são os mais preparados para considerar o impacto dos acidentes e dar subsídios para a tomada de decisão visando à saúde e bem-estar da população atingida (PAULINO, 2019).

Os desastres não só causam mortes, doenças tangíveis e danos pecúlio e econômicas, mas, da mesma forma têm uma exuberância de efeitos na saúde, principalmente na saúde mental das pessoas devido às mudanças na vida diária e

seus prejuízos. Os desastres pioram a vida das pessoas, desintegram famílias e comunidades, afetam as situações da vida da população e deterioram a atmosfera pessoal e social. Portanto, para compreender o impacto sobre o ser humano, é necessário monitorar a curto, médio e longo prazo.

CONCLUSÕES

Os resultados da simulação de percolação e lixiviação indicaram uma movimentação de metais tanto horizontal quanto vertical, com o potencial de contaminar corpos hídricos superficiais e subterrâneos.

Esse estudo reforça a importância de continuar pesquisas nas áreas afetadas pelos rejeitos de mineração em médio e longo prazo, especialmente voltadas para estratégias de remediação que possam mitigar a toxicidade potencial para as comunidades impactadas por esse tipo de desastre. A geração de dados toxicológicos e as avaliações de risco à saúde serão essenciais para apoiar a tomada de decisões e promover ações intersetoriais, com o objetivo de proteger a saúde e melhorar as condições sociais e de vida da população atingida pelo evento.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. S. **Estudo das causas de rompimentos em barragens de rejeitos**. Engenharia de Solos e Barragens, 6(1), 55-66, 2021.

BABBOU-ABDELMALEK, Z., RAMOS, E., & SILVA, H. **Análise de riscos e segurança em barragens de rejeitos**. Safety and Environmental Management, 10(2), 34-45, 2019.

BARBOSA, I. S. **Análise dos parâmetros físico-químicos e metais presentes nas nascentes do rio meia ponte**. Dissertação (mestrado) f73. Pontifícia Universidade Católica de Goiás< Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável, 2015.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais**. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria GM/MS nº 888 de 4 de maio de 2021** alterar o anexo XX da portaria de consolidação GM/MS nº 5 de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seus padrões de potabilidade 2021.

CHELINHO, S.C. De J. **Novel approaches for pesticide effects assessment in warm temperate and tropical regions**. Thesis (Doctoral in Sciences) – Postgraduate program in Life Sciences, Faculty of Science and Technology, University of Coimbra, Portugal, p. 261, 2011.

GUIMARÃES, R. S. **Impacto ambiental de rejeitos de mineração em barragens de contenção**. Ambiente e Sociedade, 27(1), 111-125, 2022.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). (2019). **Relatório sobre o rompimento da barragem de Brumadinho e seus impactos ambientais**. Brasília: IBAMA, 2019.

KESSTRA, S., PEREIRA, P., NOVARA, A., & BREVIK, E. C. **Environmental and sustainability concerns in the management of mining tailings**. Journal of Environmental Management, 270, 110-123, 2021.

MENEZES, R. A., SILVA, M. J., & OLIVEIRA, P. F. **Transporte de minérios por minerodutos: eficiência e sustentabilidade**. Revista de Engenharia de Transportes, 32(1), 45-53, 2018.

MILONAS, S. **Gestão de rejeitos em barragens de mineração**. Journal of Mining Engineering, 23(3), 205-213, 2019.

MONTE, J. et al. **O minério de ferro no Brasil e suas reservas estratégicas**. Revista Brasileira de Recursos Minerais, 14(2), 150-162, 2021.

PAULINO, M. A. da S. **Pesquisa sobre envelhecimento e saúde da população idosa: subsídios para a agenda de prioridades de pesquisa do Ministério da Saúde**. 2019. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Saúde Coletiva) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

PRAVEENA, S. M., & OMAR, N. S. **Consequências ecológicas dos rompimentos de barragens de mineração**. Water Resources Journal, 17(4), 212-224, 2022.

RODRIGUES, A.G.G.; TAMIASSO-MARTINHON, P.; ROCHA, A.S. SOUSA, G. **Atividades pedagógicas com licenciandos em química sobre os impactos ambientais do desastre de Mariana (MG)**. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 10, p. 82929-82939, oct. 2020. DOI:10.34117/bjdv6n10-649.

SANTOS, V. R., ALMEIDA, M. C., & TAVARES, D. L. **Poluição hídrica e a saúde humana: análise dos impactos de desastres de mineração**. Saúde & Ambiente, 11(2), 89-99, 2022.

SILVA, E. B.; COSTA, H. A. O.; FARNEZI, M. M. M. **Acidez Potencial Estimada pelo Método do PH em Solos da Região do Vale do Jequitinhonha no Estado de Minas Gerais**. R. Bras. Ci. Solo, v. 30, p. 751-757, 2006.

SOUZA, L. C. **Logística e transporte de minério de ferro no Brasil: uma análise estratégica**. Relatório Técnico, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

SU, R.; TAY, L.; DIENER, E. D. **The Development and Validation of the Comprehensive Inventory of Thriving (CIT) and the Brief Inventory of Thriving (BIT)**. Applied Psychology: Health and Well-being, 2014, v. 6 ed. 3, p. 251-279. <https://doi.org/10.1111/aphw.12027>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) **Mineral Commodity Summaries 2020**. U.S. Geological Survey. 2020. Recuperado de <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>.

UNB (Universidade de Brasília) **Manual de Segurança e Gestão de Barragens**. Editora UNB, 2018.