

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

ELIS MESQUITA HORN

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA EM
ÁREA DE MANEJO DE CARVÃO MINERAL**

PORTO ALEGRE

2022

ELIS MESQUITA HORN

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA EM
ÁREA DE MANEJO DE CARVÃO MINERAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel(a).

Orientador: Prof. Salatiel Wohlmuth da Silva

PORTO ALEGRE

2022

HORN, ELIS
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA
EM ÁREA DE MANEJO DE CARVÃO MINERAL / ELIS HORN. --
2022.
86 f.
Orientador: Salatiel Wohlmuth da Silva.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Drenagem ácida de minas. 2. carvão mineral. 3.
lixiviação. 4. ensaios cinéticos. I. Wohlmuth da
Silva, Salatiel, orient. II. Título.

ELIS MESQUITA HORN
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA EM
ÁREA DE MANEJO DE CARVÃO MINERAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel(a).

Aprovado em: Porto Alegre, 14 de outubro de 2022.

Prof. Dr. Salatiel Wohlmuth da Silva – UFRGS/IPH/PPGRHSA
Orientador

Dra. Júlia Bitencourt Welter – UFRGS/EE/PPGE3M
Examinador

Dr. Alan Nelson Arenhart Heberle – UFRGS/EE/PPGE3M
Examinador

AGRADECIMENTOS

Nenhuma conquista é realizada sozinha. Agradeço e reconheço a importância de todos os encontros até aqui.

Início agradecendo aos que apoiaram diretamente na execução do presente trabalho, em especial ao prof. orientador Salatiel Wohlmuth da Silva, que me impulsionou para criar e construir meu conhecimento sobre o tema, a técnica laboratorial Jéssica Sindiana Pletsch, que executou com muito zelo e agilidade as análises necessárias, e à engenheira Josianne Ana Moser, que foi minha mentora e incentivadora na concepção do trabalho. Agradeço também aos profissionais Alexandre Gawlinski e João Moreira, pela troca e pela disponibilidade em me acompanhar e fornecer todas as informações necessárias nas coletas.

Como parte importante da trajetória da graduação, agradeço a minha amiga Luísa Weizenmann Kornowski pela parceria de anos, a vida e a rotina compartilhada fazem muito mais sentido. Por fim, agradeço ao meu namorado Thiago Zorzetto, pela inspiração e acolhimento.

RESUMO

A geração de efluente ácido trata-se de um dos mais complexos problemas ambientais na indústria da mineração, principalmente associado ao carvão mineral. Desde a sua extração até a utilização pelo consumidor final é gerado este impacto, seja pela disposição inadequada de rejeitos/estéreis ricos em sulfatos ou pelo manejo e armazenamento não controlado do produto. Na literatura discutem-se os efeitos da drenagem ácida de minas (DAM) ocasionada pelo rejeito de carvão, entretanto, pouco se explora sobre as áreas de manejo e manuseio do mineral, que muitas vezes impactam da mesma forma. A percolação da água da chuva, bem como as intempéries relacionadas em pilhas de estoque de carvão situadas em áreas de armazenamento, pode gerar drenagens com características semelhantes à DAM. Paralelamente, existem diversas metodologias de predição da DAM, as quais preveem o comportamento do rejeito e do mineral em contato com as intempéries para apoiar na tomada de decisão e estruturação da melhor estratégia para gestão dos impactos ambientais. O presente trabalho investigou a geração de efluente ácido em área de manejo de carvão situada no Rio Grande do Sul, por meio de método de colunas de lixiviação, metodologia preditiva cinética, e análise de dados secundários sobre a qualidade do carvão e qualidade ambiental do entorno do empreendimento. Foi realizada a etapa experimental com 8 colunas de lixiviação contendo os diferentes tipos de carvão armazenados na área, e analisados os seus resultados em termos de pH, condutividade e de cromatografia iônica. Os resultados apontaram uma diminuição no pH, aumento da condutividade para todas as colunas e em alguns casos lixiviação de íons. Ao contrário do esperado, o maior impacto no lixiviado foi observado para o carvão internacional, devido à menor granulometria e conseqüente maior área superficial e de contato para trocas deste mineral.

Palavras-chave: Drenagem ácida de minas, carvão mineral, lixiviação, ensaios cinéticos.

ABSTRACT

The generation of acid effluent is one of the most complex environmental problems in the mining industry, mainly associated with mineral coal. From its extraction to use by the final consumer, this impact is generated, either by the inadequate disposal of waste/sterile rich in sulfates, or by the uncontrolled handling and storage of the final product. In the literature, the effects of acid mine drainage (AMD) caused by coal tailings are discussed, however, little is explored about the areas of management and handling of the mineral, which often impact in the same way. The percolation of rainwater, as well as related weather, in coal stockpiles located in storage areas, can generate drainages with characteristics similar to acid mine drainage. At the same time, there are several methodologies for predicting the AMD, which predict the behavior of the tailings and the mineral in contact with the weather to support decision-making and the structuring of the best strategy for managing environmental impacts. The present work investigated the generation of acid effluent in a coal management area located in Rio Grande do Sul, through the method of leaching columns, kinetic predictive methodology, and analysis of secondary data on the quality of coal and environmental quality of the surroundings. of the enterprise. The experimental stage was carried out with 8 leaching columns containing the different types of coal stored in the area, and their results were analyzed in terms of pH, conductivity and ion chromatography. The results showed a decrease in pH, an increase in conductivity for all columns and in some cases ion leaching. Contrary to expectations, the greatest impact on leachate was observed for international coal, due to the smaller granulometry and consequent greater surface and contact area for exchanges of this mineral.

Keywords: Acid mine drainage, coal, leaching, kinetic tests

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas do estudo	16
Figura 2 - Área de Manejo de Carvão	17
Figura 3 - Planta da área de manejo com ênfase no sistema de drenagem	18
Figura 4 - Canaletas de concreto	19
Figura 5 - Chicanas do sistema de drenagem pluvial.....	20
Figura 6 - Área de manejo de carvão e bacia de acumulação de água.	21
Figura 7 - Bacia de Acumulação de Água Pluvial.....	23
Figura 8 - (a) Amostra de Carvão Nacional, (b) Amostra de Carvão Internacional e (c) Amostra de Carvão Blend.....	24
Figura 9 – (a) Esquema colunas de lixiviação, (b) Colunas de lixiviação	26
Figura 10 - Precipitação média entre o mês de maio de 2019 a maio de 2022.	30
Figura 11 - Histórico do parâmetro (a) pH e (b) condutividade para a bacia de contenção em relação a faixa de padrão da Resolução CONAMA 357.	32
Figura 12 - Valores de concentração de ferro dissolvido, manganês, alumínio e cádmio nas amostras coletadas entre maio/2019 e maio de 2022.....	33
Figura 13 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro pH.	41
Figura 14 - pH para as colunas CI1 e CI2.	43
Figura 15 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro condutividade.	44
Figura 16 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro fluoreto.....	45
Figura 17 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro cloreto.....	46
Figura 18 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro brometo.	47
Figura 19 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro nitrito.....	48
Figura 20 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro nitrato.....	49
Figura 21 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro fosfato.....	50
Figura 22 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro sulfato.	51
Figura 23 - Sulfato para as colunas CI1 e CI2.....	52
Figura 24 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro sódio.....	53
Figura 25 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro amônio.....	54
Figura 26 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro potássio.	55
Figura 27 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro magnésio. ...	56
Figura 28 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro cálcio.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referências metodológicas colunas de lixiviação.	14
Tabela 2 - Informações do tempo de 20/06/2022, data da amostragem.	24
Tabela 3 - Tempos de análise de cada íon no cromatógrafo.	29
Tabela 4 - Caracterização do carregamento de carvão nacional via fluvial e rodoviária para junho/22.....	36
Tabela 5 - Caracterização do carregamento de carvão internacional para junho/22.....	37
Tabela 6 - Resultados dos laudos para análise de enxofre no carvão utilizado pela indústria.	38
Tabela 7 - Acompanhamento do volume de água inserido nas colunas de lixiviação afogadas contendo carvão blend (CAB1 e CAB2) e colunas de lixiviação tradicional contendo carvão internacional (CI1 e CI2).	40
Tabela 8 - Valores de médias e mediana do pH monitorado ao longo dos ensaios.	42
Tabela 9 - Resultados médios dos ensaios.....	44
Tabela 10 - Sugestão de melhorias para área de manejo.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AP – Potencial de acidificação

ABA – *Acid basic accounting method*

ABA modificado – *Modified acid basic accounting method*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAB – Coluna Afogada/Carvão Blend

CB – Carvão blend

CE – Carvão energético

CI – Carvão importado

CN – Carvão nacional

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DAM – Drenagem ÁCIDA DE MINAS

EIA/RIMA – Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto ao Meio Ambiente

GEE – Gases de efeito estufa

LADETEC – Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico

LB – Lixiviado armazenado em bombona

MME – Ministério de Minas e Energia

NP – Potencial de neutralização

PC – Poder calorífico

U.S.EPA – *United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. DELIMITAÇÕES DO ESTUDO	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1. Carvão Mineral	5
4.2. Reservas Brasileiras de Carvão	7
4.3. Reservas Internacionais de Carvão	8
4.4. Drenagem Ácida de Minas e seus Impactos	9
4.5. Ensaio Preditivos de Geração de DAM	11
4.5.1. Ensaio Estáticos	12
4.5.2. Ensaio Cinéticos	12
5. MATERIAIS E MÉTODOS	15
5.1. Área de estudo	16
5.1.1. Sistema de Drenagem Pluvial	18
5.1.2. Dados Meteorológicos	21
5.1.3. Bacia de Acumulação de Água Pluvial	22
5.2. Amostragem	23
5.3. Caracterização Básica do Carvão	25
5.4. Ensaio Preditivo de Geração de DAM em colunas de lixiviação	25
5.5 Análises Físico-Químicas do Efluente	27
5.5.1. pH	28
5.5.2. Condutividade	28
5.5.3 Cátions e Ânions	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1. Análise pluviométrica	30
6.2. Análise da Bacia de Acumulação de Água Pluvial	31
6.3. Caracterização Básica do Carvão	35
6.4. Ensaio Preditivo de Geração de DAM	38
6.4.1. Colunas de Lixiviação	38

6.4.1.1 - Adição de água	39
6.4.2. Análises Químicas do Efluente	40
6.4.2.1. Potencial Hidrogeniônico	41
6.4.2.2. Condutividade	43
6.4.2.3. Ânions	45
6.4.2.3.1. Fluoreto	45
6.4.2.3.2. Cloreto	46
6.4.2.3.3. Brometo	47
6.4.2.3.4. Nitrito	47
6.4.2.3.5. Nitrato	48
6.4.2.3.6. Fosfato	49
6.4.2.3.7. Sulfato	50
6.4.2.4. Cátions	52
6.4.2.4.1. Sódio	52
6.4.2.4.2. Amônio	53
6.4.2.4.3. Potássio	54
6.4.2.4.4. Magnésio	55
6.4.2.4.5. Cálcio	56
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE MELHORIA	58
8. CONCLUSÕES	60
9. TRABALHOS FUTUROS	62
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

No modelo de vida contemporâneo, é indiscutível a contribuição da mineração, visto que ela dá suporte às estratégias de desenvolvimento e a qualidade de vida. Contudo, os impactos ambientais atrelados à atividade são notórios, podendo causar alterações no meio físico, biótico e antrópico, desde a implementação até o destino dos produtos minerados.

O principal problema ambiental relacionado às atividades de mineração é a drenagem ácida de minas (DAM). A DAM é considerada um importante passivo ambiental e está relacionada à exposição de minerais sulfetados às condições atmosféricas, tais quais a água e o oxigênio. Esta exposição resulta na oxidação do enxofre, que tem potencial de geração de uma solução ácida e com grandes concentrações de metais (JÚNIOR *et al*, 2019). O aumento da acidez, e consequente redução do pH, deve-se à geração de ácido sulfúrico (H_2SO_4) no processo de oxidação, o que pode produzir a solubilização de metais como cobre (Cu), níquel (Ni), cádmio (Cd), zinco (Zn), chumbo (Pb), cromo (Cr), ferro (Fe), mercúrio (Hg) e manganês (Mn), implicando em um impacto significativo nos corpos d'água mais próximos, se não houver o controle adequado (PASTORE e MIOTO, 2000).

Conforme Machado e Schneider (2008), a problemática ambiental da geração de DAM atinge a mineração de carvão de forma acentuada. O principal mineral sulfetado que é encontrado na mineração de carvão é a pirita (FeS_2). Este, quando oxidado em presença de água, libera em solução íons férricos que atuam como principais agentes oxidantes no processo (LEITE, 2010).

Em paralelo, conforme Saria *et al* (2006), o fenômeno da DAM pode ser observado em minas e poços abertos, assim como em tanques de rejeitos, porção descartada durante o beneficiamento, e pilhas de estéril, material descartado diretamente na operação de lavra. Majoritariamente, os trabalhos realizados na temática, englobam a análise de geração de DAM em rejeito e estéril, não abordando a potencial geração de acidificação em áreas de estoque, manejo e manuseio de carvão, áreas as quais o mineral é disposto diretamente no solo, exposto a intempéries e sujeito a oxidação. Segundo Pimentel (2007), o escoamento das chuvas sobre os estoques de carvão em áreas de

armazenamento pode gerar drenagens com características semelhantes a drenagem ácida de minas.

A regulamentação da geração de DAM não tem um regramento específico. Entretanto, para obtenção de licenças ambientais no âmbito estadual, deve-se realizar estudos de diagnóstico e análise dos impactos ambientais nas áreas de influência para compor o Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (EIA/RIMA); documento indispensável para o licenciamento de atividades com grande potencial poluidor.

Além desta documentação inerente ao processo de licenciamento, temos legislações a nível federal, como as Resoluções CONAMA n° 357/2005 e n° 430/2011 que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes, que apoiam no controle dos impactos ambientais da DAM. As penalizações em relação à geração desta drenagem são de competência do órgão licenciador e variam de acordo com o processo em questão.

Nesse contexto, ensaios para a previsão de ocorrência da drenagem ácida consistem em uma ferramenta essencial para a indústria da mineração e seus consumidores (MACHADO, 2007). Existem duas classificações de métodos preditivos da geração de DAM: os ensaios estáticos, que levam em consideração o potencial de acidificação e neutralização do material, e os ensaios cinéticos, que visam representar o ambiente natural em que o material está inserido. Estes ensaios têm por finalidade avaliar o potencial de geração da DAM por um determinado material. Os ensaios preditivos, se realizados previamente e/ou na fase inicial de exploração e uso do solo para manejo dos minerais, podem apoiar na tomada de decisão e na implantação conjunta de soluções que minimizem o impacto ambiental (MURTA, 2006).

Atentando-se ao exposto acima, são evidentes as contribuições dos ensaios preditivos de geração de DAM, contudo essa análise nem sempre é aplicada. Quando nos referimos a áreas de manejo e manuseio de carvão, esse tipo de ensaio raramente é considerado, visto que pouco se discute sobre seu impacto.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de geração de drenagem ácida em área de manejo de carvão localizada no Rio Grande do Sul, utilizando-se da metodologia de ensaios preditivos cinéticos.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver metodologia adaptada de ensaio preditivo cinético com colunas de lixiviação;
- Relacionar os dados secundários de precipitação, caracterização do carvão, monitoramento da bacia de acumulação de água pluvial com os resultados analíticos de lixiviação;
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios para os diferentes tipos de carvão mineral e para as variações na técnica de colunas de lixiviação (carvão nacional, importado, blend e blend afogado);
- Identificar estratégias de melhoria na gestão da área de manejo de carvão.

3. DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

O estudo apresenta as seguintes delimitações: **(i)** área de manejo de carvão específica situada no Rio Grande do Sul; **(ii)** dados referentes apenas a coleta de carvão da data 20/06/2022; **(iii)** predição da drenagem ácida de minas apenas por ensaio cinético de coluna de lixiviação.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica visa consolidar o conhecimento acerca do carvão mineral, objeto deste estudo, bem como seu passivo no meio ambiente e as principais formas de predição de geração de seu efluente ácido. A revisão será dividida nos tópicos:

- (I) Carvão mineral, que aprofunda as informações sobre gênese do mineral, bem como sua utilização;
- (II) Drenagem ácida de minas e seus impactos, que apresenta as reações de oxidação para formação da drenagem, bem como os passivos ambientais envolvidos na temática;
- (III) Reservas brasileiras de carvão e reservas internacionais de carvão, que trazem uma visão ampla sobre a gestão do mineral dentro e fora do país;
- (IV) Os ensaios preditivos de geração de DAM, que apresentam os principais ensaios preditivos, com enfoque nas colunas de lixiviação, metodologia que será utilizado no presente estudo.

4.1. Carvão Mineral

O carvão mineral é um dos combustíveis fósseis mais utilizados e apresenta grande importância na matriz energética mundial. O mineral é o mais abundante e que apresenta uma maior perspectiva de reservas para utilização a longo prazo, o que o faz uma peça-chave para a reserva de energia global. Em relação a composição da matriz energética a nível mundial, o petróleo é elencado como principal recurso e em segundo lugar está o carvão mineral, contudo, se considerada a geração de eletricidade, o carvão é o principal recurso (Cosmo, 2020).

O mineral é formado a partir do processo de carbonificação, que consiste na solidificação da matéria orgânica depositada em bacias sedimentares. Esse processo ocorre devido à pressão e a temperatura exercidas durante o período geológico em um ambiente anóxico, no qual o material perde oxigênio e hidrogênio e enriquece em carbono. Segundo Borba (2001), existem diversos estágios da carbonificação, estes estão relacionados com a pressão, a

temperatura e a duração do processo. Quanto maior for a pressão, temperatura e duração, maior será o grau de carbonificação e, conseqüentemente, melhor a qualidade do carvão. Os estágios de carbonificação são a turfa, o sapropelito, o linhito, o carvão sub-betuminoso, o carvão betuminoso e o antracito, sendo o linhito o estágio mínimo para utilização na indústria.

São inúmeras as aplicações do carvão mineral, a mais significativa delas é a sua utilização para geração de energia elétrica em usinas termelétricas. Entre as aplicações no meio industrial, podemos citar a queima do carvão para a geração energia térmica para os processos de produção e da utilização do vapor aplicado no processo industrial para a produção de energia elétrica (Carniato, 2005).

O ciclo de utilização do carvão começa com a extração do carvão do solo, a fragmentação dos sólidos, seguida do armazenamento em áreas de manejo para ser direcionado ao consumidor, que o armazenará em nova área de manejo até sua utilização final. Posteriormente, o carvão é transformado em pó para melhor aproveitamento térmico na queima em caldeiras. O calor liberado por esta queima pode ser utilizado na geração de energia elétrica ou como co-geração. Para energia elétrica o calor contido no vapor é transformado em energia cinética, que movimenta a turbina do gerador de energia. No caso da co-geração, o vapor também é extraído para ser utilizado no processo industrial (ANEEL, 2016).

Um aspecto pouco explorado da gestão do carvão são as áreas de manejo e manuseio de carvão. Essas áreas são destinadas a receber os carregamentos do mineral, acondicioná-lo em pilhas em locais cobertos ou não e realizar o seu manuseio para posterior envio ao local de queima. Cabe ressaltar que, segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2016), o carvão que contém altos teores de impurezas é consumido nas proximidades do local não sendo transferidos, os demais podem ser transportados a longas distâncias e armazenados em áreas de manejo.

Em contraponto, toda a cadeia do carvão, desde a extração até a sua utilização, impacta o ambiente de forma negativa. A queima do carvão libera para a atmosfera nitrogênio, dióxido de carbono, óxidos de enxofre e outros elementos traços que estão presentes no mineral, o que apresenta um grande potencial poluidor. Estimativas apontam que o carvão é responsável por cerca de 30% a

35% do total de emissões de CO₂, principal agente do efeito estufa (ANEEL, 2016). Com a pauta do carbono neutro em voga mundial, principalmente em atenção aos grandes encontros como a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, a utilização do carvão como fonte de energia vem sendo questionada e, fontes de energia renováveis, preferidas. Além do impacto nas emissões atmosféricas, a extração e manuseio do carvão e seus rejeitos podem gerar drenagem ácida de minas, temática que será explorada no item 4.4 (pág. 9).

4.2. Reservas Brasileiras de Carvão

No Brasil podemos identificar reservas de carvão, de turfa, linhito e hulha em diversas regiões, como nos estados de São Paulo, Bahia, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, sendo a maior concentração de reservas nos últimos três estados. O Rio Grande do Sul corresponde a 89,25% das reservas nacionais, enquanto Santa Catarina, 10,41% e o Paraná, 0,32%. Cabe ressaltar que o minério brasileiro, de maneira geral, não é de boa qualidade quanto ao potencial energético e possui elevados teores de impurezas, cinzas e enxofre (ANEEL, 2016). Um dos problemas mais sérios relacionados ao carvão brasileiro devido a suas impurezas, principalmente na região sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, é o da geração de DAM (UBALDO et al., 2006).

Segundo a Portaria MME nº 540/2021 as reservas situadas no Rio Grande do Sul são na região dos municípios de Candiota, Butiá e Arroio dos Ratos que se destacam como as maiores produtoras de carvão mineral, enquanto no Paraná, o carvão mineral é extraído no município de Figueiras. Em Santa Catarina, os municípios de Criciúma, Treviso, Içara, Urussanga, Lauro Muller Orleans e Siderópolis se destacam pela produção do mineral.

Uma das mais notórias jazidas brasileiras está localizada no município de Candiota. A jazida apresenta grandes reservas e potencial de alta rentabilidade, entretanto, possui um carvão pobre energeticamente e que não admite beneficiamento nem transporte. Na região do Baixo Jacuí existem dez jazidas, São Sepé, Capané, Iruí, Pantano Grande, Leão, Sul do Leão, Água Boa, Faxinal, Arroio dos Ratos e Charqueadas, que apresentam um carvão pobre a médio

energeticamente e que pode ser realizado beneficiamento e transporte de curta distância (Borba, 2001).

Historicamente, a extração e utilização do carvão nacional culminou em diversos passivos ambientais, principalmente no estado de Santa Catarina. Devido à falta de normativas relacionadas à recomposição e à proteção do meio ambiente, foi observada a contaminação do solo, dos cursos de água e mananciais gerando passivos que são tratados até hoje e muitos deles ainda sem resolução (Portaria MME nº 540/2021).

Em relação a regramentos, o Brasil possui legislação referente às emissões de gases tipo NO_x e SO_x (Resolução CONAMA 436/2011), e em relação ao enquadramento de recursos hídricos (Resolução CONAMA 357/2005). Contudo, ainda carece de legislação específica em relação às emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o CO_2 e em relação ao controle de geração de DAM, seu tratamento e manejo.

4.3. Reservas Internacionais de Carvão

Em um contexto global, pode-se encontrar grandes reservas de carvão mineral em 75 países, sendo os Estados Unidos, a Rússia e a China os que contém as reservas mais robustas. A China destaca-se como maior produtora e consumidora mundial de carvão devido a sua estratégia de desenvolvimento econômico

Um ponto a ser destacado é o baixo índice de comércio internacional do carvão, o que contrapõe o porte das reservas e produção global. Essa condição se dá pelo alto custo de transporte e pelo fator estratégico de segurança nacional, em que o carvão é peça chave na geração de energia. Pode-se apontar apenas cinco países que realizam a transação internacional do carvão, Austrália, Rússia, Indonésia, África do Sul e Colômbia. Os países exportadores que abastecem o Brasil são África do Sul e Colômbia (ANEEL, 2016).

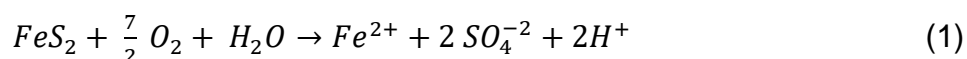
Na área objeto deste estudo, o carvão internacional é proveniente da Colômbia. As reservas colombianas apresentam um carvão com baixo teor de cinzas e baixas emissões de dióxido de enxofre. As reservas estão localizadas principalmente no norte da Colômbia, onde são encontradas a maior parte das

reservas de carvão da melhor qualidade, cerca de 98% do carvão colombiano (UPME 2012).

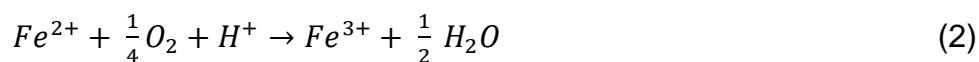
4.4. Drenagem Ácida de Minas e seus Impactos

A DAM pode ser definida como a solução ácida advinda da oxidação de minerais sulfetados, geralmente resíduos de mineração (rejeito ou estéril) em presença de ar e/ou de água. Segundo Guevara (2007), entre as principais fontes potenciais de geração de DAM estão as minas a céu aberto ou minas subterrâneas, bacias de rejeitos, pilhas de estéril e estoques de minério. A solução ácida se dá pela formação de ácido sulfúrico, que por sua vez auxilia na dissolução de metais. A drenagem ácida configura o maior problema ambiental relacionado à mineração devido ao potencial poluidor de corpos hídricos superficiais e subterrâneos, e com uma grande dificuldade de resolução.

As reações abaixo (1, 2 e 3) exemplificam o processo de geração de DAM pela oxidação da pirita em presença de água e oxigênio. Conforme demonstrado em estudo de Guevara (2007), a reação inicia com a oxidação do sulfeto pelo oxigênio gerando sulfato, Fe^{2+} e íons H^+ em solução, conforme apresenta a equação 1.

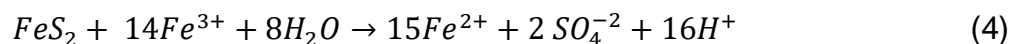


O Fe^{2+} é oxidado a Fe^{3+} e posteriormente ocorre sua hidrólise gerando hidróxido férrico e mais íons H^+ em solução, conforme as equações 2 e 3.



Conforme o pH diminui para valores iguais ou inferiores a 3,5, a reação de hidrólise do Fe^{3+} deixa de acontecer, aumentando a concentração de Fe^{3+} em solução, que atua como receptor de elétrons influenciando na oxidação de sulfetos e

mais produção de ácido, conforme a equação 4. O Fe^{3+} assume o papel de agente oxidante da pirita, sendo reduzido a Fe^{2+} , e o O_2 atua regenerando o Fe^{3+} .



Em consequência deste cenário, pode ser observada a formação de lagoas ácidas próximas a mineradoras e empresas utilizadoras de carvão, visto que a oxidação da pirita promove a diminuição do pH das águas, podendo diminuir de valores neutros para valores inferiores a 3,0, e solubilização de metais como cobre (Cu), níquel (Ni), cádmio (Cd), zinco (Zn), chumbo (Pb), cromo (Cr), ferro (Fe), mercúrio (Hg) e manganês (Mn), afetando direta e indiretamente as áreas circunvizinhas como fonte de poluição difusa, e causando mudanças substanciais no ecossistema aquático (Torrezini e Oliveira, 2013; Pimentel, 2007). Segundo CETEM (2015), devido a acidez, muitos fluxos a jusante da drenagem encontram-se sem vida por um longo período.

A diminuição do pH impacta de diversas maneiras o solo e a água da região afetada. No solo, o crescimento vegetal é comprometido devido à presença de metais como ferro, alumínio e manganês, bem como a fixação de fósforo é prejudicada levando a redução de bactérias fixadoras de nitrogênio (Campos *et al*, 2010). Nos corpos hídricos, a acidez e a presença de íons em solução, desequilibra as condições químicas e físicas da água, bem como impacta na sobrevivência dos organismos aquáticos, modificando suas estruturas e distribuição. Outro aspecto a ser considerado é a bioacumulação dos metais nos organismos vivos, sendo transmitida aos níveis tróficos superiores e favorecendo a biomagnificação (Spice, 1995).

O tratamento da DAM, com o objetivo de minimizar seus danos ambientais, pode ser realizado de forma ativa ou passiva. O tratamento ativo envolve a neutralização da sua acidez, seguida da precipitação e imobilização dos agentes dissolvidos. Os principais componentes neutralizantes são calcário, cal, cal hidratada e soda cáustica. Esse processo de tratamento gera grandes quantidades de lodo com alto teor de metais e se não gerido da forma correta, pode se tornar um potencial contaminação do meio (Dayube e Trindade, 2000). Ademais, essa técnica é considerada fim de tubo, visto que não compreende

metodologias de redução de geração ao longo do ciclo de gestão dos materiais minerados (Silveira et al., 2009).

Os métodos de tratamento passivo consistem em sistemas controlados onde as reações químicas naturais são os principais atores. Promove-se a criação de condições físico-químicas que favoreçam processos de precipitação e adsorção dos contaminantes, sem interferência ativa de adição de produtos químicos (Luz et al., 2002).

4.5. Ensaio Preditivos de Geração de DAM

Os ensaios preditivos de geração de DAM fazem parte do conjunto de métodos de controle e tratamento da drenagem. Os referidos métodos podem ser subdivididos em preditivos, preventivos e de remediação. Os métodos preditivos são normalmente realizados como anteprojeto de um empreendimento de mineração, e/ou quando há evidências de acidificação do meio em determinada fase do projeto e deseja-se avaliar o potencial de geração de acidez em fase avançada para introdução de medidas mitigadoras. Os métodos preventivos contam com o uso de tecnologias químicas para evitar que a drenagem seja gerada e, por fim, os métodos de remediação visam tratar o efluente ácido gerado (Abreu, 2012). Segundo Austrália (2016), a mineração só deve prosseguir se as investigações de geração de acidez confirmarem viabilidade de gerenciamento da DAM em perspectivas técnicas, econômicas e de reputação, incluindo durante a fase de fechamento.

Os ensaios preditivos de geração de DAM são de suma importância para identificar se o empreendimento tem potencial gerador do efluente ácido. Com a constatação do potencial de geração de drenagem ácida no material a ser minerado pode-se inserir e planejar ações de controle e ações mitigadoras adequadas para alcançar a redução de passivos ambientais e diminuir custos com medidas corretivas durante e no pós-operação (Guevara, 2007).

Ainda segundo a autora, a predição da DAM visa a representação de sistemas naturais complexos, que variam de acordo com a área (jazidas e áreas de manejo e manuseio) e o material em questão (mineral, rejeito e/ou estéril). Cabe ressaltar que existem diversas metodologias e na literatura não há a garantia de predição absoluta da DAM. Contudo, através dos ensaios preditivos

pode-se compreender o comportamento dos parâmetros físico-químicos que controlam a DAM e os potenciais pontos de geração de acidez, bem como estimar a qualidade da água de drenagem. Os ensaios laboratoriais preditivos de DAM podem ser classificados em métodos estáticos e cinéticos.

4.5.1. Ensaio Estático

Os ensaios estáticos avaliam o potencial de geração de drenagem comparando o potencial de acidificação (AP) com o potencial de neutralização (NP) dos materiais, entretanto não levam em conta aspectos cinéticos. Os ensaios cinéticos buscam incorporar a dinâmica dos elementos naturais da área de estudo, tornando a previsão mais próxima da realidade, reproduzindo as intempéries e ocasionando uma oxidação similar à observada no local. Esses ensaios indicam a taxa de oxidação de sulfetos e a formação de acidez, servindo como um indício para a DAM (Machado e Schneider, 2006).

Os métodos estáticos podem ser definidos como experimentos que analisam o equilíbrio entre o potencial de oxidação de minerais sulfetados, sua consequente geração de acidez, e a capacidade de neutralização da acidez, que consiste na avaliação da dissolução dos carbonatos e outros minerais geradores de alcalinidade (*Environment Australia*, 1997). Os principais métodos estáticos são o método de contabilização de ácidos e bases (*Acid Basic Accounting Method* – ABA), o método de contabilização de ácidos e bases modificado (*Modified Acid Basic Accounting Method* – ABA modificado), potencial de produção alcalina enxofre e balanço da produção ácida. Segundo Machado (2007), entre as vantagens dos ensaios estáticos pode-se citar a curta duração do experimento, a necessidade de pouca quantidade de amostra e baixos custos atrelados.

4.5.2. Ensaio Cinético

O objetivo dos métodos cinéticos é prever o potencial de drenagem ácida de minas simulando condições ambientais e processos encontrados nos locais alvo do estudo em função do tempo, podendo ser de curto a longo prazo, geralmente a uma taxa acelerada (Farfán, 2004). Entre os ensaios preditivos de

ordem cinética podemos citar os ensaios de células úmidas, desenvolvida a partir do procedimento padrão determinado pela norma ASTM D5744, os ensaios com extratores Soxhlet e os ensaios de colunas de lixiviação, sendo o último com uma gama variada de sistemas de colunas (Abreu, 2012). Os testes cinéticos, de maneira geral, consistem em submeter o material à lixiviação, com período de duração de alguns meses e analisar a solução resultante para parâmetros físico-químicos como pH, acidez, alcalinidade, condutividade elétrica, metais dissolvidos, taxa de oxidação e produção de sulfato (U.S.EPA 1994).

No método de colunas de lixiviação, o material é disposto em colunas e periodicamente é adicionado um determinado volume de água para que a água percole por toda a coluna. A quantidade de água inserida no sistema geralmente é resultante de uma análise da precipitação média da área do estudo. Os testes utilizando colunas podem ser realizados em laboratório, em escala piloto ou *in situ*. Após a percolação, são realizados testes físico-químicos para determinar quais parâmetros foram alterados a partir do contato com o material. Os sistemas de colunas de lixiviação não possuem padronização a partir de um procedimento operacional, dessa forma, existe uma grande variedade demonstrada na literatura (Abreu, 2012). Na Tabela 1 abaixo são listadas as metodologias que foram consideradas para execução deste trabalho:

Tabela 1 - Referências metodológicas colunas de lixiviação.

Referência	Breve descrição do método
Murta, 2006	Colunas de lixiviação de PVC 1 m Água semanalmente 5 kg de amostra Duração de 30 dias
Saria et al., 2006	Colunas de lixiviação 30 cm Água diariamente 100g de amostra Duração de 60 dias
Júnior et al, 2019	Colunas de lixiviação funil PVC Água semanalmente 2 kg de amostra Duração 6 anos
Pérez-López et al, 2007	Colunas de Lixiviação 20 cm Água semanalmente 870g de amostra Duração 30 semanas

Ainda, pode-se citar ensaios adicionais que auxiliam na caracterização do potencial de geração de DAM, bem como na caracterização do efluente. Em estudo de Murta (2006), foram realizados ensaios de coluna de lixiviação padrão e em colunas com material submerso, as chamadas colunas afogadas. Com a adição do ensaio de material submerso, a autora teve por objetivo simular a zona que se encontra inundada no interior da pilha de material, analisando se há contribuição para a formação de drenagem ácida na área saturada.

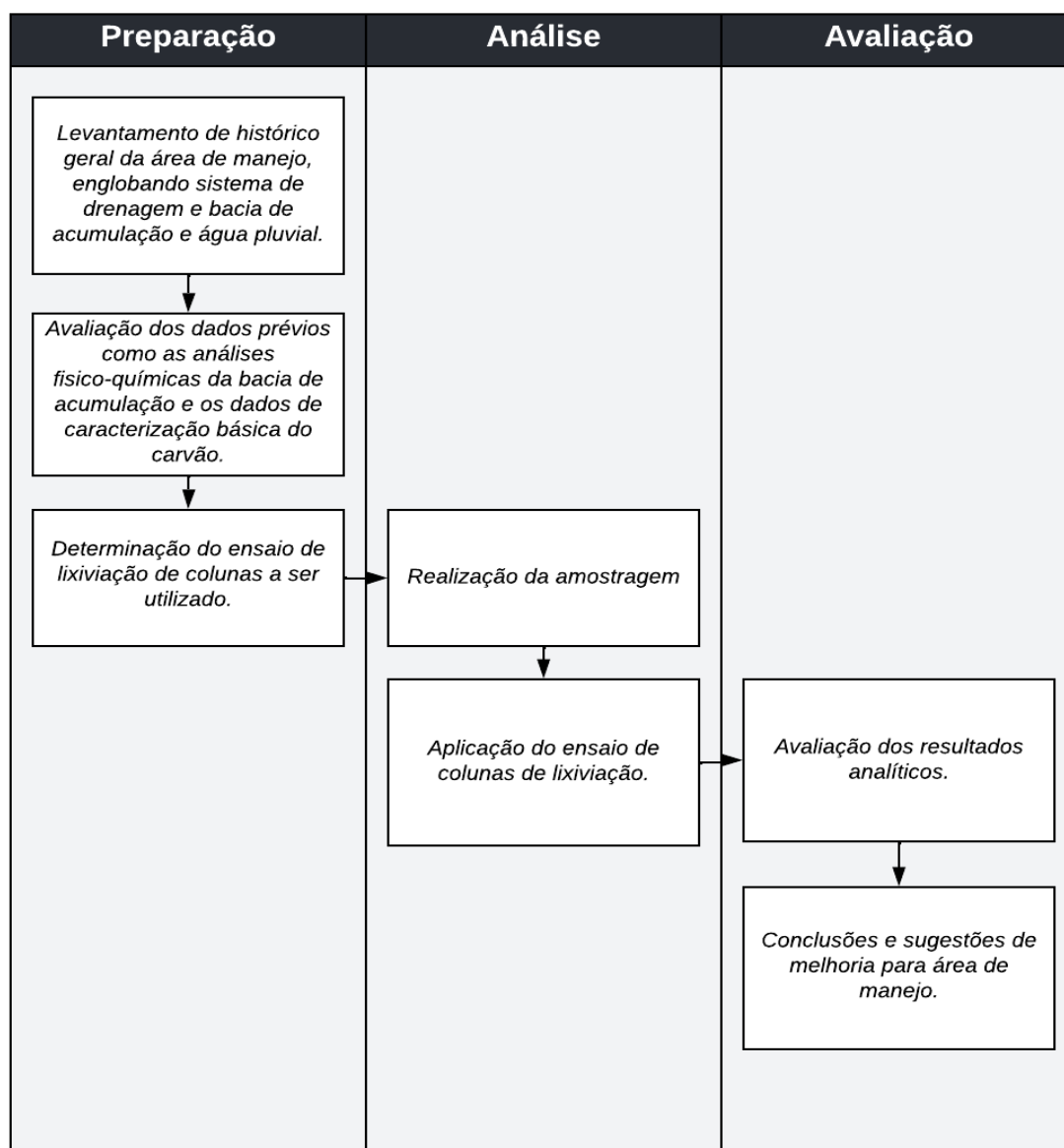
5. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo utiliza metodologia experimental, na qual o objeto de estudo, amostras de carvão de área de manejo de carvão situada no Rio Grande do Sul, foram expostas à influência de variáveis relacionadas a sua oxidação, em condições controladas e conhecidas. O ensaio será controlado quanto à altura do material analisado, volume de água para lixiviação, bem como a periodicidade de análise do efluente gerado. A pesquisa é classificada como de método aplicado, visto que serão utilizados conhecimentos teóricos para realização de análises em laboratório. A abordagem será quali e quantitativa, pois será realizada análise crítica dos resultados analíticos numéricos, bem como análise qualitativa do contexto geral dos resultados e suas consequências. A análise dos dados será descritiva e comparativa, avaliando os resultados de diferentes amostras e métodos.

A avaliação temporal do estudo é transversal, por retratar uma delimitação específica representativa para um curto espaço de tempo, carvão mineral do carregamento do dia 20/06/2022. Já a aplicação do método é considerada multitempo e longitudinal, visto que o experimento, através de duas metodologias distintas de colunas de lixiviação, irá simular a geração de efluentes e avaliar parâmetros físico-químicos durante o período de dez semanas, comparando seus resultados.

As etapas de realização do estudo estão descritas abaixo no fluxograma da Figura 1. O trabalho engloba a etapa de preparação, na qual são delimitados os objetivos e consolidadas as informações previamente existentes, a etapa de análise na qual é realizada a amostragem do mineral e o experimento laboratorial em colunas de lixiviação e, por fim, a etapa de avaliação na qual são avaliados criticamente os resultados analíticos obtidos, bem como realizadas as conclusões e sugestões de melhoria.

Figura 1 - Fluxograma das etapas do estudo.



Fonte: O autor

5.1. Área de estudo

O local objeto do estudo é uma área utilizada para armazenamento e manejo de carvão situada no Rio Grande do Sul. A área de aproximadamente 60.000 m² recebe carvão de minas do próprio estado, denominado carvão nacional (CN), e recebe carvão de mineração colombiana, denominado carvão internacional (CI). Ademais, a área realiza o manuseio deste mineral em *blends* (CB), combinando os dois tipos supracitados em frações previamente determinadas pelo consumidor. O CN é proveniente dos municípios Arroio dos

Ratos, Butiá e Charqueadas, municípios situados no Rio Grande do Sul. O transporte do mineral até a área de manejo é realizado por duas vias, fluvial e rodoviária.

O carvão é armazenado em pilhas trapezoidais de acordo com a sua origem, nacional ou importado, e de acordo com a composição de *blend* requerida para queima. O *blend* de carvão é definido a partir das seguintes variáveis: preço, disponibilidade e adequação aos parâmetros legais de geração de emissões atmosféricas em sua queima, conforme Resolução CONAMA nº 436/11. Conforme descrito no item 4.3. Reservas Internacionais de Carvão, a composição do carvão internacional apresenta menor geração de emissões poluentes, entretanto devido ao elevado custo logístico, o *blend* com carvão nacional, de qualidade inferior, visa otimizar a relação custo *versus* emissões. Compõem a área um galpão pilha viva, uma moega, um pátio aberto, três armazéns cobertos, área administrativa e um sistema de drenagem pluvial, envolvidos por cortina vegetal densa, como pode-se observar no mapeamento abaixo a área do estudo (Figura 2).

Figura 2 - Área de Manejo de Carvão.

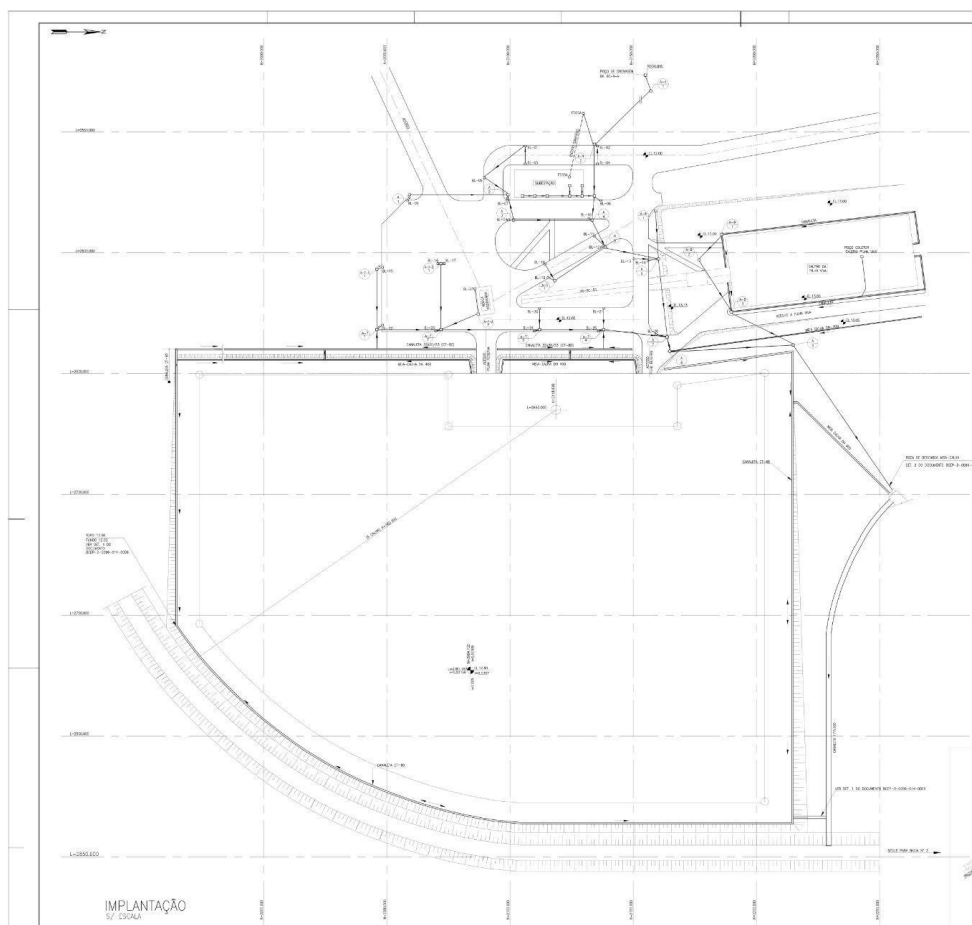


Fonte: Google Earth, 2022.

5.1.1. Sistema de Drenagem Pluvial

O sistema de drenagem envolve a área em sua totalidade e visa direcionar a água remanescente de eventos de precipitação através de canaletas, evitando acúmulos de água com potencial de interferência nas operações. A água é canalizada das canaletas para um sistema de chicanas e posteriormente a uma bacia de acumulação de água, que por sua vez desemboca no rio que circunda o empreendimento. O sistema de chicanas visa reter os sólidos provenientes do manejo de carvão, que tem potencial de carreamento pelas intempéries, a fim de reduzir o impacto da acumulação de sedimentos do mineral na bacia. A planta baixa apresentada na Figura 3, aponta a conformação do sistema de drenagem e suas especificidades.

Figura 3 - Planta da área de manejo com ênfase no sistema de drenagem.



Fonte: Planta baixa concedida pelo empreendimento.

As canaletas são de concreto e contornam toda a área e estão representadas apresentadas na Figura 4. A drenagem é direcionada para porção baixa do empreendimento, onde as canaletas são mais robustas e direcionam toda a água para as chicanas.

Figura 4 - Canaletas de concreto.



Fonte: O autor

As chicanas são demonstradas na Figura 5. São realizadas limpezas periódicas quinzenais no sistema de canaletas para garantir sua eficácia e integridade, bem como após grandes eventos de precipitação. Manutenções no sistema de chicanas são realizadas conforme necessidade.

Figura 5 - Chicanas do sistema de drenagem pluvial.



Fonte: O autor.

Após a passagem da água pelas chicanas, a drenagem segue para bacia de acumulação de água pluvial, conforme Figura 6. A bacia tem a capacidade de 72.000 m³, com altura normal do nível d'água de 10,40 metros.

Figura 6 - Área de manejo de carvão e bacia de acumulação de água.



Fonte: Google Earth, 2022.

5.1.2. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos são acompanhados diariamente na região por meio de uma estação meteorológica localizada na indústria vizinha ao empreendimento, que é operada e acessada em plataforma on-line. Os dados acompanhados são os de velocidade do vento, chuva, umidade, temperatura, radiação solar e pressão atmosférica. As informações referentes à precipitação são de suma importância para identificar a sua influência na lixiviação das pilhas de carvão. O mineral exposto ao escoamento da precipitação, segundo Pimentel (2009), tem potencial de gerar drenagens ácidas e segundo Abreu (2012) a disposição do material sulfetado em pilhas propicia uma maior difusão de oxigênio e alta permeabilidade que associada à presença de sulfetos, favorecem a formação de drenagem ácida.

Os dados disponibilizados foram dados diários de precipitação de maio de 2019 a maio de 2022. Assim como em Murta (2006), a altura de precipitação em milímetros fornecida pela estação meteorológica foi transformada em volume

de água no item 6.1. Análise pluviométrica e utilizado como premissa para o ensaio de lixiviação, a fim de simular de forma assertiva a pluviosidade local.

5.1.3. Bacia de Acumulação de Água Pluvial

Conforme descrito no item 5.1.1. Sistema de Drenagem Pluvial a drenagem de água pluvial da área de manejo é direcionada à bacia de acumulação de água pluvial. A bacia de acumulação é ilustrada na Figura 7. As suas águas são monitoradas periodicamente, por empresa consumidora do carvão como requisito legal, para parâmetros físico-químicos, com o objetivo de acompanhar a sua qualidade ambiental. São realizadas análises semanais dos parâmetros pH, condutividade, oxigênio dissolvido, temperatura do ar e da água, e trimestrais para os parâmetros benzeno, éter etil-terc-butílico (ETBE), etilbenzeno, éter metil terc-butílico (MTBE), tolueno, xilenos, alumínio dissolvido (Al), arsênio (As), bário (Ba), berílio (Be), cádmio, (Cd), chumbo (Pb), cobalto (Co), cobre dissolvido (Cu), cromo total (Cr), ferro dissolvido (Fe), lítio (Li), manganês (Mn), mercúrio (Hg), níquel (Ni), prata (Ag), selênio (Se), vanádio (Vn) e zinco (Zn). Além disso, anualmente são realizados ensaios de ecotoxicidade para três níveis tróficos diferentes, para garantir a sua adequação às exigências legais.

Figura 7 - Bacia de Acumulação de Água Pluvial.



Fonte: O autor

5.2. Amostragem

A coleta de amostras de carvão mineral da área de manejo ocorreu na data 20/06/2022. No dia da coleta o tempo estava ensolarado, entretanto devido à alta pluviosidade no dia 17/06, as pilhas de carvão encontravam-se úmidas e pôde-se verificar sedimentos nas canaletas do sistema de drenagem. Ademais, a rotatividade do carvão estava alta, com tráfego rodoviário intenso no local, com estoque aproximado de 7.500 toneladas de mineral. Os dados climáticos para a data em questão podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Informações do tempo de 20/06/2022, data da amostragem.

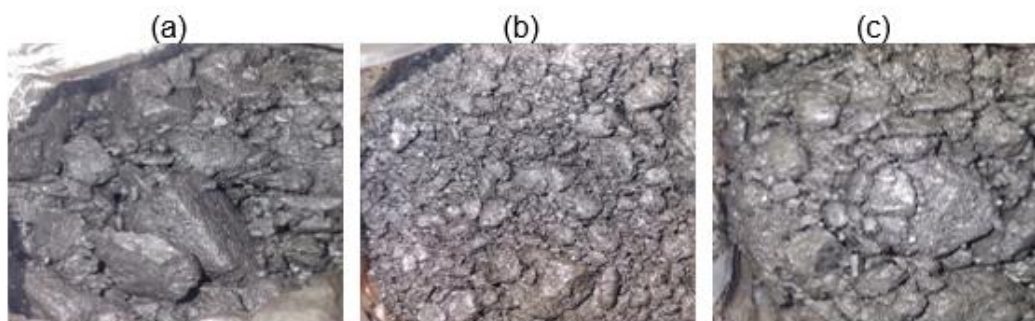
	Vento (m/s)	Chuva (mm)	Umidade e (%)	Temperatur a (°C)	Radiação (Mj/m ²)	Pressão máxima (mB)
Máxima	2,50	0,00	100,00	19,53	490,3	1025
Média	0,47	0,00	90,35	11,04	124,78	1021
Mínima	0,29	0,00	70,73	5,84	0,00	1020

Fonte: Estação meteorológica.

A amostragem foi realizada utilizando-se pá e sacolas plásticas transparentes para acondicionamento e transporte até o laboratório de desenvolvimento tecnológico (LADETEC), localizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas do Campus do Vale. As amostras foram rotuladas e enviadas ao laboratório no dia 22/06/2022 para acondicionamento até a data de início da etapa experimental.

Foi coletado aproximadamente 5 kg de amostras, divididas entre carvão nacional, carvão importado e carvão *blendado*. O *blend* em atividade na data foi de 40% de carvão internacional e 60% do carvão nacional. É apresentada abaixo a Figura 8, ilustrando os minerais coletados.

Figura 8 - (a) Amostra de Carvão Nacional, (b) Amostra de Carvão Internacional e (c) Amostra de Carvão Blend.



Fonte: O autor.

5.3. Caracterização Básica do Carvão

A caracterização básica do carvão mineral, que é objeto desse estudo, é realizada pelo fornecedor e encaminhada junto a todos os carregamentos realizados. Essa análise engloba a caracterização quanto ao poder calorífico superior e inferior, a umidade total, a análise elementar de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, halogênios, a análise imediata de cinzas, material volátil, carbono fixo e enxofre total, a análise química das cinzas, a granulometria e a fusibilidade das cinzas. Em paralelo, a área de manejo mantém contrato com laboratório para realização de ensaios mais detalhados com 12 amostragens ao mês. Ademais, os consumidores do carvão ainda realizam análises para o parâmetro enxofre, com o objetivo de contestar os dados do fornecedor, devido a necessidade de se manter dentro dos parâmetros legais de emissão de SOx.

Foram disponibilizados os ensaios de caracterização do carvão referentes ao material armazenado na área de manejo para todo o mês de junho, incluindo a data da amostragem, e eles serão avaliados no item 6.3. Caracterização Básica do Carvão Cabe ressaltar que há uma variabilidade importante entre os componentes do carvão devido à alta rotatividade na área.

5.4. Ensaio Preditivo de Geração de DAM em colunas de lixiviação

O ensaio escolhido para predição de geração de DAM foi o ensaio cinético de colunas de lixiviação, devido a sua versatilidade na representação de sistemas complexos e simples execução. O ensaio foi uma adaptação das metodologias de colunas de lixiviação descritas por Saria *et al* (2006) e Murta (2006), englobando colunas de lixiviação tradicionais e colunas de lixiviação afogadas. A metodologia tradicional conta com a percolação de água pela coluna preenchida por carvão mineral, enquanto a metodologia afogada consiste no contato da água com o mineral de maneira estática.

O ensaio contou com a utilização de 8 colunas de lixiviação de material PVC, com altura de 50 cm e 1 polegada (32 mm) de diâmetro e orifícios para entrada (27,8 mm) e saída de água (4 mm). Das 8 colunas, 2 contendo carvão nacional, 2 contendo carvão importado e 4 contendo carvão *blend*. Os experimentos para as primeiras 6 colunas (2 CN, 2 CI e 2 CB) consistiram na

percolação de água desmineralizada, de propriedades conhecidas, pelas amostras coletadas monitorando-se semanalmente os parâmetros químicos e físico-químicos do lixiviado. Para as demais colunas (2 CB) foi realizado o experimento de metodologia afogada, no qual o orifício para saída de água se manteve fechado durante o período de uma semana e realizada a amostragem monitorando-se o lixiviado da mesma forma que as colunas tradicionais (Figura 9).

Figura 9 - (a) Esquema colunas de lixiviação, (b) Colunas de lixiviação.



onde **CN 1**: Coluna de Lixiviação/Carvão Nacional; **CN 2**: Coluna de Lixiviação/Carvão Nacional; **CI 1**: Coluna de Lixiviação/Carvão Importado; **CI 2**: Coluna de Lixiviação/Carvão Importado; **CB 1**: Coluna de Lixiviação/Carvão Blend; **CB 2**: Coluna de Lixiviação/Carvão Blend; **CAB 1**: Coluna Afogada/Carvão Blend; **CAB 2**: Coluna Afogada/Carvão Blend.

Fonte: O autor

A quantidade de material a ser lixiviado foi obtido a partir da relação entre a altura da coluna e a altura requerida de carvão, definida como 40 cm. Essa

relação foi estabelecida visto que, devido a granulometria não uniforme, a massa de carvão teria uma grande variabilidade entre as colunas, não sendo uma das variáveis de análise primária.

Ainda referente à granulometria diversificada, a padronização do tamanho da partícula foi impossibilitada devido a sua umidade. Como o trabalho em questão visa uma simulação do cenário real, foi realizada estratificação manual do mineral, visando a alocação dos sólidos grosseiros na parte inferior da coluna e os sólidos finos na parte superior.

Conforme metodologia utilizada por Murta (2006), a quantidade de água desmineralizada necessária para simular a área de manejo foi estimada a partir dos dados de precipitação apresentados no item 6.1. Análise pluviométrica para o período de um ano.

Para estimar o volume anual de precipitação e dividi-lo pelo período de 10 semanas (duração total do ensaio), considerou-se a precipitação média anual de 1699 mm (2020 e 2021) e considerou-se a área da coluna de lixiviação em 0,005 m², obtendo-se aproximadamente 830 mL de água desmineralizada semanalmente, um total de 8,30 L no período total do ensaio.

Além do método de lixiviação em colunas, foi utilizado, conforme Murta (2006), o ensaio de colunas afogadas. Com esta metodologia objetivou-se simular a zona saturada no interior das pilhas de carvão, bem como do mineral que é carregado para o sistema de drenagem e fica armazenado em área inundada, avaliando a sua contribuição para geração de acidez. As colunas de metodologia afogada foram preenchidas com 40 cm de mineral, sendo totalmente saturada com água desmineralizada, aproximadamente 170 mL, de acordo com a disponibilidade de espaço na coluna.

5.5 Análises Físico-Químicas do Efluente

Conforme exposto no item 5.5 Análises Físico-Químicas do Efluente, foram monitorados parâmetros químicos e físico-químicos para avaliar a geração de acidez no lixiviado. Foram analisados os seguintes parâmetros: pH, condutividade e íons dissolvidos (ânions: fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, fosfato e sulfato; e cátions: lítio, sódio, amônio, potássio, magnésio e cálcio). A periodicidade de análise foi semanal.

Os parâmetros escolhidos estão relacionados ao monitoramento da geração de drenagem ácida. A oxidação de minerais sulfetados diminui o pH, sendo este o parâmetro mais importante para o acompanhamento da geração de acidez. Em paralelo, outro parâmetro importante para acompanhamento é a condutividade, que indica a concentração dos íons presentes na solução. A condutividade depende da presença de cátions e ânions e da temperatura da água. Em relação aos cátions e ânions dissociados em solução, seu monitoramento traduz quais substâncias estão presentes no carvão mineral analisado. Os parâmetros selecionados para análise estão relacionados aos requeridos na Resolução CONAMA 357/2005, bem como sua relação com o monitoramento da acidez.

5.5.1. pH

O pH, potencial hidrogeniônico, é uma escala numérica logarítmica que mede a acidez ou basicidade de uma solução. A diminuição do parâmetro pH aponta um aumento da acidez e o parâmetro é monitorado com o auxílio do equipamento pHmetro. O equipamento é composto por um eletrodo, que é submerso na amostra, e um circuito potenciômetro, produzindo milivolts que são convertidos em uma escala de pH (Silva, 2018). O equipamento utilizado para monitoramento foi pHmetro DM-22 da marca DIGIMED com análise de pH na faixa de medição de -2 a 20.

5.5.2. Condutividade

A condutividade elétrica é a medida do potencial elétrico, isto é, a capacidade que o material possui de conduzir correntes elétricas. Esse potencial está intrinsecamente relacionado à presença de íons em solução, cátions e ânions. O parâmetro foi monitorado com a utilização do equipamento condutivímetro DM-32 da marca DIGIMED com análise de condutividade de 0,01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 2 S/cm .

5.5.3 Cátions e Ânions

Os íons presentes na solução lixiviada, cátions e ânions, informam quais são os elementos presentes no material exposto à lixiviação que podem estar se

dissociando. O principal íon de interesse é o ânion sulfato (SO_4^{2-}), devido a sua relação com a geração de H_2SO_4 , subproduto da oxidação da pirita. Entre os demais íons, foram selecionados os elementos que poderiam estar presentes no carvão, pode-se citar os ânions fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato e fosfato e os cátions lítio, sódio, amônio, potássio, magnésio e cálcio.

As análises foram realizadas com o cromatógrafo Eco IC Metrohm 2.925.0020, com coluna de cátions e ânions. A coluna de cátions foi Metrosep C4 - 150/4.0 e o eluente de cátions foi 1.7 mmol/L ácido nítrico / 0.7 mmol/L ácido dipicolínico, já a coluna ânions foi Metrosep A Supp 5 - 250/4.0 e eluente de ânions 3.2 mmol/L Na_2CO_3 / 1.0 mmol/L NaHCO_3 . Os tempos de corrida dos cátions e ânions analisados estão descritos na *Tabela 3* abaixo.

Tabela 3 - Tempos de análise de cada íon no cromatógrafo.

Parâmetro	Tempo (min)
Ânions	
Fluoreto	5,3
Cloreto	8,3
Nitrito	10,1
Brometo	13,0
Nitrato	15,1
Fosfato	19,7
Sulfato	21,1
Cátions	
Sódio	5,2
Amônio	5,8
Potássio	8,0
Cálcio	14,3
Magnésio	19,2

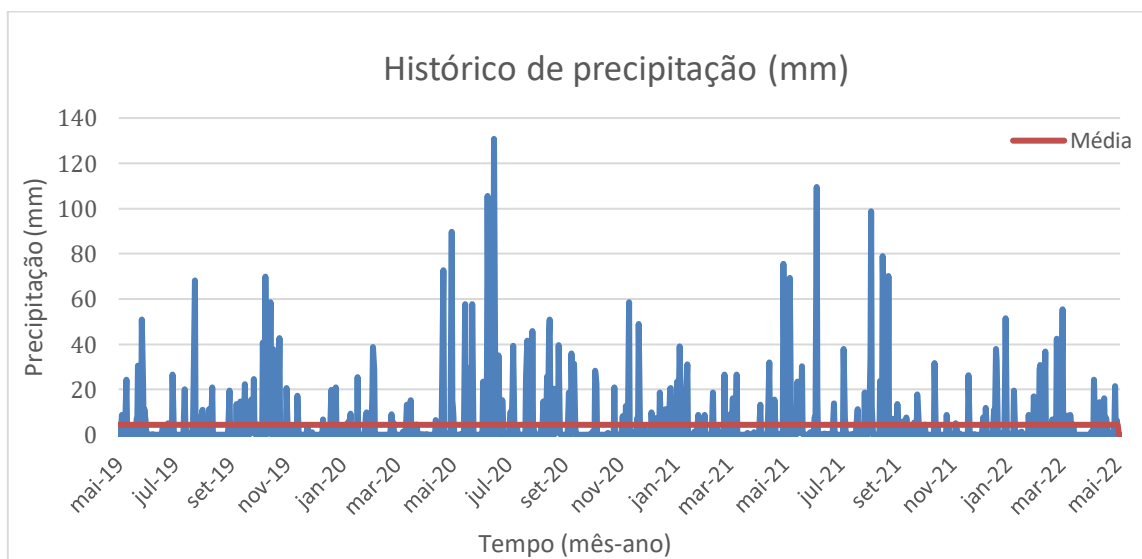
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão apresentados na seguinte ordem: resultados auxiliares e resultados principais. Os resultados auxiliares forneceram subsídio para atingir o objetivo geral do trabalho. Foram explorados os dados meteorológicos de interesse, os dados referentes aos parâmetros de monitoramento da bacia de acumulação de água pluvial e os dados básicos de caracterização do carvão amostrado. Por fim, em relação aos resultados principais, eles são analisados comparativamente para os ensaios físico-químicos dos lixiviados gerados, amparando os objetivos geral e específicos do trabalho.

6.1. Análise pluviométrica

Conforme descrito no item 5.1.2. Dados Meteorológicos, a precipitação média diária de maio de 2019 a maio de 2022 pode ser observada na Figura 10 abaixo.

Figura 10 - Precipitação média entre o mês de maio de 2019 a maio de 2022.



Fonte: Estação meteorológica.

Utilizando-se os dados diários de precipitação de maio de 2019 a maio de 2022, obtém-se uma média de 4,4 mm/dia e 30,7 mm/semana. Considerando os

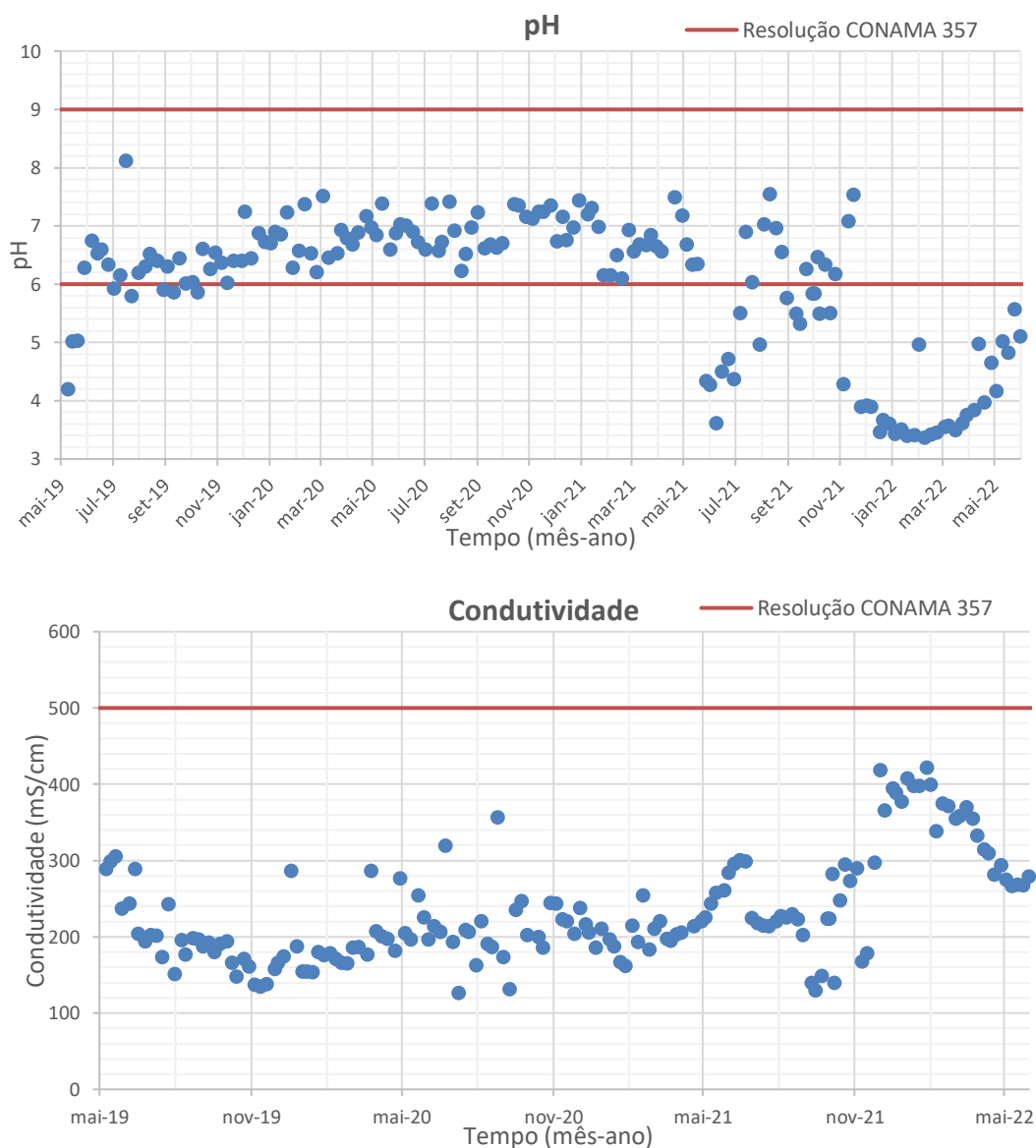
anos de 2020 e 2021, tem-se uma média anual de 1699 mm/ano. A altura de precipitação semanal foi transformada em volume de água semanal e utilizado como premissa para o ensaio de lixiviação.

Para realização do cálculo considerou-se a área transversal da coluna em 5.016 mm² e a precipitação média anual de 1699 mm. Sendo assim, adicionou-se à coluna 830 mL de água destilada uma vez por semana, totalizando um volume de 8,30 L ao longo do experimento completo. Cabe ressaltar que o volume semanal foi o descrito acima quando houve percolação suficiente pela coluna.

6.2. Análise da Bacia de Acumulação de Água Pluvial

A Figura 11, a e b, apresentam os resultados obtidos para os parâmetros pH e condutividade no período de maio de 2019 a maio de 2022, cedidos pelo empreendimento consumidor de carvão. De maneira geral, os dados históricos obtidos para a bacia encontram-se em conformidade com a Resolução CONAMA nº 357/2005, que se refere ao enquadramento de recursos hídricos. Entretanto, nos últimos meses do ano de 2021, bem como nos meses iniciais de 2022, foram obtidos resultados abaixo do esperado para o parâmetro pH e o inverso para condutividade.

Figura 11 - Histórico do parâmetro (a) pH e (b) condutividade para a bacia de contenção em relação a faixa de padrão da Resolução CONAMA 357.



Fonte: Monitoramentos de qualidade ambiental.

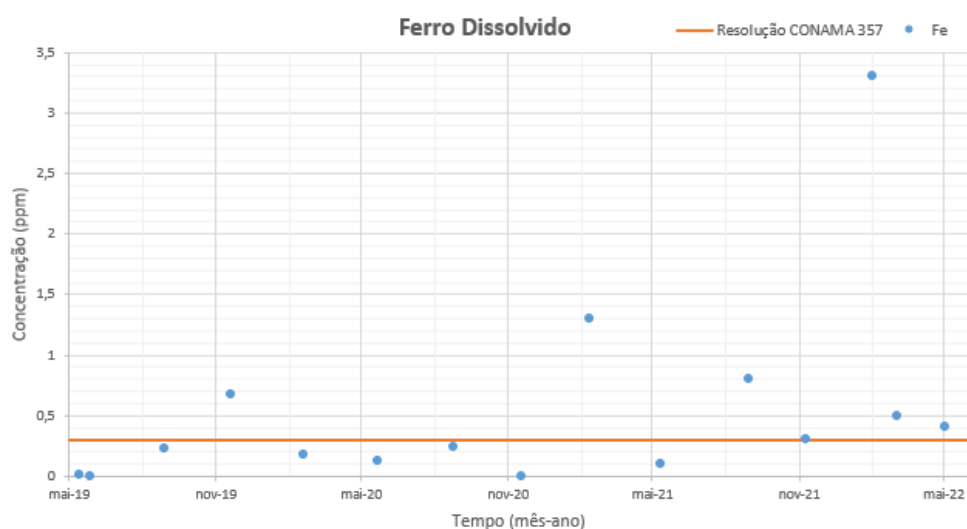
Esse evento pode estar relacionado com uma concentração do material lixiviado no corpo hídrico, isto porque, conforme Figura 10, foi observada uma grande precipitação nos meses que antecedem os desvios de qualidade (setembro e outubro), o que pode ter causado uma maior lixiviação do material, seguido de meses quentes (novembro a maio) e com uma menor precipitação. Nesse contexto, o material carregado e oxidado pode ter sido concentrado na bacia. Outro aspecto a ser considerado é a qualidade do carvão para o período,

devido à grande variabilidade e rotatividade do carvão na área de manejo, este cenário pode ser relacionado com uma estocagem de carvão de qualidade inferior.

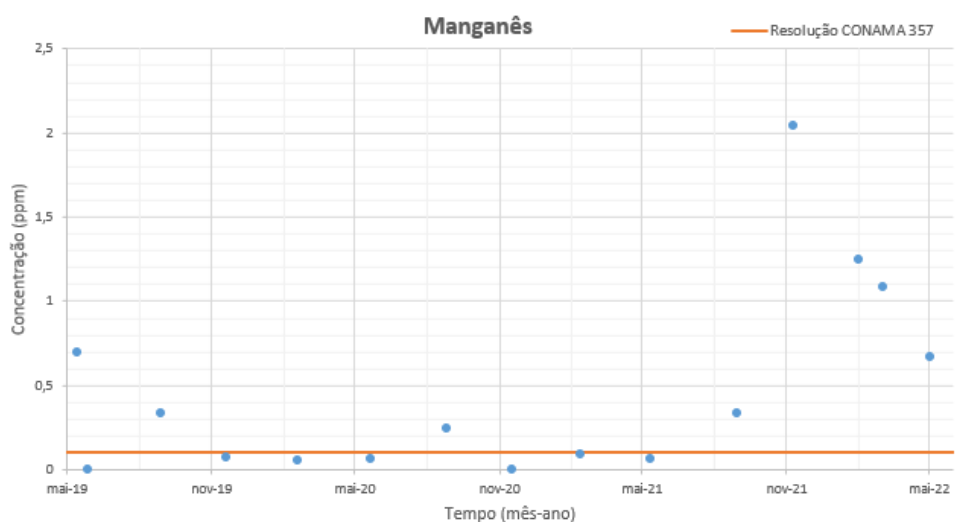
Ademais, podemos citar alguns parâmetros de elementos metálicos que não estiveram enquadrados para o mesmo período em que as análises de pH apontaram acidez elevada. Entre os metais que apresentaram comportamento divergente ao histórico podemos citar, Fe (ferro), Mn (manganês), Al (alumínio) e Cd (cádmio), conforme apresenta a Figura 12 a, b c e d.

Figura 12 - Valores de concentração de ferro dissolvido, manganês, alumínio e cádmio nas amostras coletadas entre maio/2019 e maio de 2022.

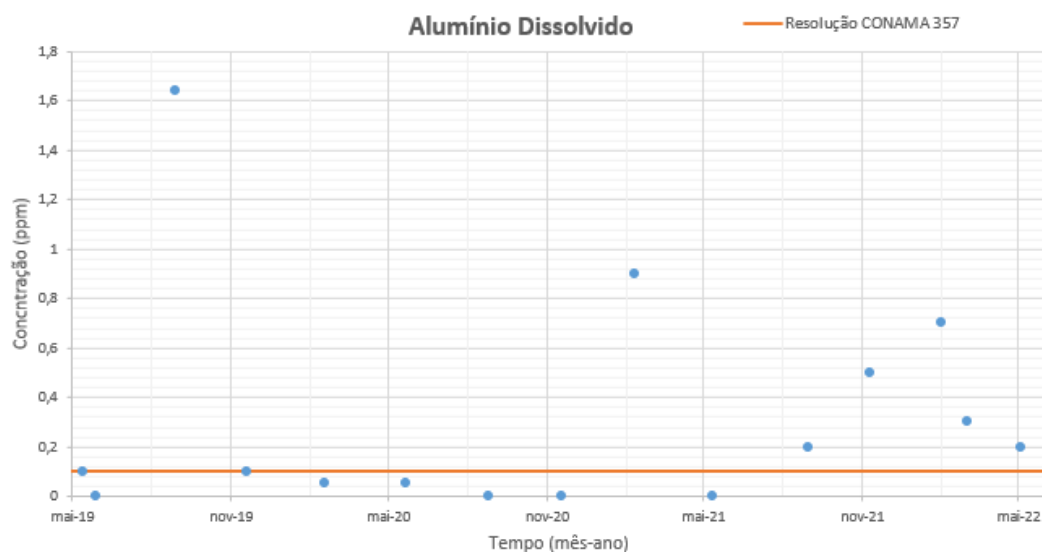
(a)



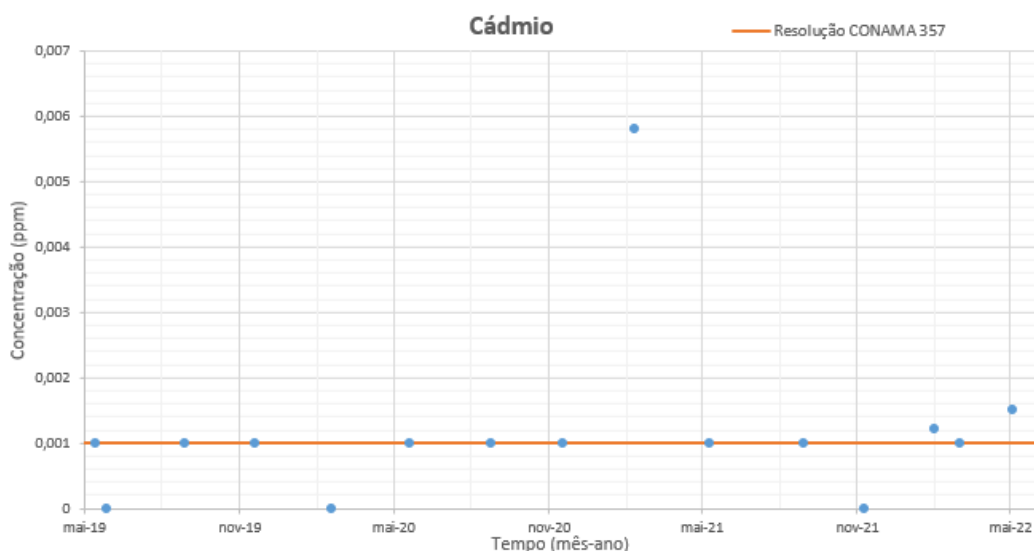
(b)



(c)



(d)



Fonte: Monitoramentos de qualidade ambiental.

Os metais apresentados, em especial alumínio, ferro e manganês, são metais presentes em abundância no solo do Rio Grande do Sul, contudo, os valores para o período de outubro de 2021 a maio de 2022, são divergentes do histórico. Uma das causas potenciais do aumento da concentração de metais é o aumento da acidez e conseqüente redução do pH. Devido a geração de ácido, a solubilização de metais é facilitada, o que pode implicar em impactos diversos no corpo d'água, se não acompanhado e tratado da forma correta.

A partir da delimitação deste cenário, entendeu-se a necessidade de investigar uma das potenciais causas raiz: a possibilidade de geração de

drenagem ácida advinda da drenagem pluvial da área de manejo de carvão, escopo deste trabalho. Essa investigação direcionada deve-se pelas características ambientais observadas que se relacionam com a geração de drenagem ácida.

6.3. Caracterização Básica do Carvão

Conforme descrito no tópico 5.1. Área de estudo carvão recebido na área de manejo é proveniente de duas vias logísticas, fluvial e rodoviária. Os laudos de caracterização do mineral são divididos conforme sua origem (nacional ou importado), seu poder calorífico (PC) e seu carregamento (fluvial ou rodoviário). A classificação em relação ao poder calorífico, é denominada Carvão Energético (CE), seguida da numeração aproximada de PC. No ano de 2022, para o carvão nacional, somente foi utilizado o de caracterização CE5000, ou seja, que possui PC médio de 5000 kcal/kg. Em relação ao carvão internacional, no período do estudo, o PC foi de 6600 kcal/kg.

Os dados referentes ao mês de junho, mês referente à coleta das amostras, fornecidos para os diferentes tipos de carvão podem ser apreciados na Tabela 4 para carvão nacional, das diferentes vias logísticas, e Tabela 5, para o carvão internacional. Os minerais advindos de ambas as vias logísticas não possuem grande variabilidade entre si. Ressalta-se, porém, que o carregamento rodoviário apresenta, para os parâmetros cinzas, enxofre total, material volátil e PC, uma qualidade inferior ao carregamento fluvial.

Tabela 4 - Caracterização do carregamento de carvão nacional via fluvial e rodoviária para junho/22.

Parâmetro	Unidade	Média via Fluvial	Média via Rodoviária
Cinzas	%	32,19	32,24
PC	cal/g	5010,40	5003,21
Enxofre Total	%	0,67	0,68
Umidade total	%	14,58	14,48
Matéria Volátil	%	31,42	31,58
Carbono Fixo	%	36,40	36,16
Granulometria	< 1,00 mm (%)	1,01	1,02
	3,35 mm (%)	33,59	33,19
	> 12,35 mm (%)	35,98	35,89

Fonte: Relatórios de caracterização de carvão.

O acompanhamento de qualidade do carvão é realizado por diferentes fornecedores, desta forma, não são os mesmos parâmetros analisados para o CN e CI.

Tabela 5 - Caracterização do carregamento de carvão internacional para junho/22.

Parâmetro	Unidade	Média
Cinzas	(%)	10,22
PCS	(cal/g)	6625,00
Enxofre total	(%)	0,67
Umidade Total	(%)	7,78
Matéria Volátil	(%)	38,42
Carbono Fixo	(%)	51,36
Carbono total	(%)	64,74
Hidrogênio	(%)	5,45
Nitrogênio	(%)	1,13

Fonte: Relatório analítico de caracterização do carvão internacional.

A grande diferença entre os tipos de carvão, nacional e internacional, além do poder calorífico, é o teor de enxofre. Conforme descrito no item 4.2. Reservas Brasileiras de Carvão, a qualidade do carvão nacional é inferior à do carvão internacional, dessa forma, como instrumento de gestão, existe uma cláusula no contrato do fornecedor, na qual o teor máximo permitido de enxofre é de até 0,81%. Em relação aos dados de junho, a maior porcentagem de enxofre encontrado foi de 0,79%, enquanto a menor foi de 0,55%, apresentando grande variabilidade na qualidade do mineral. O valor médio para o CI foi similar ao do CN, 0,67%, entretanto o desvio padrão do teor de enxofre é menos expressivo, não apontando valores altos para sulfatos como na amostra de CN que chegou a 0,79%.

Além da análise de caracterização básica enviada pelo fornecedor, a empresa utilizadora do mineral realiza análises de enxofre a fim de validar os dados recebidos e garantir emissões adequadas após a queima. Os laudos referentes ao mês de junho têm seus dados expostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos laudos para análise de enxofre no carvão utilizado pela indústria.

Data	Tipo	Resultado Enxofre	Unidade
21/06/2022	<i>Blend</i>	0,5	% em massa
21/06/2022	<i>Blend</i>	0,5	% em massa
22/06/2022	<i>Blend</i>	0,5	% em massa
22/06/2022	<i>Blend</i>	0,5	% em massa
23/06/2022	<i>Blend</i>	0,8	% em massa

Fonte: Relatórios emitidos pelo laboratório da empresa consumidora de carvão.

Pode-se observar que os dados enviados pelo fornecedor são compatíveis e/ou mais conservadores que os valores obtidos pela empresa, com exceção do dia 23/06, no qual o valor obtido ficou equivalente ao limite contratual. Outro aspecto a ser considerado é a diferença de granulometria, o carvão nacional possui uma granulometria bastante robusta, com mais de 30% das partículas maiores que 12,5 mm. O carvão internacional por sua vez, possui uma granulometria menor, conforme Figura 8 explorada no item 5.2. Amostragem

6.4. Ensaio Preditivo de Geração de DAM

6.4.1. Colunas de Lixiviação

Os ensaios experimentais realizados em colunas de lixiviação tiveram início em 29/06/2022 e duração de 10 semanas. Conforme descrito no item 5.4. Ensaio Preditivo de Geração de DAM em colunas de lixiviação, o ensaio consistiu na percolação e estagnação de água deionizada por colunas preenchidas com os tipos de carvão mineral, e analisados os seus lixiviados.

6.4.1.1 - Adição de água

A água adicionada às colunas teve seus parâmetros controlados e foi utilizada como branco para avaliação dos resultados analíticos. Ainda, a introdução de água variou conforme o método, colunas de lixiviação tradicionais e colunas afogadas.

No método de colunas de lixiviação tradicional foi inserido nas colunas 8,3 L durante todo o experimento, 830 mL por semana. Até a quarta semana do experimento, esse volume foi representativo para todas as colunas, a partir da semana 5, as colunas referentes ao carvão internacional começaram o processo de compactação do material, diminuindo o fluxo da lixiviação e consequentemente diminuindo o volume semanal de água recebido. Essa compactação, e eventual obstrução do fluxo, deve-se principalmente à granulometria do material, visto que o carvão internacional é composto de partículas mais finas em comparação aos demais.

Em contraponto o método de colunas afogadas teve como premissa o preenchimento completo da coluna com água, não sendo estipulado um valor exato de água a ser inserido no sistema. A Tabela 7 discrimina os valores inseridos nos sistemas de colunas afogadas 1 e 2 e de colunas de lixiviação tradicionais de carvão internacional 1 e 2. As demais colunas receberam o valor integral previamente estabelecido de 830 mL por semana e por esse motivo não constam na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Acompanhamento do volume de água inserido nas colunas de lixiviação afogadas contendo carvão blend (CAB1 e CAB2) e colunas de lixiviação tradicional contendo carvão internacional (CI1 e CI2).

Semana	CAB1	CAB2	CI1	C2
1	120 mL	120 mL	N.A	N.A
2	140 mL	110 mL	N.A	N.A
3	130 mL	120 mL	N.A	N.A
4	145 mL	140 mL	N.A	N.A
5	140 mL	150 mL	330 mL	480 mL
6	130 mL	120 mL	200 mL	240 mL
7	145 mL	145 mL	150 mL	210 mL
8	140 mL	145 mL	150 mL	280 mL
9	130 mL	125 mL	140 mL	145 mL
10	125 mL	135 mL	130 mL	140 mL

Onde N.A. é não aplicável.

6.4.2. Análises Químicas do Efluente

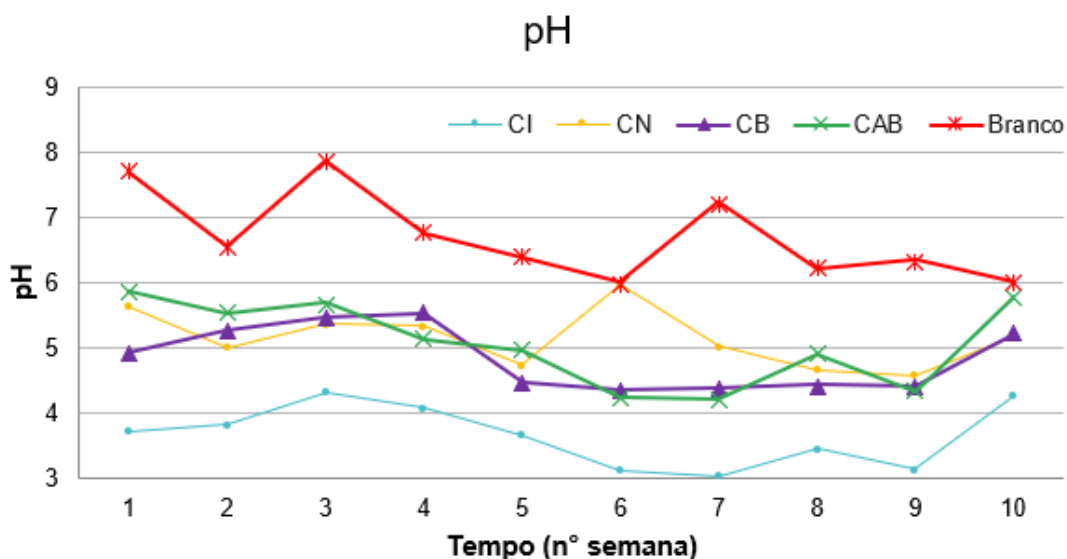
Durante as 10 semanas do experimento laboratorial, conforme item 5.5 Análises Físico-Químicas do Efluente, foram realizados ensaios de pH, condutividade e determinação de cátions e ânions em solução para avaliação do efluente. Além disso, os lixiviados das colunas foram armazenados em duas bombonas, uma contendo os efluentes da semana 1 à semana 6 e outra contendo os efluentes da semana 7 à semana 10, visando simular o efeito na acumulação deste efluente na bacia de acumulação de água. Esse conteúdo foi analisado ao final do experimento e será avaliado com os demais resultados, sendo denominado LB (lixiviado bombona). Nos itens a seguir são expostos

gráficamente os resultados obtidos, os dados estatísticos básicos poderão ser consultados no Anexo I.

6.4.2.1. Potencial Hidrogeniônico

Em relação ao pH, os resultados obtidos apresentam uma diminuição significativa nos valores para todos os lixiviados, apontando um aumento da acidez pela percolação da água através do carvão mineral. As colunas que apresentaram maior impacto no pH foram as que continham carvão internacional, apresentando uma redução importante no pH da água. As demais colunas também apresentaram aumento de acidez, com redução significativa no pH. A Figura 13 abaixo apresenta os dados médios semanais para cada tipo de coluna e a Tabela 8 compila os dados médios finais do experimento, bem como sua comparação percentual em relação ao seu afluente.

Figura 13 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro pH.



Para tentar se aproximar de um ambiente lântico, o lixiviado acumulado em bombona (LB) durante as 10 semanas também foi analisado para o parâmetro pH e apresentou valores médios de 4,84 (semanas 1-6) e 4,73 (semanas 7-10).

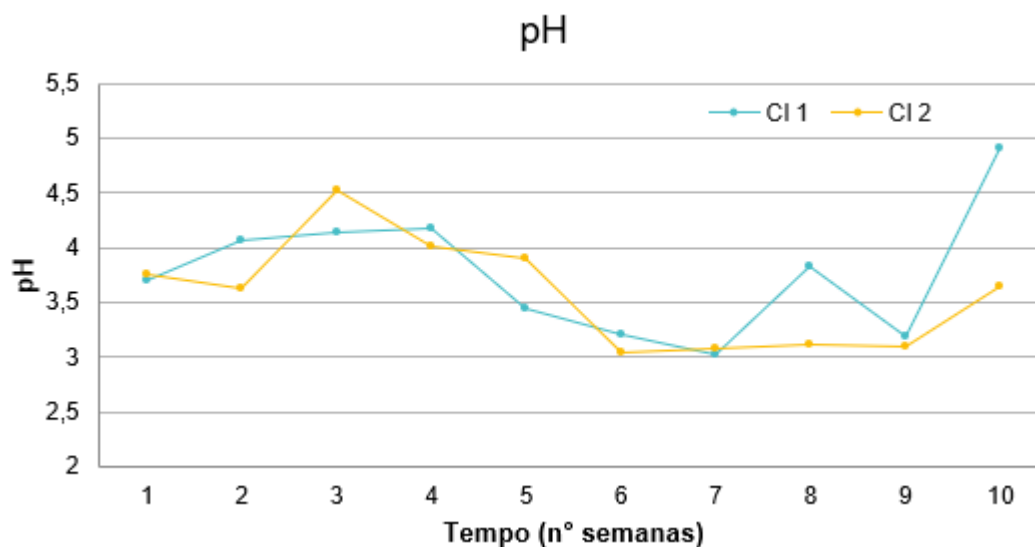
Tabela 8 - Valores de médias e mediana do pH monitorado ao longo dos ensaios.

Coluna	Média	Mediana
Branco	6,7	6,5
CI	3,7	3,7
CN	5,2	5,1
CB	4,9	4,7
CAB	5,1	5,1
LB	4,8	4,8

O carvão internacional mesmo possuindo uma qualidade superior aos demais tipos de carvão mineral, devido a sua granulometria com partículas menores, possui uma maior área superficial para contato. Com uma área superficial maior, as trocas de íons com a água são facilitadas, tornando a estocagem de carvão internacional a mais prejudicial em termos de pH.

Ainda referente aos dados de pH para o carvão internacional, tivemos um desempenho similar para as duas colunas testadas. O período mais crítico de diminuição do pH ocorreu entre a semana 6 e 7, chegando a valores próximos a 3 (3,2 e 3,04 para semana 6 e 3,03 e 3,07 para semana 7). A Figura 14 abaixo exhibe o comportamento do parâmetro.

Figura 14 - pH para as colunas CI1 e CI2.



O carvão nacional apresentou o menor impacto em relação ao parâmetro pH, seguido pelo carvão blend nas colunas afogadas, carvão blend convencional, e por fim, a mistura de todos os lixiviados na bombona.

6.4.2.2. Condutividade

A condutividade, assim como o pH, apresentou um impacto considerável, com todos os efluentes das colunas proporcionando aumentos no parâmetro. Os valores mais altos estão vinculados ao carvão internacional, com exceção das lixiviações das semanas 1 e 4, que apresentaram os efluentes das colunas CAB e CN com valores mais altos, sendo outlier do comportamento geral do experimento. Além do CI, tivemos o segundo maior impacto atrelados ao CAB, e posteriormente ao CB, LB e CN. A Figura 15 abaixo apresenta os dados médios semanais para o parâmetro e Tabela 9 exhibe os dados médios totais do experimento, bem como sua comparação percentual em relação ao seu afluente.

Figura 15 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro condutividade.

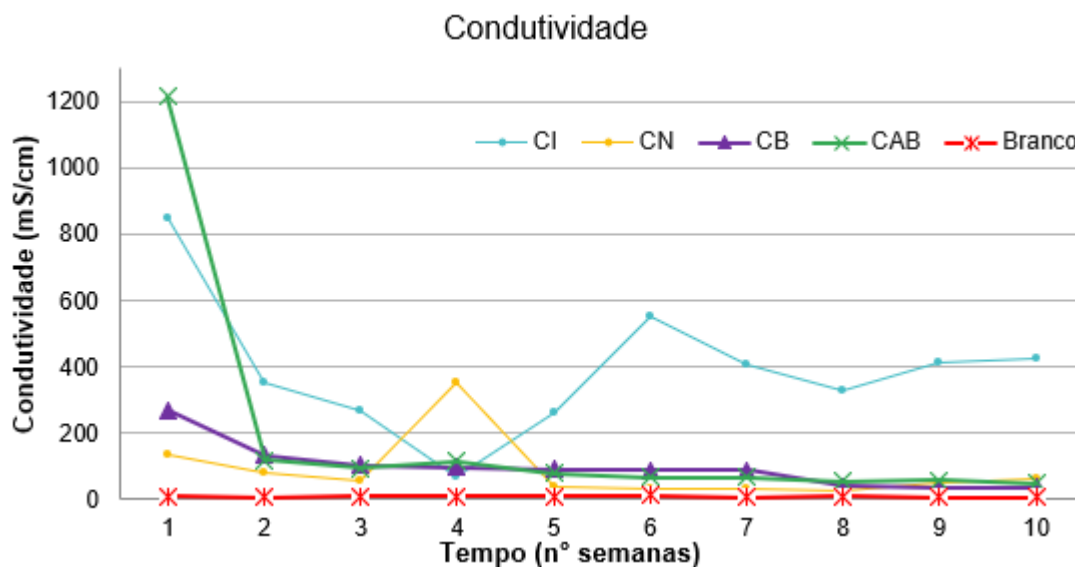


Tabela 9 - Resultados médios dos ensaios.

Coluna	Média	Mediana	%
Branco	8,6	8,3	-
CI	391,8	378,6	4466%
CN	86,8	98,2	911%
CB	97,7	89,7	1039%
CAB	191,7	73,1	2133%
LB	117,0	116,9	1263%

Os resultados obtidos para o parâmetro condutividade evidenciam a dissolução de íons no lixiviado, agregando diferentes cátions e ânions na solução e aumentando a sua capacidade de conduzir corrente elétrica. Para mapear os íons presentes no efluente, foi realizada a análise de ânions e cátions em solução.

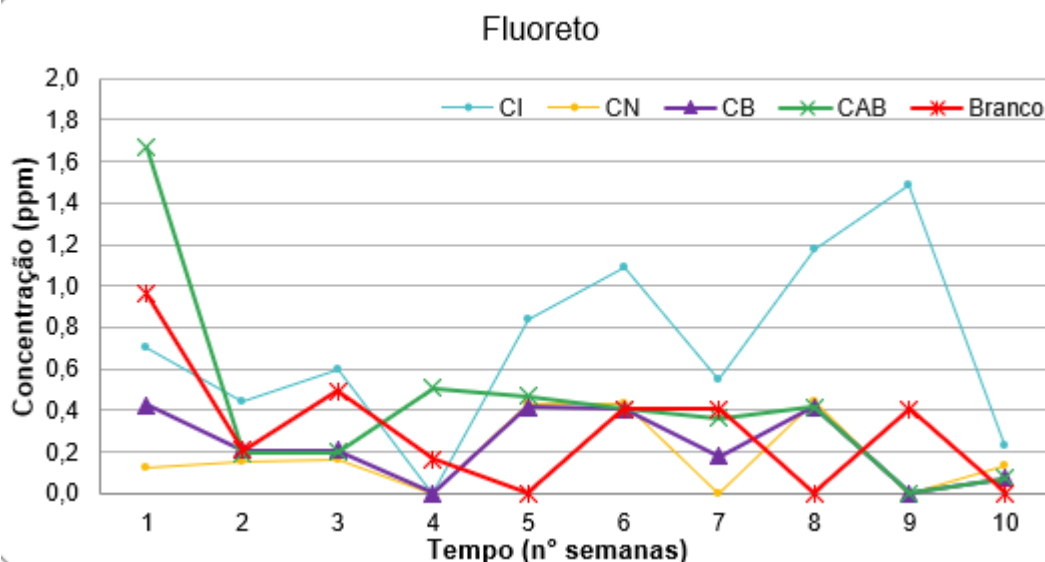
6.4.2.3. Ânions

Foram analisados, com o auxílio de cromatografia iônica, os ânions fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato e fosfato e sulfato. Os resultados obtidos, bem como suas análises, estão descritos nos itens que seguem.

6.4.2.3.1. Fluoreto

O fluoreto é a forma iônica do flúor, elemento este que pode ser encontrado nas rochas e no solo. O parâmetro fluoreto apresentou valores similares para as colunas CN, CB, CAB e para água deionizada, não apontando impactos significativos para essas colunas, com exceção da semana 1, em que a coluna afogada com carvão *blend* apresentou valores mais altos que as demais. Em relação ao Cl, a partir da quinta semana de experimento, ele manifestou valores superiores para o parâmetro, destacando-se frente às lixiviações. A Figura 16 apresenta os resultados obtidos nas 10 semanas de experimento.

Figura 16 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro fluoreto.



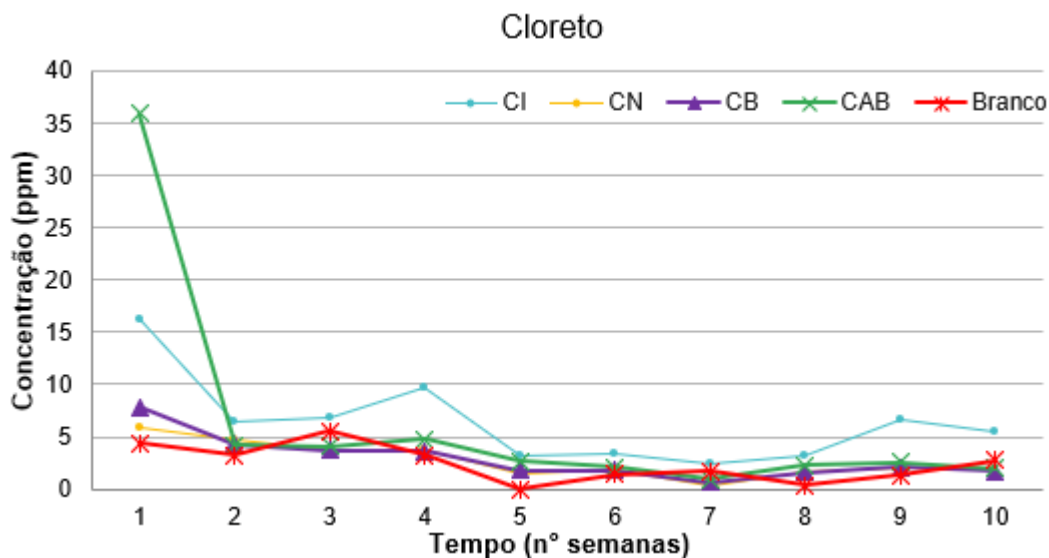
Os resultados obtidos para o lixiviado armazenado em bombona (LB) foram os de valores mais baixos, não configurando um impacto nessa modalidade, conforme Anexo I.

Os valores obtidos não apontam abundância do elemento no mineral submetido à lixiviação, entretanto, pode-se novamente inferir a granulometria do material como um dos agentes importantes no processo de dissolução desse ânion no efluente, sendo o Cl o mais afetado por essa sistemática.

6.4.2.3.2. Cloreto

O parâmetro cloreto mede a quantidade de ânions Cl^- presentes em solução. A primeira semana de experimento apontou valores altos para os lixiviados das colunas CAB e Cl, nesta ordem, porém ao longo do experimento este comportamento não foi observado, sendo este um *outlier*. A Figura 17 expõe os resultados semanalmente do experimento.

Figura 17 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro cloreto.

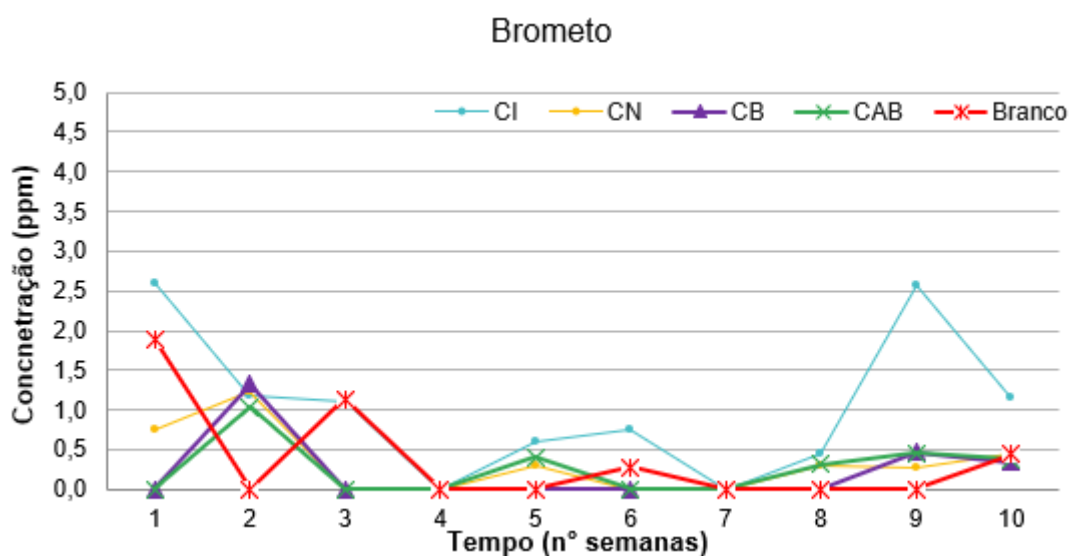


Referente ao lixiviado armazenado nas bombonas, conforme Anexo I, os resultados analíticos apresentaram dados semelhantes às colunas CN, CB e a própria água deionizada, não configurando um impacto significativo para o parâmetro. Os dados observados não apontam impacto para o parâmetro, sendo a primeira semana considerada um *outlier*.

6.4.2.3.3. Brometo

Os brometos são ânions nos quais o elemento bromo existe no estado de oxidação -1. Os valores medidos para todas as colunas e para água deionizada foram muito similares, não configurando o parâmetro brometo como um ponto de atenção e de potencial impacto no lixiviado. Para a coluna de carvão internacional as semanas 1 e 9 apresentaram dados superiores às demais colunas, atingindo uma média 177% maior que a da água deionizada. A Figura 18 apresenta os resultados semanais do experimento.

Figura 18 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro brometo.



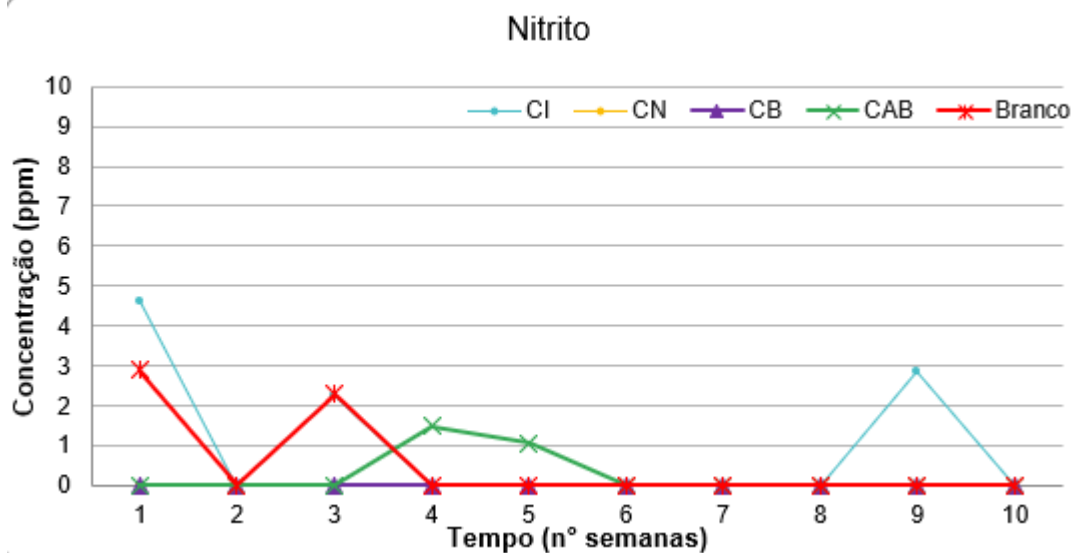
Os resultados para o efluente armazenado em bombonas foi em média o mesmo que para a água deionizada, não apontando concentração significativa, conforme Anexo I.

6.4.2.3.4. Nitrito

O ânion nitrito, assim como o brometo, não apresentou valores discrepantes em relação à água inserida na coluna, tornando o parâmetro não significativo aos impactos no lixiviado. Não foram identificadas concentrações do parâmetro para as colunas de CN, CB e para o lixiviado LB. Para a coluna de CI, as semanas 1 e 9 apresentaram dados superiores às demais, atingindo uma

média 87% maior que a da água deionizada. A Figura 19 apresenta os resultados semanais do experimento.

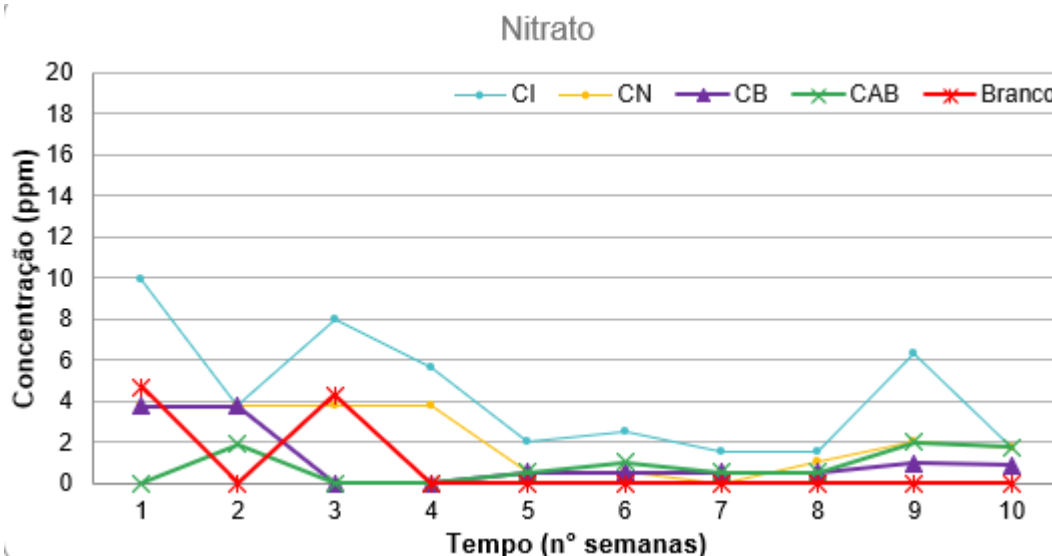
Figura 19 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro nitrito.



6.4.2.3.5. Nitrato

Os resultados analíticos para o parâmetro nitrato apontaram o lixiviado de carvão internacional como o de maiores concentrações, com destaque para as semanas 1, 3 e 9. Com exceção da coluna de CAB, todas as demais apresentaram aumentos significativos para o parâmetro. A Figura 20 apresenta os resultados do experimento.

Figura 20 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro nitrato.

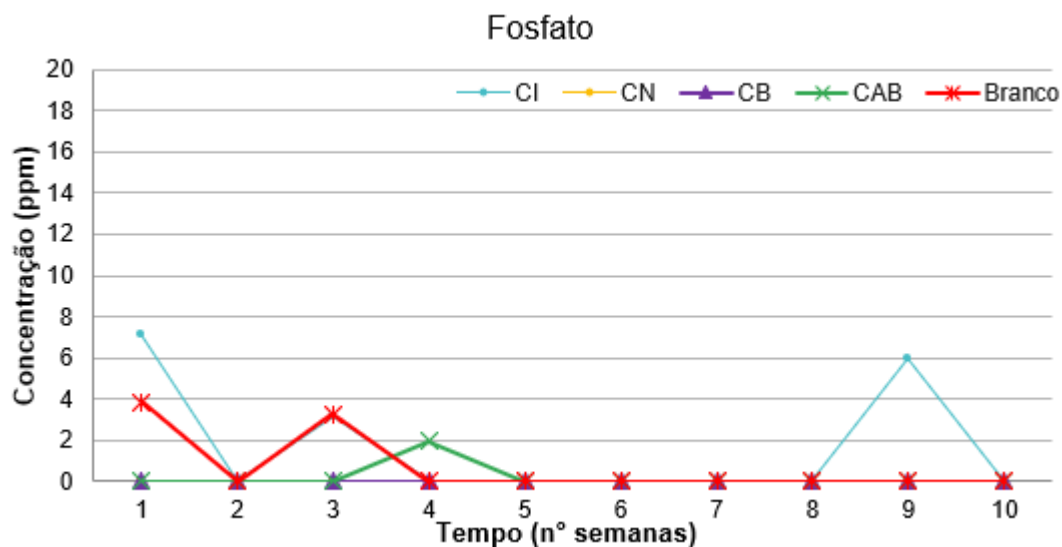


Referente ao lixiviado armazenado nas bombonas, os resultados obtidos foram em média 94% maiores, configurando um impacto significativo para o parâmetro.

6.4.2.3.6. Fosfato

O ânion fosfato, assim como o nitrito e brometo, apresentou valores similares aos da água inserida na coluna. Não foram identificadas concentrações do parâmetro para as colunas de CN, CB e LB, não havendo potencial impacto para o parâmetro. Para a coluna de CI, as semanas 1 e 9 apresentaram dados superiores às demais, atingindo uma média 129% maior que a da água deionizada. A Figura 21 apresenta os dados semanais.

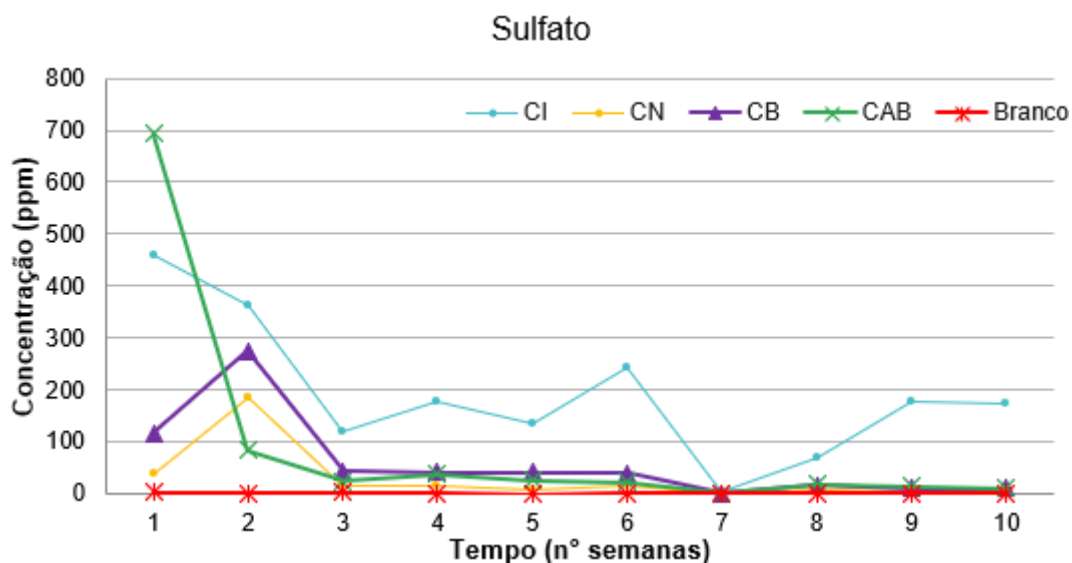
Figura 21 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro fosfato.



6.4.2.3.7. Sulfato

O principal íon de interesse é o ânion sulfato (SO_4^{2-}), devido a sua relação com a geração de H_2SO_4 , subproduto da oxidação do material. Os resultados obtidos apresentam um aumento para todos os lixiviados, indicando que o aumento da acidez está relacionado com a geração de H_2SO_4 na oxidação dos minerais sulfetados presentes no carvão. Com exceção da semana 1, no qual o CAB despontou como maior resultado, o CI apresentou os valores mais elevados para o parâmetro, mostrando-se novamente o mineral com maior potencial de impacto no ambiente. A Figura 22 exibe os resultados dos ensaios.

Figura 22 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro sulfato.

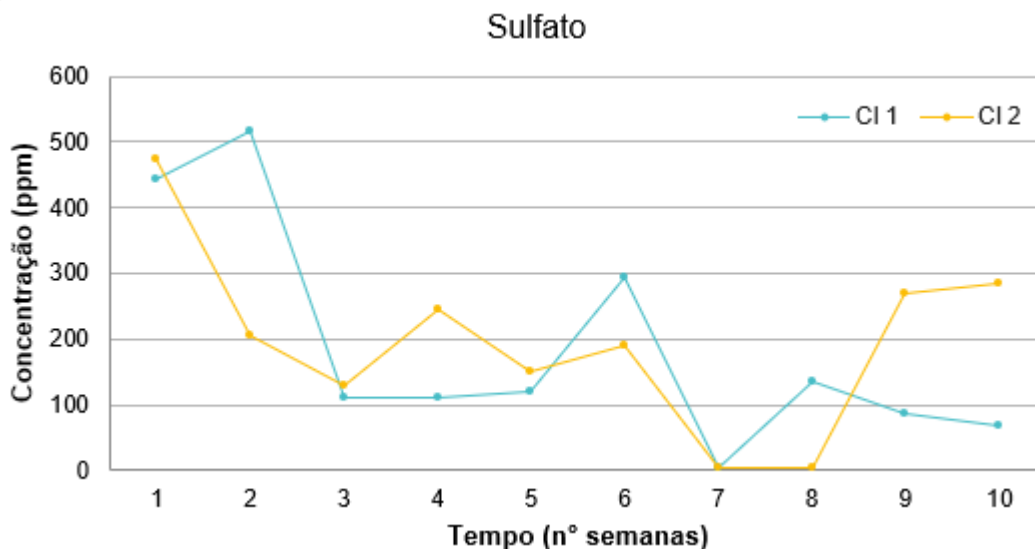


Um ponto a ser considerado foi a variabilidade de resultados atingidos para o parâmetro, principalmente para o CI. Os resultados obtidos oscilaram entre as semanas, alterando conforme a lixiviação. Com este cenário, tivemos semanas com altos valores e outras com resultados mais controlados, gerando dados com um alto grau de incerteza.

Conforme descrito em 5.3. Caracterização Básica do Carvão, entre todas as amostras de carvão, o CI se destaca pela menor taxa de enxofre em sua composição, dessa forma, o resultado para as análises de sulfatos deveria ser superior nos demais tipos do mineral. Entretanto, como explorado no item 6.4.2.1. Potencial Hidrognônico, a granulometria do CI conta com partículas menores e possui uma área superficial para contato maior, sendo essa a possível causa do cenário encontrado.

Aprofundando os dados do ânion sulfato para o carvão internacional, tivemos um comportamento semelhante para as duas colunas em algumas das semanas, e divergente em outras, devido a heterogeneidade da amostra de carvão. A primeira semana do experimento apresentou as concentrações mais altas para o parâmetro, apontando que o mineral continha em sua superfície altas concentrações de sulfatos, e que após a primeira lixiviação passou a ter menor concentração. O comportamento do lixiviado das colunas de carvão internacional podem ser apreciados na Figura 23.

Figura 23 - Sulfato para as colunas CI1 e CI2.



6.4.2.4. Cátions

Foram realizados, através de análises de cromatografia iônica, o mapeamento da concentração de cátions dissolvidos para os elementos lítio, sódio, amônio, potássio, magnésio e cálcio. Não foram detectadas concentrações do parâmetro lítio, para os demais, a análise crítica segue descrita a seguir.

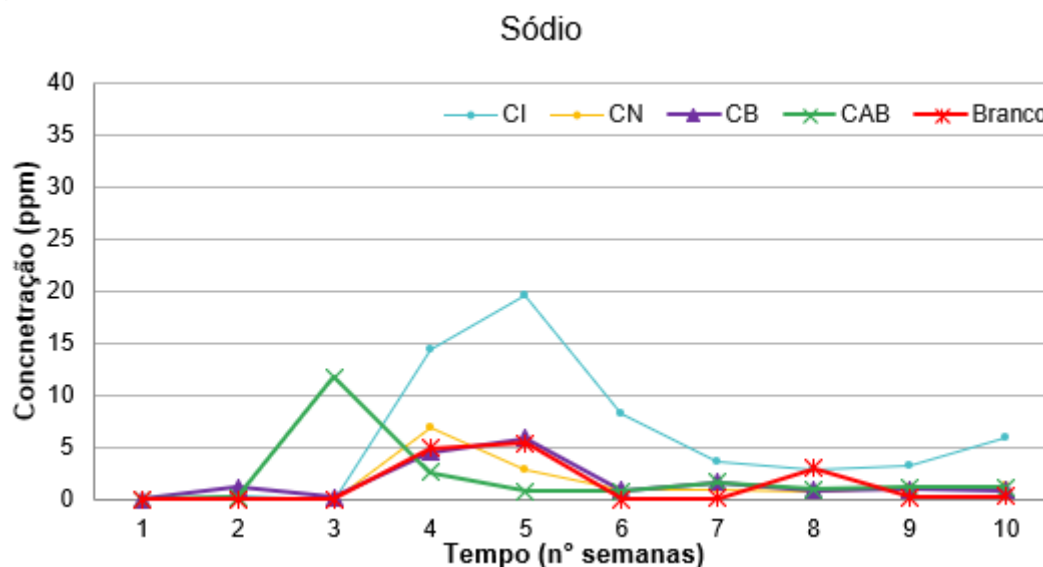
De maneira geral, o carvão internacional foi o mineral que obteve destaque pela presença de cátions em solução, com as maiores médias para a totalidade dos parâmetros. Entre os maiores impactos no lixiviado do CI, quando analisados os cátions, pode-se citar o magnésio, potássio e amônio. Os efluentes das demais colunas, CN, CB, CAB e LB, não demonstraram interferência significativa nos íons positivos avaliados, apenas em análises pontuais.

6.4.2.4.1. Sódio

O cátion sódio, para os efluentes de CN, CB e LB em relação ao afluente das colunas, não apresentou incrementos significativos. Os lixiviados das colunas CAB e CI apresentaram impacto na semana 3 e semanas 4, 5 e 6, respectivamente. Em média, todos os efluentes apresentaram concentração

mais elevada para o parâmetro, sendo o de carvão internacional o mais relevante, com acréscimo de 316%. A Figura 24 apresenta os resultados semanais para o parâmetro.

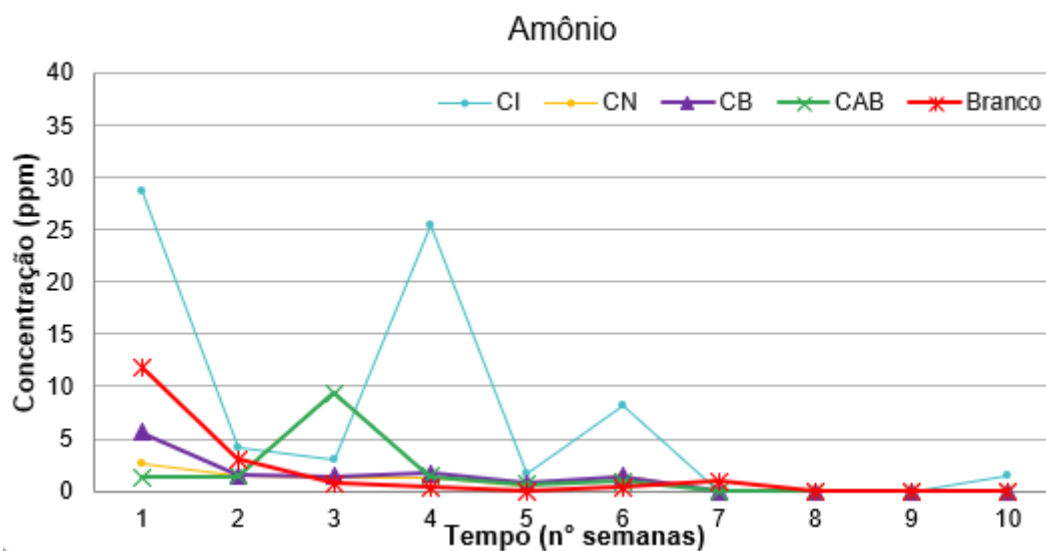
Figura 24 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro sódio.



6.4.2.4.2. Amônio

Para o cátion NH_4^+ apenas o lixiviado do carvão internacional mostrou impacto se comparado ao afluente da coluna. Obteve-se um acréscimo de 319% em média para o parâmetro. As semanas mais afetadas foram as semanas 1, 4 e 6. Os demais efluentes não apresentaram valores significativos para NH_4^+ , conforme aponta a Figura 25, que exhibe os dados semanais para os lixiviados.

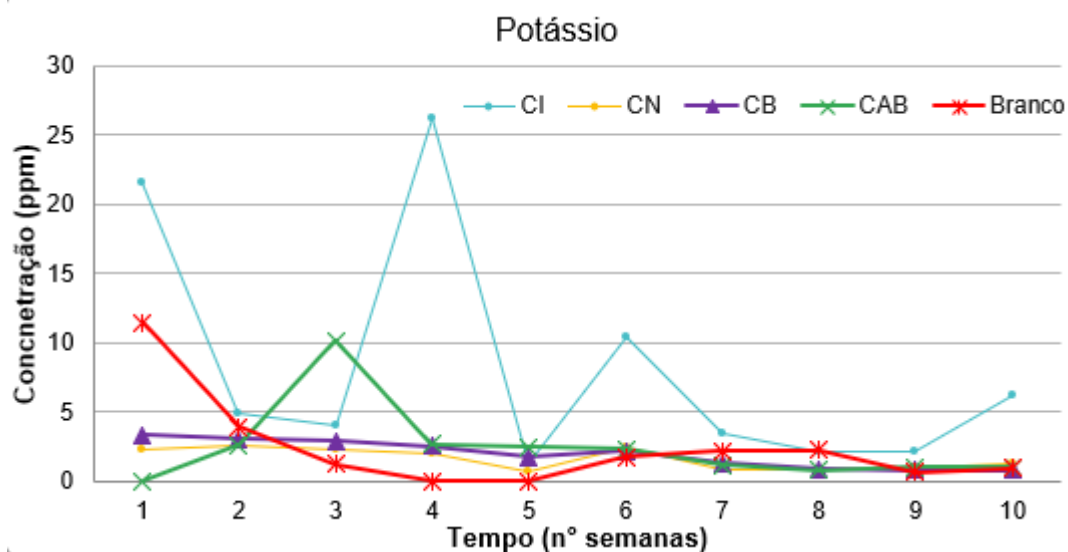
Figura 25 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro amônio.



6.4.2.4.3. Potássio

Assim como o parâmetro amônio, apenas o lixiviado do carvão internacional mostrou impacto se comparado ao afluente da coluna. Os demais efluentes apresentaram resultados médios com menos impacto para o parâmetro do que seu afluente. Para o CI foi registrado um acréscimo de 237% em média para o parâmetro, com as semanas mais afetadas as semanas 1, 4 e 6. A Figura 26 exibe os dados semanais para os lixiviados.

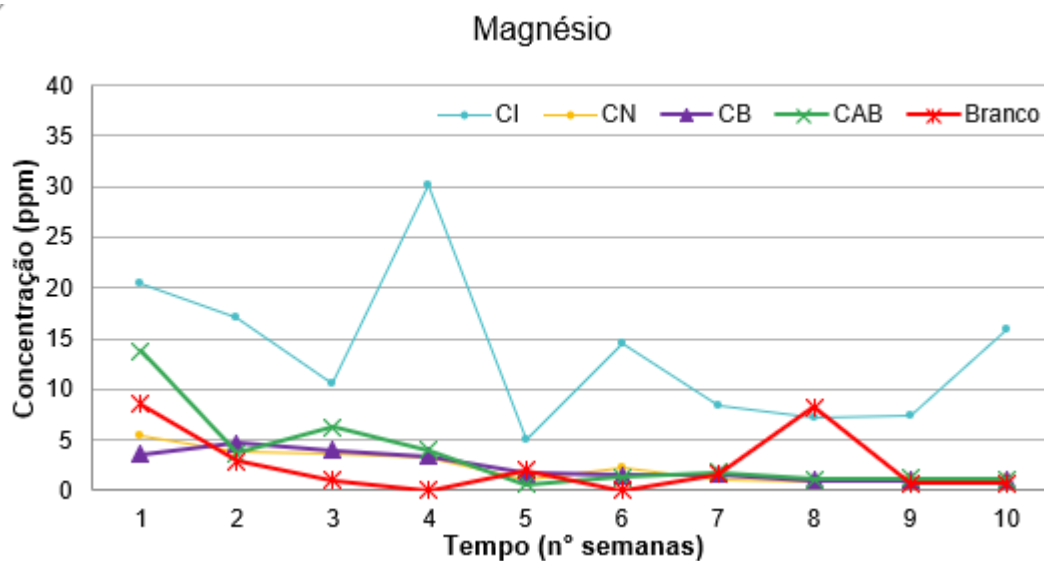
Figura 26 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro potássio.



6.4.2.4.4. Magnésio

Em relação ao cátion magnésio, os lixiviados das colunas CI e CAB apresentaram desvios em relação à água deionizada inserida na coluna. As demais apresentaram qualidade superior ao seu afluente, não caracterizando nenhum impacto. O CI contou com um acréscimo de 429% em média, com destaque para as semanas 1, 4, 6 e 10. A Figura 27 apresenta os resultados semanais.

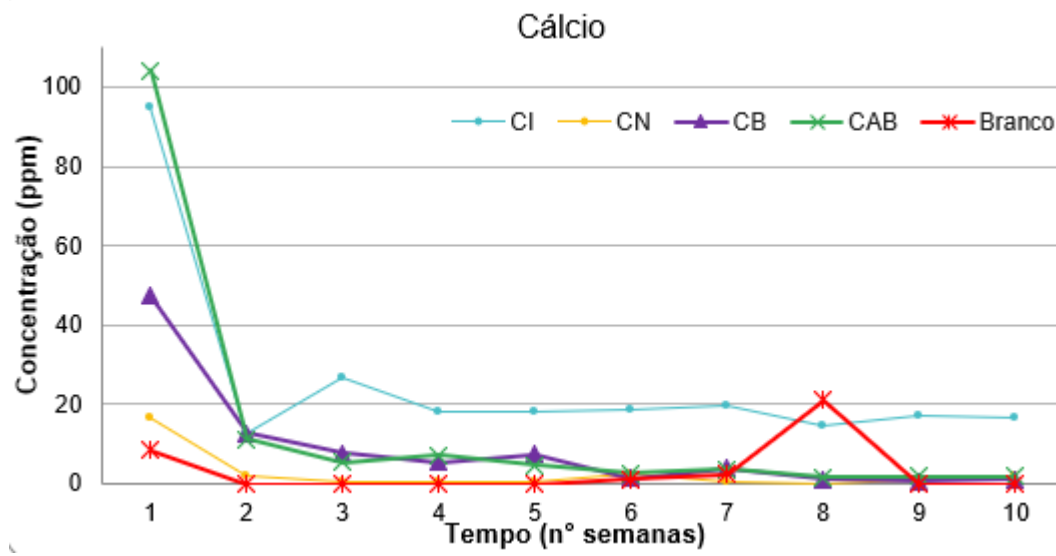
Figura 27 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro magnésio.



6.4.2.4.5. Cálcio

As análises para o parâmetro cálcio apresentaram grandes picos para a totalidade das colunas na primeira semana de experimento, com declínio nas demais semanas de experimento. Pode-se atribuir esse comportamento a uma concentração superficial do cátion no mineral e que, posteriormente à primeira lixiviação, passou a ter menor concentração, impactando com mais relevância apenas uma vez. Novamente o CI destacou-se pelo maior acréscimo de concentração no lixiviado, seguido pelo CAB, CB e LB. Em média o CN não contribuiu com nenhum impacto para cálcio. A Figura 28 apresenta os dados experimentais.

Figura 28 - Resultados semanais dos ensaios para o parâmetro cálcio.



7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE MELHORIA

Os objetivos específicos do trabalho foram atingidos de maneira integral. Foi desenvolvida e aplicada metodologia adaptada de ensaio preditivo cinético com colunas de lixiviação, sendo as colunas montadas e operadas semanalmente por 10 semanas consecutivas e obtendo-se resultados coerentes.

Foram relacionados os dados secundários de precipitação, caracterização do carvão, monitoramento da bacia de acumulação de água pluvial com os resultados analíticos de lixiviação, apontando que os impactos observados na bacia de acumulação de água são advindos da drenagem pluvial da área de manejo. E, por fim, foram comparados os resultados obtidos nos ensaios para os diferentes tipos de carvão mineral em todas as variações propostas, coluna tradicional, coluna afogada e lixiviado armazenado na bombona, indicando que o carvão internacional é o com maior potencial poluidor entre os demais, devido a granulometria em que é armazenado, sendo mais propenso à lixiviação.

A partir do diagnóstico do problema, sugerem-se, de forma geral, estratégias e melhorias com potencial de otimizar e implementar uma gestão focada na qualidade ambiental na área de manejo do carvão. As estratégias e melhorias encontram-se elencadas na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 - Sugestão de melhorias para área de manejo.

Tipo	Melhoria	Ação
Logística	Utilização da área coberta para o manejo do carvão internacional, evitando sua lixiviação pela ação da chuva, devido ao seu maior impacto no ambiente.	Preventiva
Material	Viabilização com fornecedor de envio do mineral com granulometria mais robusta para diminuir o impacto da lixiviação.	Preventiva
Estrutural	Ampliação da área coberta do empreendimento para dificultar a lixiviação pela ação da chuva.	Preventiva
Estrutural	Implementação de tratamento prévio com agentes neutralizantes para drenagem pluvial e posterior envio à bacia de acumulação.	Corretiva
Manutenção	Realizar manutenção em todo o sistema de drenagem, a fim de garantir sua eficácia.	Preventiva

Fonte: O autor.

8. CONCLUSÕES

O carvão mineral armazenado em áreas de manejo de carvão, quando vulnerável à ação das intempéries, pode gerar uma drenagem ácida similar a drenagem ácida de minas, com baixo pH e altos teores de sulfatos. Em relação à área de manuseio de carvão em questão, pode-se inferir que sua drenagem pluvial tem influência na bacia de acumulação de água, visto que os parâmetros destacados no item 6.2. Análise da Bacia de Acumulação de Água Pluvial, pH e condutividade, são similares aos resultados encontrados desvios no efluente das colunas de lixiviação.

Muitos são os fatores que influenciam no processo de lixiviação em área de manuseio, entre eles a qualidade do mineral a ser lixiviado, o volume de água pluvial que percola nas pilhas de armazenamento, o tipo de solo em contato com o mineral, o sistema de drenagem pluvial do local e a granulometria do material.

No caso deste estudo, o carvão internacional, mineral com caracterização de melhor qualidade em parâmetros operacionais, com maior eficiência energética e menor concentração de sulfatos, foi o que apontou mais impactos nos parâmetros analisados para o lixiviado. O CI apresentou desvios de qualidade em relação ao afluente para os parâmetros pH, condutividade, fluoreto, nitrato, sulfato, magnésio, potássio e amônio. Estes resultados podem ser relacionados à granulometria do carvão. O CI é composto por partículas finas em comparação aos demais tipos de carvão, compostos de sólidos grosseiros, possuindo uma maior área superficial para contato. Com essa maior área superficial, a influência da água na lixiviação se torna mais efetiva, facilitando a troca iônica e a oxidação do mineral sulfetado, tornando a estocagem de carvão internacional a mais prejudicial em termos ambientais, neste caso.

Os demais tipos de carvão mineral, nacional e *blend*, também apresentaram desvios nos parâmetros analíticos avaliados, se comparados com os valores iniciais da água inserida nas colunas. No caso do carvão *blend*, os resultados demonstraram impacto referente ao lixiviado tanto das colunas tradicionais, como das colunas afogadas. Os elementos cujo impacto foi relevante para a deterioração da qualidade do efluente foram pH, condutividade, sulfatos.

Por fim, as bombonas contendo todo o efluente gerado nas colunas, durante o período de 10 semanas, também apresentaram desvios importantes de qualidade, se relacionadas ao afluente das colunas. Essa avaliação final de todo efluente gerado teve por objetivo reproduzir o comportamento da drenagem na bacia de acumulação de água, simulando as alterações observadas na área de estudo.

9. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a realização do ensaio com a utilização de outros métodos de lixiviação, como o ensaio de células úmidas, regulamentado pela ASTM D5744, para comparação dos resultados obtidos. Outra possibilidade a ser explorada é a análise granulométrica do carvão e como isso impacta na geração de drenagem ácida, correlacionando as variáveis.

Em relação às análises de caracterização de efluente, sugere-se a realização de análises de metais, visto que o aumento da acidez e consequente redução do pH deve-se a geração de ácido sulfúrico (H_2SO_4) no processo de oxidação, o que pode produzir a solubilização de metais. Essa avaliação poderia robustecer a análise dos impactos ao meio ambiente.

Além disso, sugere-se como trabalho futuro uma avaliação da qualidade ambiental da área, com análise da bacia de acumulação de água e simulação de seu impacto no corpo hídrico receptor, bem como avaliação da água subterrânea no local. Por fim, ainda com intuito de otimizar as práticas já executadas na área de manejo de carvão, sugere estudo para viabilidade de projetos de melhoria na drenagem pluvial e logística da área para evitar a geração de drenagens com características ácidas e formação de bacias adjacentes.

ANEXO 1 - DADOS ESTATÍSTICOS

Tabela 1 – Média, mediana para o pH.

Coluna	Média	Mediana
Branco	6,7	6,5
CI	3,7	3,7
CN	5,2	5,1
CB	4,9	4,7
CAB	5,1	5,1
AB	4,8	4,8

Tabela 2 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para condutividade.

Condutividade			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	8,6	8,3	-
CI	391,8	378,6	4466%
CN	86,8	98,2	911%
CB	97,7	89,7	1039%
CAB	191,7	73,1	2133%
AB	117,0	116,9	1263%

Tabela 3 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Sulfato.

Sulfato			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	1,1	0,8	-
CI	192,2	176,1	17142%
CN	30,4	12,5	2628%
CB	59,5	40,1	5240%
CAB	93,1	23,2	8251%
AB	44,8	44,8	3922%

Tabela 4 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Fluoreto.

Fluoreto			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	0,3	0,3	-
CI	0,7	0,6	133%
CN	0,2	0,1	-73%
CB	0,2	0,2	23%
CAB	0,4	0,4	84%
AB	0,1	0,1	-82%

Tabela 5 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Cloreto.

Cloreto			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	2,4	2,2	-
CI	6,3	5,9	164%
CN	2,7	2,0	13%
CB	2,9	2,0	21%
CAB	6,2	2,6	156%
AB	2,1	2,1	-14%

Tabela 6 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Brometo.

Brometo			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	0,4	0,0	-
CI	1,0	0,9	177%
CN	0,3	0,3	-11%
CB	0,2	0,0	-43%
CAB	0,3	0,2	-31%
AB	0,4	0,4	-2%

Tabela 7 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Nitrito.

Nitrito			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	0,5	0,0	-
CI	1,0	0,0	87%
CN	0,0	0,0	-100%
CB	0,0	0,0	-100%
CAB	0,3	0,0	-51%
AB	0,0	0,0	-100%

Tabela 8 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Nitrato.

Nitrato			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	0,9	0,0	-
CI	4,3	3,1	380%
CN	2,1	1,8	133%
CB	1,1	0,5	27%
CAB	0,8	0,5	-9%
AB	1,74	1,74	94%

Tabela 9 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Fosfato.

Fosfato			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	0,7	0,0	-
CI	1,6	0,0	129%
CN	0,0	0,0	-100%
CB	0,0	0,0	-100%
CAB	0,2	0,0	-73%
AB	0,0	0,0	-100%

Tabela 10 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Sódio.

Sódio			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	1,4	0,2	-
CI	5,8	3,5	316%
CN	1,5	0,9	6%
CB	1,7	1,0	23%
CAB	2,1	1,1	52%
AB	1,6	1,6	14%

Tabela 11 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Amônio.

Amônio			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	1,7	0,3	-
CI	7,2	2,3	319%
CN	0,9	0,9	-50%
CB	1,3	1,1	-28%
CAB	1,5	0,8	-12%
AB	0,0	0,0	-100%

Tabela 12 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Potássio.

Potássio			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	2,4	1,5	-
CI	8,2	4,5	237%
CN	1,6	1,6	-33%
CB	2,0	2,0	-19%
CAB	2,4	1,7	0%
AB	1,3	1,2	-48%

Tabela 13 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Magnésio.

Magnésio			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	2,6	1,3	-
CI	13,7	12,5	429%
CN	2,4	1,8	-7%
CB	2,4	1,7	-8%
CAB	3,5	1,6	36%
AB	2,4	2,3	-6%

Tabela 14 – Média, mediana e porcentagem entre o afluente e o lixiviado para Cálcio.

Cálcio			
Coluna	Média	Mediana	%
Branco	3,3	0,0	-
CI	25,8	18,3	679%
CN	2,6	0,9	-21%
CB	8,9	4,7	169%
CAB	14,5	4,3	337%
AB	5,5	5,4	66%

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. T. **Ensaio Cinéticos para Previsão e Prevenção de Drenagem Ácida: Estudo de Caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Caldas, MG.** 2012. Tese (Doutorado em Ciência Naturais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, [S. l.], 2012.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 2016. Disponível em:

http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf. Acesso em: 10/06/2022.

Australian Government. **Preventing Acid and Metalliferous Drainage.** Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry. 2016.

BORBA, R. F. **Carvão Mineral. Balanço Mineral Brasileiro, 2001.** Disponível em:

<http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/BalancoMineral2001/carvao.pdf> . Acesso em 10/06/2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n° 357 de 17 de março de 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n° 430 de 13 de maio de 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n° 436 de 22 de dezembro de 2011.

- CAMPOS, M. L. *et al.* **Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral.** Revista de Ciências Agroveterinárias, [s. l.], 2010.
- CARNIATO, A. **Planejamento da Produção e Mistura de Carvão Mineral: Programação Matemática e Estudo de Caso.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2005.
- COSMO, B. M. N. *et al.* **Carvão Mineral.** Revista Agronomia Brasileira, São Paulo, 2020.
- DAYUBE, P. R.C., TRINDADE, R. de B. E., **Remoção de metais presentes em baixa concentração em drenagem ácida de minas.** 2000.
- ENVIRONMENT AUSTRALIA, **Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage, One Booklet in a Series on, Best Practice Environmental Management in Mining,** Australia, May 1997.
- Farfán J.R.J.Z, O. Barbosa Filho; V.P. de Souza. 2004. **Avaliação do Potencial de Drenagem Ácida de rejeitos da indústria mineral.** CETEM/MCT (Centro de Tecnologia Mineral) Série Tecnologia Mineral n° 29.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.** 5a ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- GUEVARA, L. R. Z. **Predição do Potencial de Drenagem Ácida de Minas Utilizando o Método Cinético da Coluna de Lixiviação.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.
- JÚNIOR, O.M.M., JÚNIOR, L.U.B., DUARTE, M.H.R., MEIER, S.F.A. (2019). **Predição da Drenagem Ácida de Minas por Ensaios Estáticos e Cinéticos.**

XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa.
Belo Horizonte - MG.

LEITE, J. S. M. **Previsão de Drenagem Ácida por Meio de Testes Estáticos do Material do Bota Fora 4 da Mina Osamu Ustumi – Caldas/MG. 2010.** Dissertação (Mestrado em Ciência Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2010.

LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., MONTE, M.B.M., ALMEIDA, S.L.M. (2002). **Tratamento de Minérios. 3ed**, CETEM/ mct, 850p, Rio de Janeiro, RJ.

MACHADO, L. A., SCHNEIDER, I. H. **Ensaio estáticos e cinéticos para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas da mineração de carvão com escória de aciaria.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2008.

MACHADO, L. A. **Ensaio Estáticos e Cinéticos para a Prevenção da Geração de Drenagem Ácida de Minas na Mineração de Carvão com Cinzas de Termoelétrica e Escória de Aciaria.** 2007. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2007.

MURTA, F. C. **Ensaio de Colunas para a Avaliação de Remediação Passiva de Drenagem Ácida da Mina Osamu Utsumi (INB), Caldas/MG.** 2006. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2006.

Pastore, E.L., Mioto, J.A. **Impactos Ambientais em Mineração com Ênfase à Drenagem Ácida e Transporte de Contaminantes**”, in: Solos e Rochas, v.23, no1, pp. 33-53, 2000.

Pérez-López, R.; Nieto, J.M. & Almodóvar, G.R. **Utilization of fly ash to improve the quality of the acid mine drainage generated by oxidation of a sulphide-rich mining waste: Column experiments.** Chemosphere, 67:1637-1646, 2007.

PIMENTEL, D. A.; LUZ, J. A. M. **Pluvial percolation in pyrite-bearing coal stockpiles.** Revista Escola de Minas, [s. l.], 2009.

PIMENTEL, D. A. **Tratamento de Efluente de Percolação Pluvial em Pilhas de Carvão Mineral.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2007.

Portaria MME nº 540/2021. Ministério de Minas e Energia. **Detalhamento do Programa para Uso Sustentável do Carvão Mineral Nacional.** 2021.

SARIA, L.; SHIMAOKA, T.; MIYAWAKI, K. **Leaching of heavy metals in acid mine drainage.** Waste Management & Research, [s. l.], 2006.

SILVA, A. B. *et al.* **Pesquisa Comparativa entre PHmetro Alternativo e PHmetro de Bancada Convencional para Análises Laboratoriais Envolvendo Água para Consumo Humano.** XIV SIBESA, [s. l.], 2018.

SILVEIRA, A.N.; SILVA, R.D.R.; RUBIO, J. **Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil. Comparative active processes and water reuse.** International Journal of Mineral Processing, v.93, n.2, p.103-109, 2009.

SOUZA, V. P. **Drenagem ácida, aspectos ambientais: uma revisão.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015. 48p.

Spice, A.; McCarty, L.S. and Rand, G. M. **Bioaccumulation and bioavailability in multiphase system.** In: M. Rand Gary (ed.). Fundamentals of Aquatic Toxicology - Effects, Environmental Fate and Risk Assessment. Taylor and Francis, Philadelphia, PA. 1083p.

TORREZANI, N. C.; OLIVEIRA, E. F. **Problemas Ambientais Decorrentes da Exploração do Carvão Mineral e a Aplicação da Ecotoxicologia Aquática**

como Ferramenta de Biomonitoramento. Oecologia Australis, Londrina - PR, 2013.

UBALDO, M. de O. BORMA, L. de S. BARBOSA, M. C. **Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas.** Série Gestão e Planejamento Ambiental, v 4. Rio de Janeiro. CETEM/MCT. 2006.

UPME. 2012. **Cadena Del Carbón.** Imprenta N. edited by Juan José Manrique Galvis. Bogota, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.

U.S. EPA. 1994. Environmental Protection Agency U. S. **Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction,** EPA 530-R-94-036.