



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Curso de Licenciatura em Engenharia do Ambiente

Previsão de Drenagem Ácida em Minas de Carvão em Moatize, Tete

Autor:

Álvaro Rodrigues Marcos Manhenje Júnior

Supervisor:

Prof. Doutor Eng^o Estêvão Pondja

Co-supervisor:

Prof. Doutor Eng^o Clemêncio Nhantumbo

Maputo, 2024

Universidade Eduardo Mondlane
Faculdade de Engenharias
Departamento de Engenharia Química
Curso de Licenciatura em Engenharia do Ambiente
Trabalho de Licenciatura
Relatório Final

Previsão de drenagem ácida em Minas de Carvão em Moatize, Tete

Trabalho de conclusão de curso de licenciatura em Engenharia do Ambiente apresentado à Faculdade de Engenharias da Universidade Eduardo Mondlane, como requisito de obtenção do título de licenciado na área de Engenharia do Ambiente.

Maputo

2024

Álvaro Rodrigues Marcos Manhenje Júnior

Previsão de drenagem ácida em Minas de Carvão em Moatize, Tete

Supervisor:

(Prof. Dr. Eng°. Estêvão Alberto Pondja)

Co-supervisor:

(Prof. Dr. Eng°. Clemêncio Nhantumbo)

Maputo

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Luísa Domingos Fuel Manhenje e Álvaro Rodrigues Marcos Manhenje, e, aos meus irmãos Gustavo da Graça Paixão Álvaro Manhenje, Diego da Graça Paixão Álvaro Manhenje e Verônica da Graça Álvaro Manhenje, que sempre olharam por mim e apoiaram-me em todos momentos da minha vida.

“A caminhada das 1000 milhas começa com o primeiro passo.”

- Lao Tsu

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida e por sempre iluminar a minha caminhada, aos meus pais Luísa Domingos Fuel Manhenje e Álvaro Rodrigues Marcos Manhenje, e, aos meus irmãos Gustavo da Graça Paixão Álvaro Manhenje, Diego da Graça Paixão Álvaro Manhenje e Verônica da Graça Álvaro Manhenje, que sempre me apoiaram em todos os momentos, em especial durante na minha formação académica.

Quero agradecer a todos os meus docentes na Faculdade de Engenharia, que contribuíram de forma incontornável na transmissão de conhecimento e das ferramentas necessárias para que possa ter êxito na minha carreira profissional. Em especial, aos meus supervisores, o Prof. Doutor Eng.º Estêvão Alberto Pondja e o Prof. Doutor Eng.º Clemêncio Nhantumbo, pelo voto de confiança e pela instrução fornecida para que pudesse realizar este trabalho.

Também agradecer a todos funcionários da ARA-Centro, em especial à Dr.^a Sheila Mandlate, a Dr.^a Noémia Godinho, ao Dr. Elijah e ao Técnico Lúcio Cumbe, que prestaram auxílio no uso dos equipamentos e técnicas de medição, e aos motoristas Daniel Mário e Ilídio Martinho nos acompanharam às visitas de campo. Ao Departamento de Química da Faculdade de Ciências e aos Laboratórios de Engenharia de Moçambique que prontamente colaboraram para a análise das amostras, e aos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia, que prestaram auxílio na construção da bancada de lixiviação.

E por último, mas não menos importante, aos meus colegas com quem partilhei diversas memórias ao longo destes 6 anos. Em particular, agradeço ao Érico Langa, com o qual realizei o presente trabalho, e, à Mary Shirima, à Kelly Carimo, à Kotilde Aissa, com quem realizei diversos trabalhos ao longo dos níveis que concluímos.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Álvaro Rodrigues Marcos Manhenje Júnior, declaro por minha honra que o presente trabalho de conclusão foi por mim elaborado. Não se recorreu em quaisquer outras fontes para além das indicadas na referência bibliográfica, e todas as formulações e conceitos utilizados quer adotados literalmente ou a partir das suas ocorrências originais (em fontes impressas, não impressas ou da internet), encontram-se devidamente citados e identificados. Também declaro que este trabalho não foi apresentado para efeito de avaliação para nenhuma outra entidade ou instituição para além das diretamente envolvidas na sua elaboração, e que os conteúdos das versões impressas ou eletrónicas são inteiramente coincidência.

(Álvaro Rodrigues Marcos Manhenje Júnior)

RESUMO

A mineração é uma atividade económica que nos últimos 25 anos tem crescido exponencialmente nas regiões centro e norte de Moçambique. Ela tem sido usada como fonte de renda para as famílias locais para própria subsistência, e pelas grandes companhias que usam os produtos desta atividade para comércio no mercado internacional. Exemplos de explorações mineiras são encontrados nas províncias de Manica, onde extrai-se o ouro, província de Nampula, onde se exploram as areias pesadas, e na província de Tete, onde se explora o carvão mineral.

Este estudo tem como objetivo avaliar a possibilidade de geração de drenagem ácida de minas (DAM) em minas de carvão mineral no distrito de Moatize, província de Tete, propondo para tal a realização de ensaios de lixiviação do material estéril localizados nas pilhas e barragens de rejeitos.

Foram analisados os lixiviados produzidos durante estes ensaios, onde obtiveram-se valores do potencial hidrogeniónico (pH) entre 6.990 e 8.420, valores de condutividade elétrica (CE) entre 77.1 e 3720 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores de sulfatos (SO_4^{2-}) entre 8.196 e 3008.190 mg/l, o Cálcio (Ca) entre 0.421 e 78.877 mg/l, o Ferro (Fe) entre 0.012 e 0.060 mg/l, o Zinco (Zn) entre 0.119 e 2.764 mg/l, o Manganês (Mn) entre 0.001 e 1.849 mg/l e o Alumínio (Al) entre 0.024 e 7.733 mg/l. Os valores obtidos foram comparados à padrões legais como o Decreto nº 18/2004 de 2 de Junho (revisto e atualizado pelo Decreto nº 67/2010 de 31 de Dezembro) que apresenta os padrões de qualidade ambiental, da EPA e OMS para água de consumo humano, e verificaram-se valores fora destes limites estabelecidos nas semanas iniciais aos ensaios de lixiviação, mas no final estes resultados estiveram dentro dos mesmos limites.

Pode se concluir que é improvável a ocorrência de drenagem ácida nestas minas de carvão, devido a constante dissolução de minerais que neutralizam este processo, que se manifesta pela tendência crescente do pH nestas amostras de estéril analisadas.

Palavras-chave: Drenagem ácida de Minas, Mineração, Moatize, Estéril.

ABSTRACT

Mining is an economic activity that has grown in the last 25 years exponentially in the central and northern regions of Mozambique. It has been used as a source of income for local families for their own subsistence, and by large companies that use the products from this activity to trade on the international market. Examples of mining explorations are found in the provinces of Manica, where gold is extracted, Nampula province, where heavy sands are explored, and in the province of Tete, where mineral coal is explored.

This study aims to evaluate the possibility of generating acid mine drainage (AMD) in mineral coal mines in the district of Moatize, Tete province, proposing to carry out leaching tests of the waste material located in the piles and dams of rejects.

The leachates produced during these tests were analyzed, where hydrogen potential (pH) values were obtained between 6,990 and 8,420, electrical conductivity (EC) values between 77.1 and 3720 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sulfate (SO_4^{2-}) values between 8,196 and 3008.190 mg/l, Calcium (Ca) between 0.421 and 78.877 mg/l, Iron (Fe) between 0.012 and 0.060 mg/l, Zinc (Zn) between 0.119 and 2.764 mg/l, Manganese (Mn) between 0.001 and 1.849 mg/l and Aluminum (Al) between 0.024 and 7.733 mg/l. The values obtained were compared to legal standards such as Decree n° 18/2004 of June 2nd (revised and updated by Decree n° 67/2010 of December 31st) which presents the environmental quality standards of the EPA and WHO for drinking water. human consumption, and there were values outside these limits established in the initial weeks of the leaching tests, but in the end these results were within the same limits.

It can be concluded that the occurrence of acid drainage in these coal mines is unlikely, due to the constant dissolution of minerals that neutralize this process, which is manifested by the increasing trend in pH in these waste samples analyzed.

Keywords: Acid mine drainage, Mining, Moatize, Waste.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	iii
RESUMO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	x
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Metodologia	4
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1. Drenagem Ácida de Minas (DAM)	5
2.2. Minerais geradores de DAM	6
2.2.1. Pirite	6
2.2.2. Pirrotite.....	7
2.2.3. Arsenopirite.....	8
2.2.4. Calcopirite.....	9
2.2.5. Galena	9
2.2.6. Esfalerite.....	10
2.2.7. Fatores que influenciam a dissolução dos minerais geradores de DAM	10
2.3. Minerais neutralizadores de DAM	11
2.3.1. Minerais carbonatados	11
2.3.2. Minerais silicatados.....	12
2.3.3. Catiões permutáveis	12
2.3.4. Minerais de hidróxidos	13
2.3.5. Fatores que influenciam a dissolução dos minerais neutralizadores de DAM	13
3. Área de estudo	14
4. Materiais e métodos.....	16
4.1. Escolha dos pontos de amostragem	16
4.2. Coleta e armazenamento de amostras	16

4.3.	Ensaio de Lixiviação.....	16
5.	Resultados e discussão	19
5.1.	Análise elementar do material estéril.....	19
5.2.	Resultados dos ensaios de lixiviação do material estéril	20
5.3.	Análise comparativa dos resultados de lixiviação	24
5.4.	Comparação com a legislação nacional e internacional	31
5.5.	Determinação das quantidades anuais de lixiviação dos parâmetros estudados	38
6.	Conclusões e recomendações.....	40
6.1.	Conclusões	40
6.2.	Recomendações	41
7.	Bibliografia.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração geográfica das áreas abrangidas pelo estudo.	14
Figura 2. Locais de coleta do material estéril.	16
Figura 3. Bancada de Lixiviação usada para os ensaios.	17
Figura 4. Filtração e armazenamento dos lixiviados.	18

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARA-Centro – Administração Regional de Águas do Centro

DAM – Drenagem Ácida de Minas

CE – Condutividade elétrica

EPA – *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental)

OMS – Organização Mundial da Saúde

pH – potencial hidrogeniônico

UEM – Universidade Eduardo Mondlane

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Análise comparativa do pH das mineradoras A, B e C.....	24
Gráfico 2. Análise comparativa da condutividade elétrica das mineradoras A, B e C.	25
Gráfico 3. Análise comparativa de sulfatos das mineradoras A, B e C.	26
Gráfico 4. Análise comparativa do Cálcio das mineradoras A, B e C.....	27
Gráfico 5. Análise comparativa do Manganês das mineradoras A, B e C.	28
Gráfico 6. Análise comparativa do Ferro nas mineradoras A, B e C.	29
Gráfico 7. Análise comparativa do Alumínio das mineradoras A, B e C.	30
Gráfico 8. Análise comparativa do Zinco nas mineradoras A, B e C.	31
Gráfico 9. Comparação entre os valores de pH e os limites estabelecidos.	32
Gráfico 10. Comparação entre os valores de condutividade elétrica e os limites estabelecidos.	33
Gráfico 11. Comparação entre os valores de Sulfatos e os limites estabelecidos.	34
Gráfico 12. Comparação entre os valores de Cálcio e os limites estabelecidos.	34
Gráfico 13. Comparação entre os valores de Manganês e os limites estabelecidos.....	35
Gráfico 14. Comparação entre os valores de Zinco e os limites estabelecidos.....	36
Gráfico 15. Comparação entre os valores de Ferro e os limites estabelecidos.....	36
Gráfico 16. Comparação entre os valores de Alumínio e os limites estabelecidos.....	37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da análise elementar do material estéril das mineradoras.	19
Tabela 2. Resultados dos ensaios de lixiviação para mineradora A.	21
Tabela 3. Resultados dos ensaios de lixiviação para mineradora B.	22
Tabela 4. Resultados dos ensaios de lixiviação para mineradora C.	23
Tabela 5. Limites estabelecidos pelos padrões nacionais e internacionais.....	31
Tabela 6. Áreas das barragens e pilhas de rejeitos.	38
Tabela 7. Quantidades anuais lixiviadas pelas mineradoras.....	38

1. Introdução

A mineração é uma atividade económica que nos últimos 25 anos tem crescido exponencialmente nas regiões centro e norte de Moçambique. Ela tem sido usada como fonte de renda para as famílias locais para própria subsistência, e pelas grandes companhias que usam os produtos desta atividade para comércio no mercado internacional. Exemplos de explorações mineiras são encontrados nas províncias de Manica, onde extrai-se o ouro, província de Nampula, onde se exploram as areias pesadas, e na província de Tete, onde se explora o carvão mineral.

Em particular, a mineração do carvão é a que registou o crescimento mais acelerado com a descoberta de uma gigantesca reserva na província de Tete. Em 2008, constatou-se que uma das maiores reservas de carvão ainda inexploradas, possuindo uma capacidade estimada de 23 bilhões de toneladas de carvão, situa-se no distrito de Moatize (Pondja Jr, et al., 2017). Esta descoberta, trouxe em 2010, multinacionais como a Vale Moçambique (Brasil), Rio Tinto (Anglo-Australiana), *Jindal Steel and Power* (Índia), *Coal and Beacon Hill* (Reino Unido), *Eurasian Natural Resources Corporation* (Cazaquistão), e Minas de Revubué (Anglo-Americana) com o objetivo de explorar este minério (Pondja Jr, et al., 2017).

Apesar de trazer de trazer enormes benefícios, a mineração é acompanhada por diversos problemas ambientais que estão ligados à sua prática. Um destes problemas é a **Drenagem Ácida de Minas (DAM)**.

Este fenómeno é uma grave ameaça ambiental, pois nesta província, a mineração do carvão tem lugar em áreas próximas ao rio Zambeze, que é uma importante fonte de água para o consumo das comunidades locais e desenvolvimento de suas atividades (Joaquim, 2019).

Daí que surge a necessidade de se estudar a possibilidade de ocorrência deste fenómeno, procurando formas de evitar com haja a contaminação ambiental, e seja salvaguardada deste modo, a saúde humana.

Este trabalho é no âmbito de culminação do curso de licenciatura em Engenharia do Ambiente, e propõe a realização de ensaios cinéticos com vista a previsão de geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM).

1.1. Objetivos

Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de geração de drenagem ácida em minas de carvão em Moatize, Tete.

Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização elementar das amostras de estéril coletadas nas pilhas das minas de carvão;
- Determinar o potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE) nos lixiviados das amostras de material estéril das minas de carvão;
- Determinar as concentrações de Ca, Fe, Mn, Al, Zn e SO_4^{2-} nos lixiviados das amostras de estéril das minas de carvão;
- Comparar os resultados obtidos entre as minas abrangidas pelo estudo;
- Comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos pela legislação nacional e internacional;
- Determinar as quantidades de Ca, Fe, Mn, Al, Zn e SO_4^{2-} lixiviadas nas pilhas e barragens de rejeitos.

Pergunta de pesquisa

Irá ocorrer a drenagem ácida nas Minas de Carvão que foram abrangidas por este estudo no distrito de Moatize, província de Tete?

1.2. Metodologia

Para o cumprimento dos objetivos previamente estabelecidos recorreu-se à pesquisa bibliográfica, colheita de amostras, ensaios laboratoriais e análise dos resultados obtidos por meio de ferramentas estatísticas. A pesquisa bibliográfica consistiu na consulta de manuais e artigos científicos relacionados com a Drenagem Ácida, Ensaios de lixiviação e mineração.

Para a realização do trabalho, foram recolhidas amostras de material estéril que foram depositadas nas respectivas pilhas e barragens de rejeitos das 3 Minas em questão.

Para a preparação das amostras para as análises posteriores, foi necessário que estas fossem moídas para diâmetros entre 0.063 e 4 mm, com recurso à um Britador HERZOG BBS200, e um Moinho HSM 250 Hg, do Departamento de Geologia da UEM.

Para a caracterização elementar das amostras, estas foram submetidas à Fluorescência de Raios-X com recurso à um medidor SHIMADZU ED-X 7000 para determinar os óxidos presentes, os elementos químicos e as suas percentagens relativas.

Para os ensaios cinéticos, foram determinadas as concentrações dos metais presentes nos lixiviados gerados pelo material estéril em questão, com recurso ao espectrofotómetro de chama ICP-AES, por um período de 12 semanas.

Foram também determinados os parâmetros pH com recurso a um medidor de pH BIOBASE, a condutividade elétrica com recurso à um medidor EUTECH ECOSCAN CON 6, e a concentração dos sulfatos foi determinada com recurso à um espectrofotómetro visível WPA.

Todos os valores das concentrações foram determinados através da ferramenta Microsoft Excel, tendo os índices gerados durante as análises, e aplicando a equação da reta. Também com recurso à esta ferramenta foram elaborados os gráficos comparativos entre as 3 empresas mineiras em estudo.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Drenagem Ácida de Minas (DAM)

A drenagem ácida de minas (DAM) é um processo que tem início quando os minérios sulfuretados presentes no solo que é movimentado durante a atividade mineira, são expostos ao oxigênio e água atmosféricos, provocando assim a sua oxidação (Lottermoser, 2010), que culmina na queda do pH, aumento da acidez e solubilização de metais-traço e sulfatos (Plante, et al., 2012). Também como consequência da oxidação dos sulfuretos, são produzidas substâncias como o hidróxido de ferro $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$, que altera a coloração dos corpos aquáticos para tons avermelhados, e do ácido sulfúrico (H_2SO_4), que aumenta a concentração de metais (Pondja Jr, et al., 2017). Este fenômeno representa uma grave ameaça ambiental, pois contribui para a poluição dos solos, corpos aquáticos subterrâneos e superficiais, trazendo consigo alterações nos ecossistemas locais (Lottermoser, 2010), tanto na vida aquática, assim como na vida do Homem, que depende destes recursos para a sua sobrevivência (Joaquim, 2019).

Um dos maiores responsáveis pela geração de drenagem ácida de minas é a oxidação da Pirite (FeS_2) (Weiler, et al., 2020), o minério sulfuretado mais abundante e comum na crosta terrestre (Dold, 2005), cuja oxidação para além de produzir ácido sulfúrico H_2SO_4 , liberta também o Fe, Al e Mn, bem como metais pesados como Cd, Pb e Zn (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). Para além da pirite, destacam-se outros sulfuretos como a Pirrotite ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$), Arsenopirite (FeAsS), Calcopirite (CuFeS_2), Esfalerite (ZnS) e Galena (PbS), que apesar da sua menor disponibilidade têm um contributo significativo para a DAM (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015).

Entretanto, durante a oxidação e dissolução dos sulfuretos, ocorre também a dissolução de substâncias minerais que possuem a capacidade de neutralizar os ácidos que se formam com a oxidação dos sulfuretos, denominados minerais neutralizadores de ácidos. Neste grupo, a maior capacidade de neutralização encontram-se os minerais carbonatados, onde a calcite (CaCO_3) destaca-se com a maior capacidade de neutralização, seguida pela magnesite (MgCO_3), a dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), a ankerite ($\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$) (Lottermoser, 2010); tem-se também os minerais silicatados, representados pelas olivinas, piroxenas, anfíbulas, feldspatos, micas, argilas e apatites,

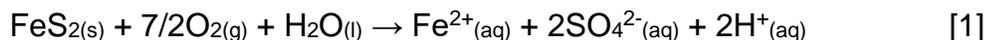
onde as olivinas é que possuem capacidade de neutralização significativa (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015); os catiões permutáveis que se encontram associados as micas, as argilas e matéria orgânica (Stromberg & Banwart, 1999), e os minerais de hidróxidos, onde a caulinite e gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) possuem capacidade de neutralização significativa (Lottermoser, 2010).

Deste modo, pode-se afirmar que durante a decomposição das rochas de mineração, paralela a dissolução de substâncias que geram os ácidos, também substâncias que também se dissolvem e neutralizam os ácidos, o que transforma o processo global de DAM como a resposta química às reações climáticas que geram e consomem os ácidos (Lottermoser, 2010).

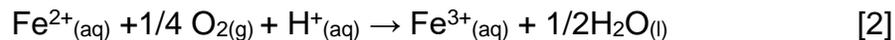
2.2. Minerais geradores de DAM

2.2.1. Pirite

A oxidação da pirite pode ser descrita e identificada como um conjunto de 7 etapas elementares (Rimstidt & Vaughan, 2003). Inicia-se a oxidação da pirite na presença de oxigénio atmosférico e água, em torno de pH 6 (Evangelou & Zhang, 1995), ocorre uma reação direta com a formação do Fe^{2+} , conforme [1]:



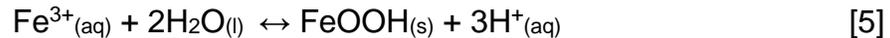
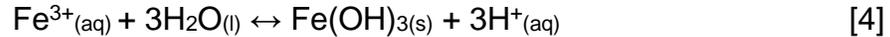
O Fe^{2+} sofre de seguida oxidação para Fe^{3+} , conforme [2],



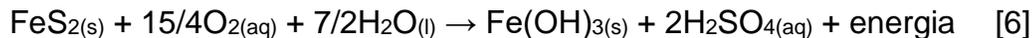
O Fe^{3+} possui baixa solubilidade em condições de pH neutro, mas ao passo que ocorre a oxidação com o oxigénio, e dá-se a queda do pH até 4.5, o Fe^{3+} passa a oxidar a pirite conforme [3],



Com o aumento do pH, a concentração do Fe^{3+} dissolvido diminui e a sua solubilidade é limitada pela precipitação de hidróxidos férricos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) e oxi-hidróxidos (FeOOH) (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015); assim, com o pH acima de 3, dão-se as reações de precipitação descritas em [4] e [5] (Lottermoser, 2010):

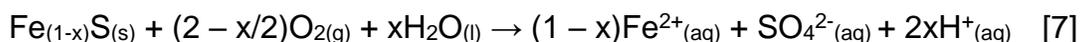


Estes hidróxidos e oxi-hidróxidos formam floculantes gelatinosos amarelo-avermelhados, manchas, revestimentos, lamas viscosas e precipitações em corpos hídricos afetados pela DAM (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). De modo geral, em condições abióticas, a taxa de oxidação da pirite por Fe^{3+} é controlada pela taxa de oxidação por Fe^{3+} (Dold, 2005), e a oxidação da pirite irá continuar sem interrupção a menos que Fe^{3+} , O_2 ou pirite seja removido, ou se o pH seja aumentado significativamente (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). De forma simplificada, a reação geral da DAM é apresentada em [6] (Lottermoser, 2010):



2.2.2. Pirrotite

A Pirrotite é uma gama de compostos não-estequiométricos intermédios aos extremos estequiométricos da Troilite (FeS) e da Pirite (FeS_2) (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). Possui algumas características únicas entre os minérios sulfuretados, visto que é um condutor metálico (os outros são semicondutores) e pode sofrer tanto dissolução oxidativa, assim como não-oxidativa (Becker, 2009). A sua fórmula geral é $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$, onde o valor de “x” pode variar de 0.125 (Fe_7S_8) á > 0.0 . A equação geral da oxidação da pirrotite é dada em [7]:



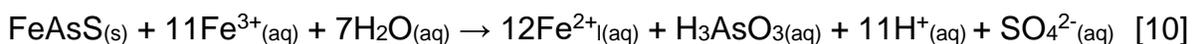
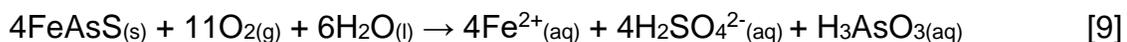
Desta reação, 1 mol de pirrotite gera apenas 0 a <0.25 mol de ácido. Porém, observações de campo contrariam esta quantidade reduzida de acidez encontrada, pois a quantidade de ácido formada é mais semelhante a da pirite (Nicholson & Scharer, 1994); foi demonstrado que 1 mol de pirrotite gera mais iões H^+ do que 1 mol de pirite, quando o Fe^{3+} é o oxidante (Jambor, 2003), conforme [8]:



A dissolução oxidativa da pirrotite é 103 vezes mais lenta que a dissolução não-oxidativa (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015), o que implica que a cinética da reação será dominada pela dissolução não oxidativa, apesar de apenas uma pequena parte da pirrotite se dissolve desta forma (Thomas, et al., 2003); quando as superfícies da pirrotite sofrem dissolução oxidativa, elas sofrem uma reestruturação para uma estrutura similar á da pirite, pelo que a análise textural das amostras pode indicar o estágio de oxidação (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015); a oxidação da pirrotite pode ultrapassar a da pirite em 20-100 vezes (Belzile, et al., 2004), e a sua rápida oxidação está essencialmente ligada á deficiência de Fe na rede cristalina, o que deixa a rede com uma capacidade mais baixa e proporciona um ambiente mais condutivo para a oxidação.

2.2.3. Arsenopirite

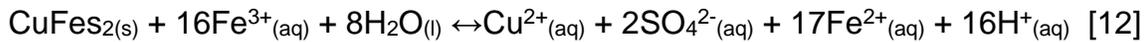
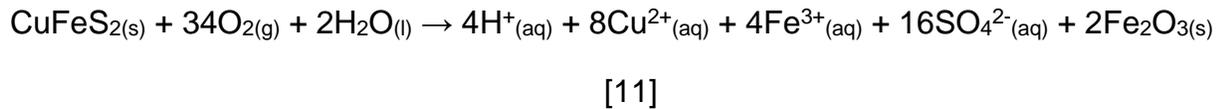
Trata-se do mineral sulfuretado contendo Arsénio mais comum na crosta terrestre (Corkhill & Vaughan, 2009), e em condições de oxidação da arsenopirite liberta elevadas concentrações de Arsénio dissolvido (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). Á semelhança da pirite, a oxidação da arsenopirite é um processo eletroquímico (Corkhill & Vaughan, 2009), que envolve uma mistura de processos controlados por superfície e difusão (Asta, et al., 2010). Deste modo, a oxidação da arsenopirite é descrita conforme [9] e [10]:



A oxidação da arsenopirite aumenta exponencialmente com o aumento do Fe^{3+} (Yunmei, et al., 2004), e é fortemente afetada pela concentração do O_2 , e menos pelo pH e temperatura (Asta, et al., 2010); sob condições ácidas, forma-se uma camada de superfície enriquecida com enxofre, composta por polis sulfuretos, sulfatos e Enxofre potencialmente elementar (Asta, et al., 2010); em pH ligeiramente ácido a básico, ocorre a precipitação de fases de Fe, e este revestimento de Fe em superfícies minerais impede a difusão de espécies aquosas através dela, e a concentração de As libertado sofre diminuição com o tempo (Asta, et al., 2010).

2.2.4. Calcopirite

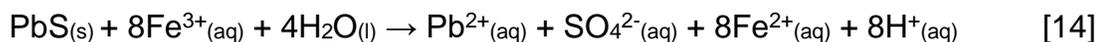
A calcopirite (CuFeS_2) é um mineral sulfuretado que contém Cu na sua composição química, e a sua oxidação liberta elevadas concentrações de Cu que potencialmente estão a ameaçar a saúde geral dos organismos aquáticos (Li, et al., 2010). A produção de ácido através da oxidação da calcopirite é uma combinação da oxidação do Fe^{2+} e a hidrólise do Fe^{3+} , e a oxidação anaeróbica por Fe^{3+} leva a uma grande queda do pH, conforme [11] e [12]:



A sua dissolução é maximizada por concentrações elevadas de oxidantes, oxidantes fortes e altas temperaturas (Kimball, et al., 2010); formam-se camadas de produtos (Enxofre elementar e Jarosite), que podem funcionar como barreiras que fazem com que a taxa de dissolução com que a taxa de dissolução seja controlada pela taxa de transporte difuso de reagentes ou produtos afastados da superfície de calcopirite (Kimball, et al., 2010).

2.2.5. Galena

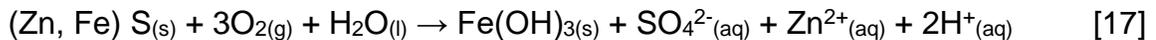
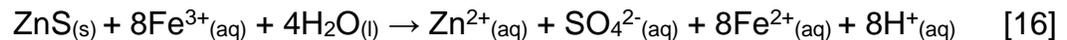
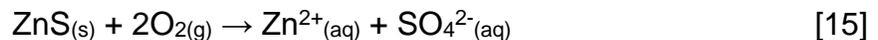
A oxidação da galena (PbS) é potencializada à baixos pH, ao passo que se dissolve mais rapidamente em soluções aquosas ácidas (Acero, et al., 2007). A partir de pH 1, a dissolução da galena é dependente do pH, e não do O_2 ; mas, isso muda a partir de pH 3, a quantidade de O_2 dissolvido acelera a taxa dissolução (Acero, et al., 2007). A formação de ácido dá-se pela dissolução não-oxidativa da galena (Abbassi, et al., 2009), conforme [13] e [14]:



2.2.6. Esfalerite

A esfalerite (ZnS) é o mineral sulfuretado menos ácido de todos anteriormente apresentados (Lottermoser, 2010), e a sua composição é altamente variável devido à substituição de diferentes elementos dentro da estrutura ZnS (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015); o Fe é o elemento mais comum a se substituir na esfalerite e forma uma sólida série de soluções com Zn com concentrações reportadas até 32 wt% (Stanton, et al., 2008).

Podem ser encontrados cátions divalentes como Cd, Mn e In, com elementos-traço de Cu e Pb geralmente associados à esfalerite, geralmente pela sua presença em vestígios minerais como calcopirite e galena, em vez de substituição em esfalerite (Cook, et al., 2009). A sua reatividade varia de acordo com a sua composição, variando assim, a quantidade de ácido formado (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). A dissolução oxidativa da esfalerite não produz ácido, mas liberta Zn^{2+} , mas se o Fe^{3+} for o oxidante, haverá a formação de ácido (Abbassi, et al., 2009). Seguem-se as reações de oxidação da esfalerite rica em Fe (Lottermoser, 2010), conforme [15],[16] e [17]:



Quanto maior a concentração de Fe em esfalerite, mais suscetível é o mineral à oxidação (Weisener, et al., 2003); ocorre a formação de uma camada de sulfureto com déficit metálico na oxidação, que pode proteger a esfalerite de uma maior oxidação (Weisener, et al., 2003). A taxa de libertação de elementos-traço de esfalerite à pH 2.0 – 4.0 diminui na ordem $Zn > Fe > Mn > Pb > Cd$ (Stanton, et al., 2008).

2.2.7. Fatores que influenciam a dissolução dos minerais geradores de DAM

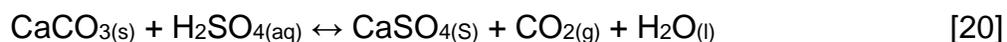
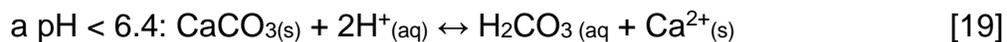
A quantidade de ácido formado, a taxa de reação e a resistência à meteorização variam entre os minerais sulfuretados (Lottermoser, 2010); a sua reatividade é bastante influenciada pela presença e quantidade de Fe no mineral sulfuretado (Plumlee, 1999), como é o caso da galena e esfalerite pobre em Fe, que têm um déficit de Fe na sua

estrutura cristalina, e são muito menos reativos e não têm capacidade de formar quantidades significativas de ácido (Plumlee, 1999); a concentração de oxidantes como O₂ (Asta, et al., 2010), e o Fe³⁺ (Yunmei, et al., 2004) afetam significativamente na dissolução da calcopirite; a pirrotite é bastante influenciada pela sua estrutura cristalina, pH, temperatura, quantidade de elementos-traço e bactérias (Belzile, et al., 2004); a natureza eletroquímica do minério também desempenha um enorme papel na sua dissolução, como é o caso da pirite. De modo geral, os fatores comuns são: pH, temperatura, tipo de oxidante (O₂ ou Fe³⁺), a morfologia do mineral, ação microbiana e quantidade de elementos-traço (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). A reatividade dos minerais sulfuretados, em ordem decrescente é pirrotite > galena = esfalerite > pirite = arsenopirite > calcopirite (Keith & Vaughan, 2000); e a sua resistência à oxidação, em ordem crescente é pirrotite > galena > esfalerite > arsenopirite > pirite > calcopirite (Moncur, et al., 2009).

2.3. Minerais neutralizadores de DAM

2.3.1. Minerais carbonatados

Considerados neutralizadores primários, os minerais carbonatados são a principal fonte de neutralização de DAM. A sua dissolução resulta no consumo de íons H⁺, e na libertação de íons HCO₃⁻, íons Ca²⁺ e Mg²⁺ e H₂CO₃ (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015); os mais eficazes são os que contêm carbonato de Cálcio e carbonato de Magnésio, incluindo calcite (CaCO₃), magnesite (MgCO₃), dolomite (CaMg(CO₃)₂) e ankerite (CaFe(CO₃)₂) (Lapakko, 2002). A calcite (CaCO₃) é a mais importante de todos os neutralizadores pela sua ocorrência geológica generalizada (Lottermoser, 2010). O seu mecanismo de neutralização de ácidos acima e abaixo de pH 6.4 é descrito conforme [18], [19] e [20]:

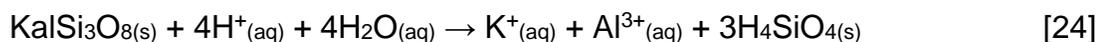
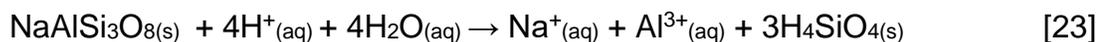
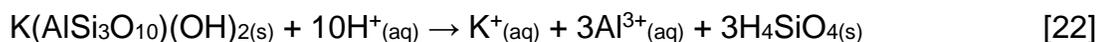
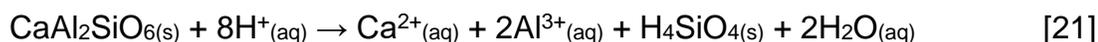


Estas reações podem ser reversíveis, caso ocorra uma alteração na temperatura, perda de água ou perda de CO₂ e provocar a precipitação dos carbonatos (Lottermoser, 2010);

A calcite possui uma taxa de dissolução mais rápida em comparação à dolomite e a magnesite, que são 1 a 4 ordens de magnitude mais lentas (Lapakko, 2002); os carbonatos de Fe e Mn não oferecem neutralização líquida de ácido em condições de oxidação, devido à hidrólise e à precipitação destes metais, causando a produção ácida (Paktunc, 1999).

2.3.2. Minerais silicatados

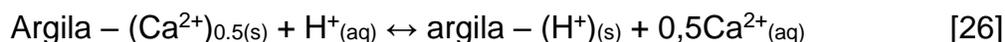
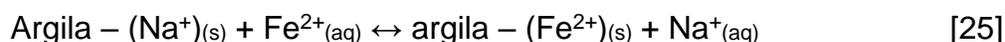
Os minerais silicatados proporcionam uma menor neutralização em relação aos minerais carbonatados e são menos solúveis a pH moderado (Bowell, et al., 2000). Porém, a sua dissolução pode manter condições neutras, se a taxa de produção de ácido for baixa (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015), e pelo facto de serem relativamente abundantes, isso torna-os em neutralizadores potencialmente significativos (Bowell, et al., 2000). As reações de neutralização destes minerais são descritas conforme [21], [22], [23] e [24], (De Mello, et al., 2014):



Em estudo realizado em bacias de retenção de Waillet-Amulet, Canadá, concluiu-se que os filossilicatos, piroxenas, anfíbulas e feldspatos eram bases efetivamente sólidas com um potencial neutralizante notável (Nesbitt & Jambor, 1998); e foram registados níveis elevados de Mg em águas mais neutralizadas, indicando que a dissolução de Mg contribuiu para o potencial neutralizante (Nesbitt & Jambor, 1998).

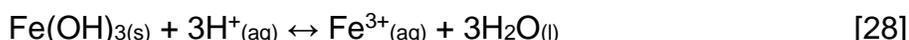
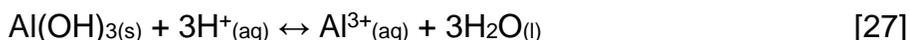
2.3.3. Catiões permutáveis

Estes se encontram em locais de troca de micas, argilas e matéria orgânica (Stromberg & Banwart, 1999); podem ser substituídos por catiões dissolvidos em soluções precipitadas. Os iões de dissolução H^+ e Fe^{2+} gerados pela oxidação dos sulfuretos, competem por posições de troca de catiões e são temporariamente adsorvidos, conforme [25] e [26] (Lottermoser, 2010):



2.3.4. Minerais de hidróxidos

Os aluminossilicatos como é o caso da caulinite, ao se dissolverem libertam Al^{3+} dissolvido (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015); se esta precipitação ocorrer na forma de gibsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, então ocorrerá uma reação de geração de ácido; porém, se a gibsita já existe, então poderá fornecer uma capacidade de neutralização adicional que pode consumir iões H^+ dissolvidos (Lottermoser, 2010), e os sólidos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ também podem ser redissolvidos em águas ácidas, consumindo também iões H^+ (Lottermoser, 2010), conforme [27] e [28]:



2.3.5. Fatores que influenciam a dissolução dos minerais neutralizadores de DAM

De modo geral, os factos que influenciam a dissolução destes minerais são semelhantes aos dos sulfuretos, a destacar o tamanho do grãos, a textura e presença de elementos-traço, aumentando ou diminuindo a resistência do mineral à meteorização (Lottermoser, 2010); cada grupo de minerais neutralizadores possui a sua faixa de pH de tampão (Parker, 1999): os minerais carbonatados funcionam um tampão na faixa de 8.3 - 6.2; os minerais silicatados possuem uma faixa de tampão entre 6.2 – 5.0, do qual se libertam catiões alcalinoterrosos e bases, e a formação de ácido silícico (Lottermoser, 2010); o tampão dos catiões permutáveis ocorre entre 5.0 e 4.2 (Lottermoser, 2010), o ácido sulfúrico é tamponado por catiões hidroxipolímeros de Al^{3+} , resultantes da meteorização de silicatos. Estes catiões são trocados em intercamadas de minerais de argila com catiões básicos, que por sua vez são libertados por precipitação e troca com H^+ (Lottermoser, 2010); o tampão do Al e Fe ocorre entre 4.2 e 3.8; a precipitação de silicato liberta óxidos de Fe e Al, que tamponam o ácido sulfúrico disponível; e o Fe mobilizado, contribui para formar a jarosite (Lottermoser, 2010).

3. Área de estudo

O presente estudo teve lugar na província de Tete, localizada no noroeste de Moçambique, fazendo fronteira com a Zâmbia, o Zimbábue e o Malawi, e limite com as províncias de Manica, Sofala e Zambézia. O distrito abrangido pelo estudo foi o de Moatize.

Moatize é um distrito da província de Tete que está situado na zona centro de Moçambique. Fica a 20 km da cidade de Tete e tem uma superfície total de cerca de 8.455 km² de tamanho e uma densidade populacional de 13,4 habitantes/km². O seu clima é semiárido e subtropical, tendo uma precipitação média anual e uma evapotranspiração potencial de 644 mm/ano e 1,626 mm/ano, respetivamente (Pondja Jr, et al., 2017).

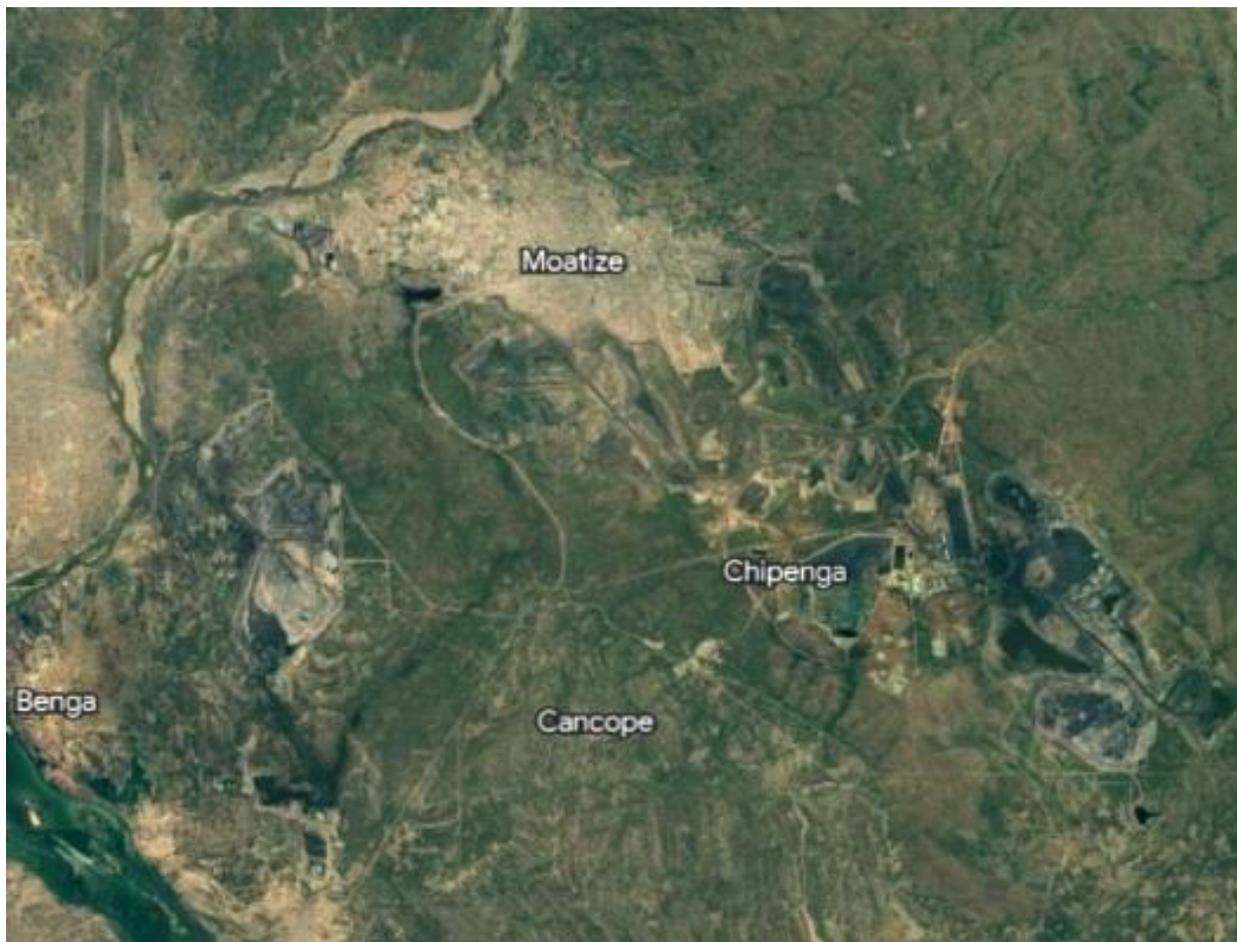


Figura 1. Ilustração geográfica das áreas abrangidas pelo estudo.

A Bacia do Carvão do Moatize situa-se na província de Tete, em Moçambique (16° 10' 20" S 33° 47'00" E, África austral. Nesta região, o carvão está associado ao Supergrupo Karoo (Johnson, et al., 1996). A formação Moatize atinge uma espessura de 340 m com seis camadas conhecidas – de baixo para cima: Sousa Pinto, Chipanga, Bananeiras, Intermédia, Grande Falésia e André – das quais Chipanga é a mais espessa e a principal explorada (Vasconcelos, 2000). O Complexo de Minas de Carvão do Moatize é um dos maiores depósitos de carvão à nível mundial, explora a camada Chipanga e estima-se que funcione até 2049.

4. Materiais e métodos

O presente trabalho científico foi elaborado obedecendo um conjunto de etapas que teve início com a consulta bibliográfica, seguida pelo trabalho de campo para a recolha de amostras de material estéril, determinação dos parâmetros de interesse em laboratório, avaliação dos resultados obtidos e, por fim, a elaboração do relatório final.

4.1. Escolha dos pontos de amostragem

O presente estudo abrangeu um total de 3 empresas mineiras que se localizam no distrito de Moatize, na província de Tete. A seu pedido, não foram mencionados quaisquer nomes, para efeitos de confidencialidade. Nestas mineradoras, os locais de interesse para a amostragem foram os locais designados para o depósito de material estéril denominadas pilhas ou barragens de rejeitos.

4.2. Coleta e armazenamento de amostras

As mineradoras em questão, foram visitadas num espaço de dois dias, onde foram visitadas as pilhas e barragens de rejeitos. Para cada mina, colheu-se cerca de 15 kg de material estéril para as análises, e, para efeitos de representatividade, foram retiradas quantidades de material estéril em 10 pontos do local, misturadas com recurso a pás, e armazenadas em sacos plásticos pretos, que por sua vez, foram colocados em sacos de sisal para reforçar a segurança das amostras.



Figura 2. Locais de coleta do material estéril.

4.3. Ensaio de Lixiviação

Este método teve como objetivo avaliar a mobilidade geoquímica dos elementos e comportamento dos parâmetros de interesse para a geração de drenagem ácida de

minas. Este ensaio teve como inspiração no Método 1627, onde o material estéril de mineração é introduzido em células de humidade, com formato cilíndrico, e continuamente são introduzidos água desionizada e oxigénio por meio de uma tubulação auxiliar, alguns deles com regulação térmica, com vista a simular o processo de possível geração de drenagem ácida num ambiente controlado, e ao final de cada ciclo de 5 á 7 dias, os lixiviados gerados, são filtrados na base, e analisados em laboratório (EPA, 2011).



Figura 3. Bancada de Lixiviação usada para os ensaios.

Para a realização deste método, foi projetada e construída uma bancada de lixiviação de 1.90 m de altura e 1.10 m de largura, respetivamente. Na margem superior da bancada, foram suspensas as 3 colunas de lixiviação, de forma cilíndrica, em policarbonato, com 60 cm de comprimento e 4.2 cm de diâmetro, respetivamente. Na base de cada coluna, foi acoplado uma tampa com dispositivo de descarga e papel de filtro Whatman, para retirada e filtração dos lixiviados, respetivamente, e anexa á descarga foi conectada uma mangueira que escoava os lixiviado para um *Erlenmeyer* que serve de reservatório. E,

por cima de cada coluna, foi posicionado um chuveiro de 20 cm de comprimento e 4.2 cm de diâmetro, como meio de alimentação de água desionizada para cada início de ciclo de lixiviação. Esta bancada foi posicionada no terraço do laboratório, para permitir uma simulação com influência direta dos fatores ambientais, como a oxigenação e temperatura. Cada ciclo de lixiviação teve a duração de 7 dias, onde o 1º ciclo teve início no dia 30 de Setembro de 2021, e o 12º ciclo encerrou no dia 23 de Dezembro de 2021, perfazendo um total de 12 semanas de ensaios, sempre com inícios e términos dos ciclos nas quintas-feiras. Após a coleta, os lixiviados foram filtrados e armazenados em tubos centrífugos de 15 ml, sempre com 3 réplicas, e posteriormente analisados no espectrofotômetro ICP-AES. Após as leituras, foram gerados índices correspondentes á cada parâmetro de interesse, foram elaboradas as curvas de calibração correspondentes, e por último, foram determinadas as respectivas concentrações das amostras.



Figura 4. Filtração e armazenamento dos lixiviados.

5. Resultados e discussão

5.1. Análise elementar do material estéril

Foram realizadas análises para a determinação da composição elementar do material estéril das mineradoras abrangidas pelo estudo, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1. Resultados da análise elementar do material estéril das mineradoras.

Elementos na forma de Óxidos	Mineradoras		
	A(%)	B(%)	C(%)
Al ₂ O ₃	41.151	39.765	38.754
SiO ₂	38.766	43.506	40.902
K ₂ O	9.711	11.275	7.167
Fe ₂ O ₃	7.068	3.965	8.155
TiO ₂	1.049	0.906	0.766
CaO	0.868	0.396	4.105
P ₂ O ₅	0.664	-	-
SO ₃	0.458	0.046	0.076
MnO	0.073	0.053	0.103
V ₂ O ₅	0.066	-	0.049
ZrO ₂	0.033	0.019	-
SrO	0.023	0.012	0.035
ZnO	0.014	0.004	0.005
CuO	0.013	0.006	0.009
Cr ₂ O ₃	0.010	0.028	0.021
Rb ₂ O	0.010	0.007	0.006
Cl	0.008	-	0.005
Y ₂ O ₃	0.008	0.002	0.002

Ga ₂ O ₃	0.003	0.001	0.002
NbO	0.002	0.002	0.001
PbO	0.001	-	-
ThO ₂	0.001	-	-
GeO ₂	0.001	-	-
Ir ₂ O ₃	-	0.004	-
NiO	-	0.002	-

Os resultados da análise elementar revelam para todas as mineradoras, uma predominância de óxidos de elementos com potencial neutralizante. Destaca-se o Al₂O₃ que encontram-se em maior percentagem na mineradora A com 41.151%, e com 39.765% e 38.754% nas mineradoras B e C, respetivamente; o SiO₂ encontra-se em maior percentagem na mineradora B com 43.506%, e com 40.902% e 38.766% nas mineradoras C e A, respetivamente; o CaO é predominante na mineradora C com 4.105%, e encontra-se aos 0.868% e 0.396% nas mineradoras A e B, respetivamente; o MnO encontram-se à 0.103% na mineradora C, e 0.073% e 0.053% nas mineradoras A e B, respetivamente; o ZnO encontra-se à 0.014% na mineradora A, e 0.005% e 0.004% nas mineradoras C e B, respetivamente. Estas diferenças nas percentagens elementares devem-se a variações na composição geológica dos locais onde se realizaram as amostragens do material estéril. Apesar dos resultados apenas ilustrarem a presença destas espécies combinadas na forma de óxidos, isto indica uma enorme disponibilidade das mesmas para o processo de neutralização ácida na natureza.

5.2. Resultados dos ensaios de lixiviação do material estéril

Os ensaios de lixiviação tiveram lugar de 30 de Setembro à 23 de Dezembro de 2021, no laboratório do Departamento de Química, num período de 12 semanas, com o objetivo de simular em ambiente controlado a mobilidade geoquímica relacionada à possível geração de DAM. Estes ensaios foram realizados com recurso a colunas de lixiviação posicionadas verticalmente, contendo cada uma, 400 g de material estéril, e

semanalmente introduziu-se 200 ml de água desionizada, para a posterior coleta e análise.

Os resultados dos ensaios de lixiviação durante as 12 semanas para a mineradora A estão ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de lixiviação para mineradora A.

Semana	Parâmetros							
	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	SO_4^{2-} (mg/l)	Ca (mg/l)	Mn (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Zn (mg/l)
1	7.130	1028.000	970.800	31.40	1.849	0.045	4.719	2.764
2	7.440	269.000	365.730	21.317	1.385	0.039	4.01	1.529
3	7.680	694.000	354.640	14.360	0.901	0.034	3.365	0.962
4	7.760	1344.000	260.040	14.923	0.066	0.031	2.248	0.557
5	7.620	1043.000	201.310	6.937	0.567	0.023	1.508	0.484
6	7.580	243.000	132.130	6.456	0.557	0.024	1.45	0.445
7	7.140	1003.000	210.300	3.281	0.162	0.019	0.489	0.119
8	7.310	378.000	72.400	3.413	0.162	0.018	0.531	0.128
9	7.240	247.000	42.980	-	-	-	-	-
10	7.240	800.000	118.700	1.669	0.09	0.02	0.608	0.154
11	7.580	490.000	82.910	-	0.002	0.022	-	-
12	7.390	278.000	137.330	3.667	0.161	0.021	0.763	0.204
Média	7.426	651.417	245.772	10.742	0.537	0.027	1.969	0.735
Desvio Padrão	0.216	386.026	251.156	9.686	0.609	0.009	1.556	0.840
Cumulativo	-	7817	2949.27	107.423	5.902	0.296	19.691	7.346
Menor	7.130	243.000	42.980	1.669	0.002	0.018	0.489	0.119
Maior	7.760	1344.000	970.800	31.400	1.849	0.045	4.719	2.764

Verificou-se que durante este período de análise, o pH manteve-se básico (7.130 – 7.760), o que indica a enorme presença e influência de espécies com poder neutralizante, com destaque para o Ca (1.699 mg/l – 31.40mg/l), o Al (0.489 – 4.719 mg/l), o Mn (0.002 – 1.849 mg/l), o Zn (0.119 – 2.764 mg/l). A presença do Fe (0.018 – 0.045 mg/l) pode ser indicador tanto de espécies que geram ácidos, assim como de espécies neutralizantes (Pondja Jr, et al., 2017). Também se verificaram valores de EC entre as altas concentrações de SO_4^{2-} (42.980 – 970.800 mg/l) mostram uma velocidade alta de oxidação de minerais que podem gerar acidez. Isso também indica um rápido

consumo destes minerais que geram ácidos em relação aos minerais neutralizantes que contém Ca, Mn, Al e Zn.

A Tabela 3 ilustra os resultados dos ensaios de lixiviação referentes à mineradora B.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de lixiviação para mineradora B.

Semana	Parâmetros							
	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	SO_4^{2-} (mg/l)	Ca (mg/l)	Mn (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Zn (mg/l)
1	7.690	3720.000	1083.800	36.296	0.103	0.049	5.970	2.101
2	8.420	400.000	57.830	14.518	0.900	0.034	3.144	0.972
3	8.420	516.000	156.790	14.960	0.989	0.036	3.240	0.943
4	7.930	1192.000	218.200	10.430	0.066	0.031	2.304	0.482
5	7.840	-	-	7.817	0.028	0.024	1.257	0.353
6	8.020	533.000	217.170	6.455	0.019	0.031	1.553	-
7	7.450	1149.000	226.530	5.092	0.035	0.018	0.785	0.132
8	7.540	782.000	150.540	3.399	0.167	0.018	0.608	0.136
9	6.990	77.100	55.340	4.835	0.019	0.02	0.742	0.146
10	7.110	705.000	245.730	6.225	0.018	0.02	0.838	0.128
11	7.550	916.000	109.210	4.990	0.033	0.02	0.938	0.155
12	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	7.724	999.010	252.118	10.456	0.216	0.027	1.944	0.555
Desvio Padrão	0.466	1014.514	300.209	9.410	0.364	0.010	1.640	0.635
Cumulativo	-	9990.100	2521.18	115.017	2.377	0.301	21.379	5.548
Menor	6.990	77.100	55.340	3.399	0.018	0.018	0.608	0.128
Maior	8.420	3720.000	1083.840	36.296	0.989	0.049	5.970	2.101

Para esta mineradora, observaram-se também valores básicos para o pH (6.990 – 8.420), o que revela enorme influência do Ca (3.399 – 36.296 mg/l), o Al (0.608 – 5.970 mg/l), o Zn (0.128 – 2.101 mg/l), o Mn (0.018 – 0.989 mg/l) como espécies neutralizantes de ácidos. Também se observou valores de CE entre 77.100 e 3720.000 $\mu\text{S/cm}$ e concentrações de Fe entre 0.018 e 0.049 mg/l. Altas concentrações de SO_4^{2-} foram encontradas para esta mineradora (55.340 – 1083.840 mg/l), o que indica uma elevada velocidade de oxidação de minerais que produzem os ácidos, e a sua tendência de rápido esgotamento em relação às espécies neutralizadoras.

A mineradora C, como ilustra a Tabela 4, apresentou valores de pH entre 7.090 e 8.240, que indicam um comportamento básico, que se deve à espécies neutralizantes como o Ca (0.421 – 78.877 mg/l), o Al (7.733 - 0.024 mg/l), o Zn (2.040 – 0.164 mg/l) e o Mn (0.001 – 0.030 mg/l). Foram encontrados valores de CE entre 95.100 – 2816.000 $\mu\text{S/cm}$, e concentrações de Fe entre 0.012 e 0.060 mg/l. Foram também observadas elevadas concentrações de SO_4^{2-} (8.196 – 3018.190 mg/l) que revelam uma alta taxa de oxidação de minerais com potencial ácido neste material estéril.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de lixiviação para mineradora C.

Semana	Parâmetros							
	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	SO_4^{2-} (mg/l)	Ca (mg/l)	Mn (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Zn (mg/l)
1	7.370	1970.000	3018.200	78.877	0.03	0.06	7.733	2.040
2	7.730	972.000	381.020	13.136	0.021	0.029	3.702	0.411
3	7.820	2816.000	700.510	17.197	0.012	0.046	2.620	0.585
4	7.950	1908.300	375.660	5.161	0.006	0.023	1.475	0.164
5	8.240	805.000	86.170	1.222	0.002	0.028	0.024	-
6	8.160	735.670	42.400	1.183	0.002	0.024	0.125	-
7	7.320	813.000	44.210	0.507	0.001	0.014	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
9	7.940	-	13.850	-	0.004	0.032	-	-
10	7.090	282.000	17.326	-	0.003	0.022	-	-
11	7.290	242.000	8.1957	0.421	0.003	0.012	-	-
12	7.290	95.100	-	0.759	0.005	0.014	-	-
Média	7.655	1063.910	468.753	13.163	0.008	0.028	2.613	0.800
Desvio Padrão	0.397	886.664	925.018	25.400	0.009	0.014	2.884	0.845
Cumulativo	-	10639.1000	4687.532	118.463	0.089	0.304	15.679	3.200
Menor	7.090	95.100	8.196	0.421	0.001	0.012	0.024	0.164
Maior	8.240	2816.000	3018.190	78.877	0.030	0.060	7.733	2.040

5.3. Análise comparativa dos resultados de lixiviação

Para efeitos de comparação, foram elaborados gráficos para as três mineradoras em questão, com objetivo de auferir as variações dos parâmetros em análise.

Conforme o Gráfico 1, os valores de pH para a mineradora B permaneceram superiores aos valores das mineradoras A e C nas primeiras 4 semanas de análise, devido à maior dissolução de minerais neutralizantes durante o ensaio; a mineradora C apresentou uma maior dissolução destes minerais neutralizantes em relação às outras entre as semanas 4 e 9 o que se traduziu no aumento do pH neste período, até registrar uma queda a partir da semana 9; a mineradora A apresentou maiores valores de pH até o fim do ensaio de lixiviação, influenciada pela dissolução destes minerais.

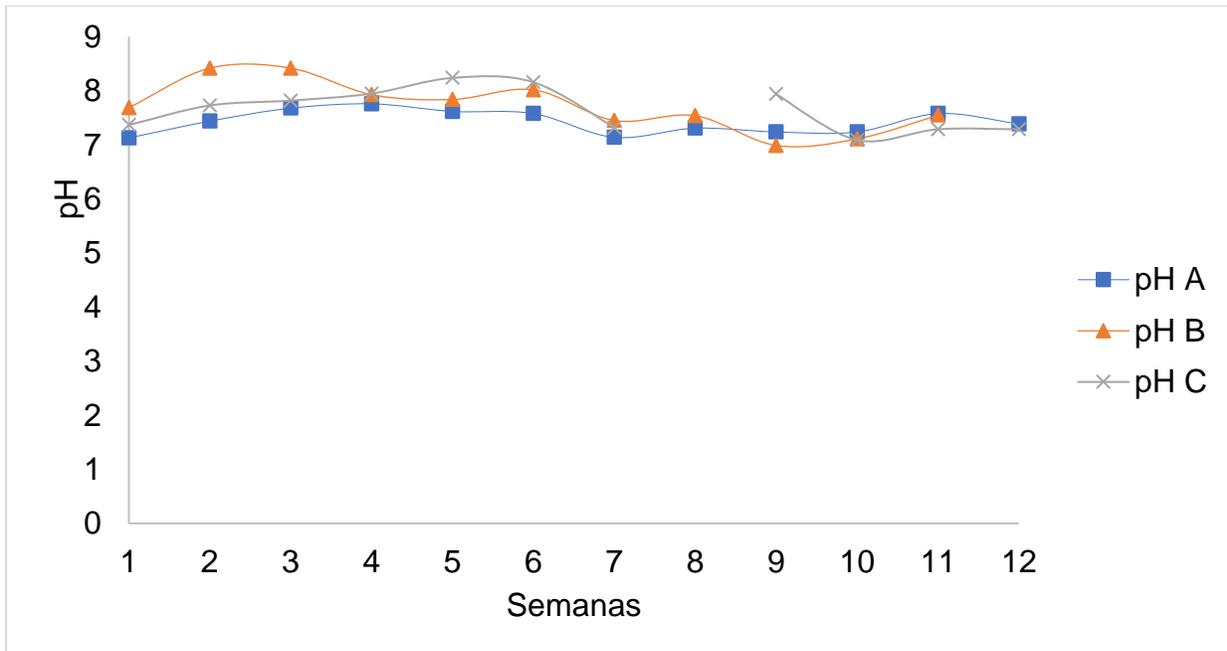


Gráfico 1. Análise comparativa do pH das mineradoras A, B e C.

Segundo o Gráfico 2, no início do ensaio, a mineradora B apresentou os maiores valores de condutividade elétrica até o fim da semana 2, que é justificada pelo elevado teor de sais presentes nos lixiviados; a semana 2 foi marcada pela subida deste parâmetro, em que a mineradora C apresentou os maiores valores até o meio da semana 4, devido ao teor de sais nos lixiviados; deste período até a metade da semana 5, a mineradora A apresentou maiores valores de condutividade elétrica, afetados pelo aumento de teor de

sais; a mineradora B apresentou os maiores valores de sais, o que subiu a condutividade elétrica entre as semanas 6 e 9, e durante a semana 9, a mineradora A teve uma subida em relação às outras mineradoras, e até o final do ensaio a mineradora B apresentou maiores valores de condutividade elétrica.

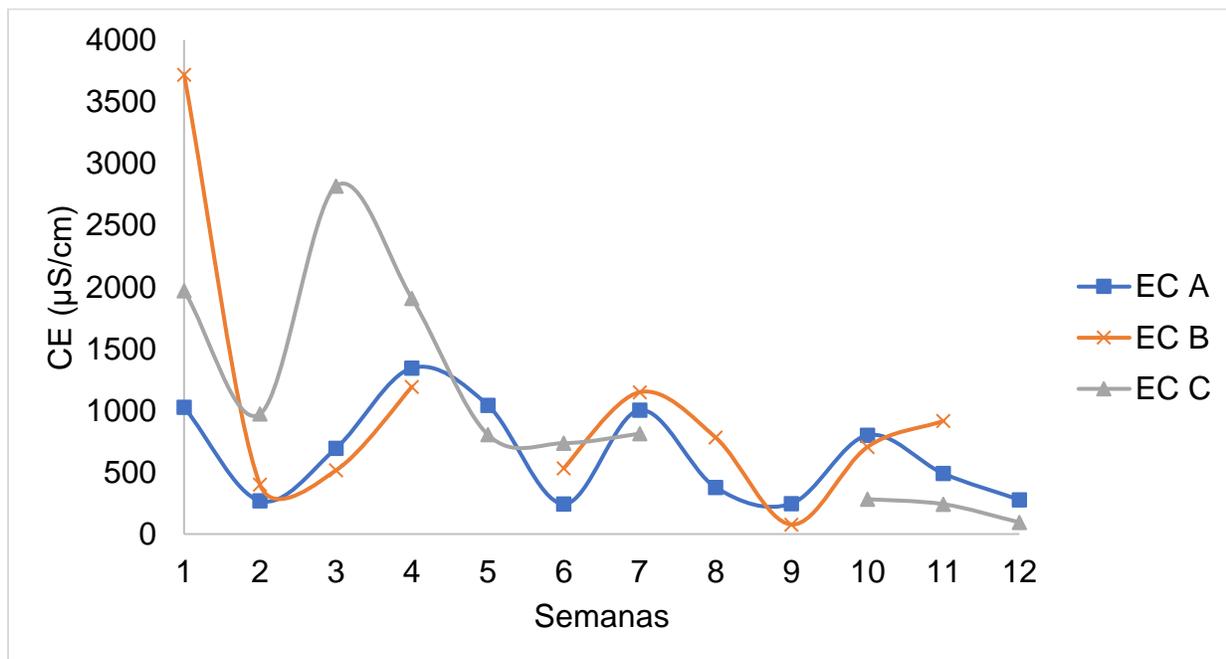


Gráfico 2. Análise comparativa da condutividade elétrica das mineradoras A, B e C.

Conforme o Gráfico 3, durante a semana 1, a mineradora C apresentou uma maior produção de SO_4^{2-} , o que se traduziu em maiores concentrações de SO_4^{2-} , e manteve esta tendência até a semana 4, onde a mineradora A teve maior produção de SO_4^{2-} em relação à mineradora C até a semana 6; entre as semanas 6 e 11, a mineradora B apresentou produção de SO_4^{2-} , tendência esta que foi alterada pela mineradora A até o final do ensaio.

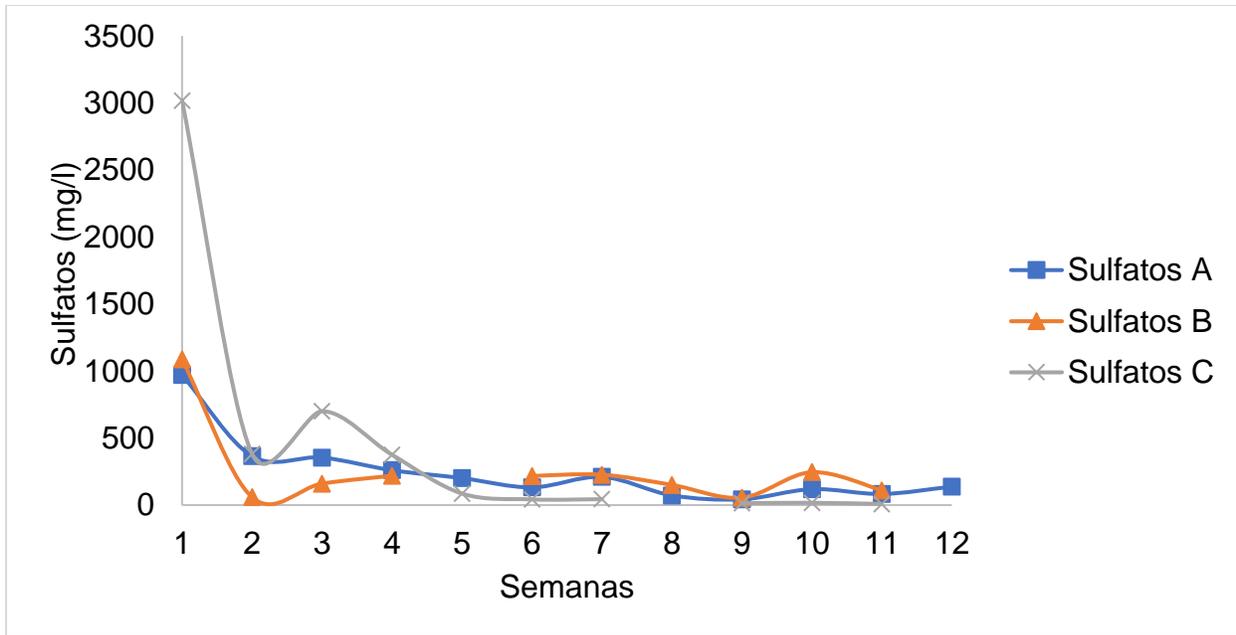


Gráfico 3. Análise comparativa de sulfatos das mineradoras A, B e C.

De acordo com o Gráfico 4, mineradora C apresentou a maior dissolução de Ca durante a semana 1, onde de seguida a mineradora A registou as maiores concentrações de Ca durante a semana 2, entre as semanas 3 e 4, a para o restante do ensaio, as maiores concentrações de Ca devido a dissolução de minérios neutralizantes contendo este elemento foram apresentados pela mineradora B.

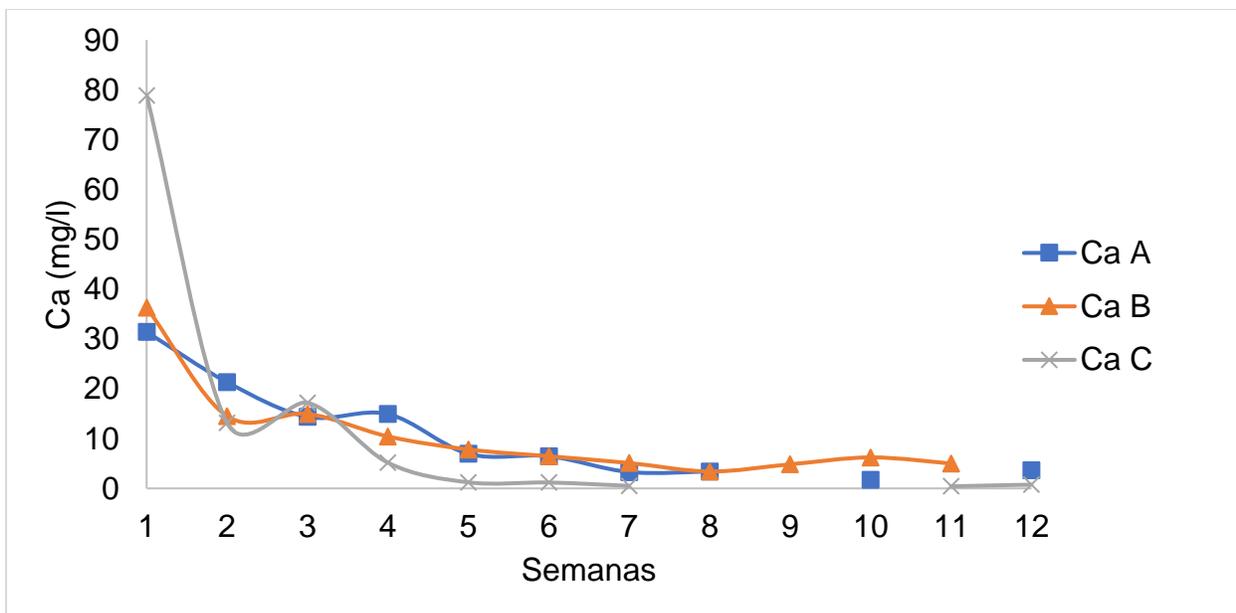


Gráfico 4. Análise comparativa do Cálcio das mineradoras A, B e C.

Conforme ilustra o Gráfico 5, a mineradora A registou maior de dissolução do Mn e apresentou as concentrações superiores até a semana 3, onde a mineradora B apresentou valores de dissolução de Mn ligeiramente superiores à mineradora B até a semana 4; entre as semanas 4 e 8, a mineradora A apresentou as maiores concentrações até o final do ensaio, resultantes da dissolução de minérios contendo o Mn.

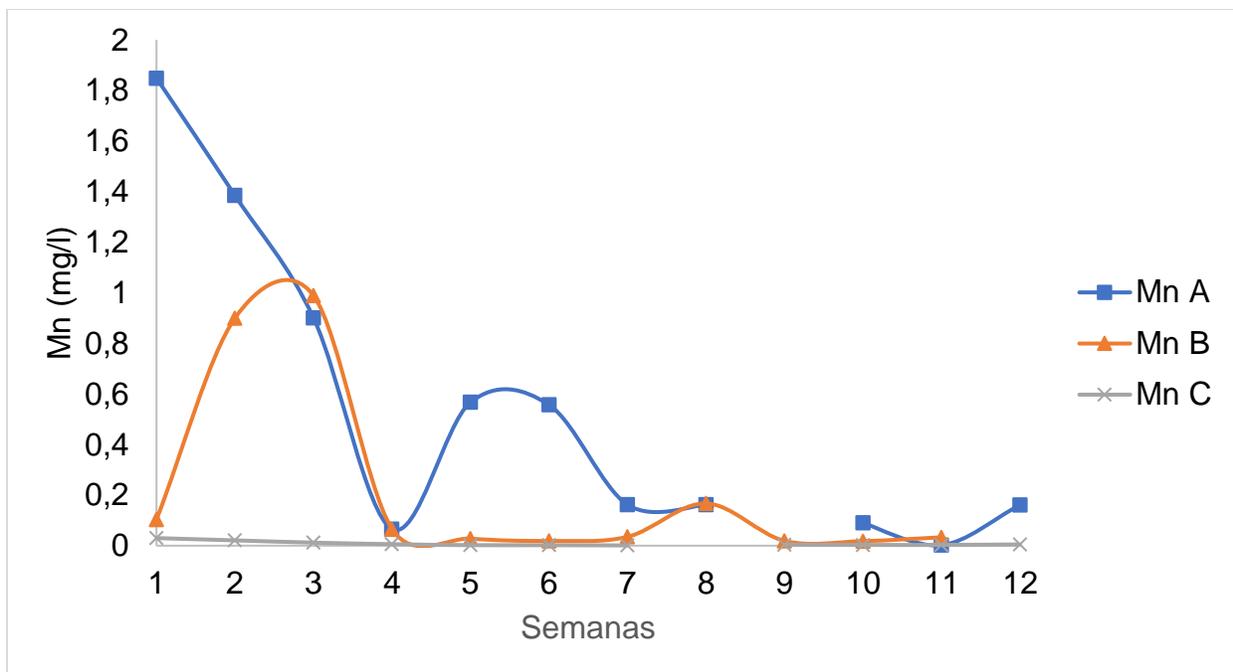


Gráfico 5. Análise comparativa do Manganês das mineradoras A, B e C.

No Gráfico 6, nota-se que a mineradora C apresentou a maior dissolução de Fe, o que culminou com valores superiores de Fe em relação aos de A e B durante a semana 1, e de seguida a mineradora A registou os maiores concentrações até o final da semana 2, onde a mineradora C assumiu novamente a tendência até o final da semana 3, onde a mineradora A e B registaram as maiores concentrações de dissolução até o final da semana 4; durante a semana 5, a mineradora C registou brevemente maiores concentrações, até a mineradora assumir a tendência até o final da 6, alternando brevemente com mineradora A na semana 7, e novamente a mineradora B assumiu a tendência durante a semana 8; durante a semana 9, a mineradora C apresentou valores maiores de Fe, e a mineradora A assumiu a tendência até o final do ensaio.

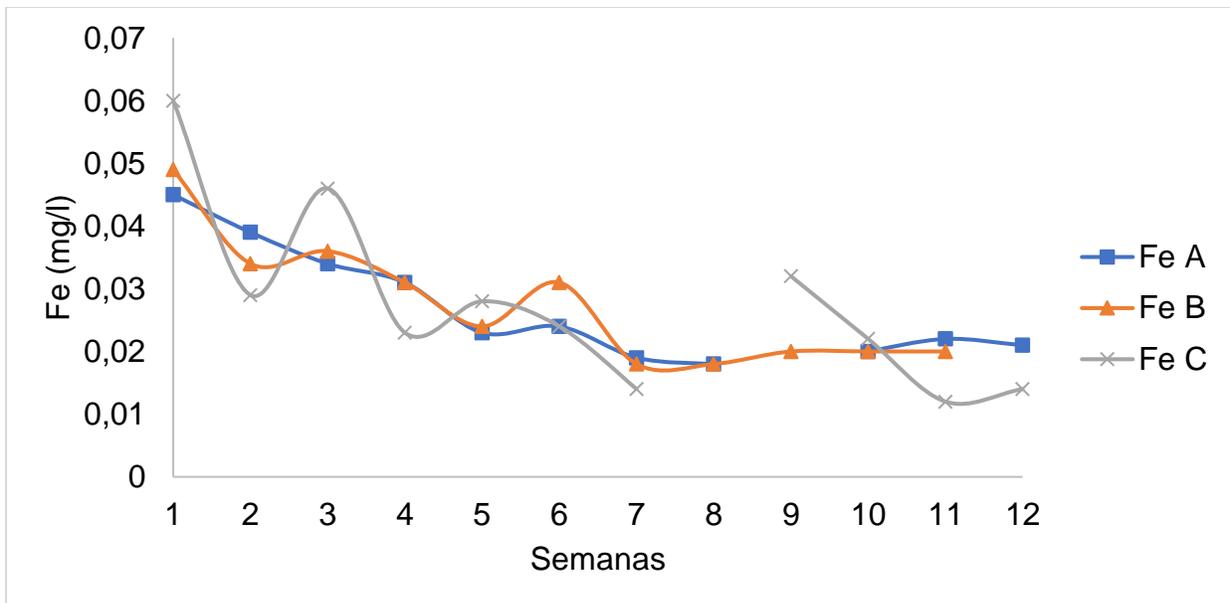


Gráfico 6. Análise comparativa do Ferro nas mineradoras A, B e C.

Segundo o Gráfico 7, mineradora C registou as maiores concentrações de Al durante a semana 1 devido a maior dissolução deste elemento, mas, durante a semana 2, a mineradora A assumiu a tendência, sendo igualada pela mineradora B durante a semana 3, e entre as semanas 4 e 5 voltou a registar maiores concentrações de Al; mas, a partir da semana 6 até o final do ensaio, a mineradora B é que apresentou as maiores concentrações de Al.

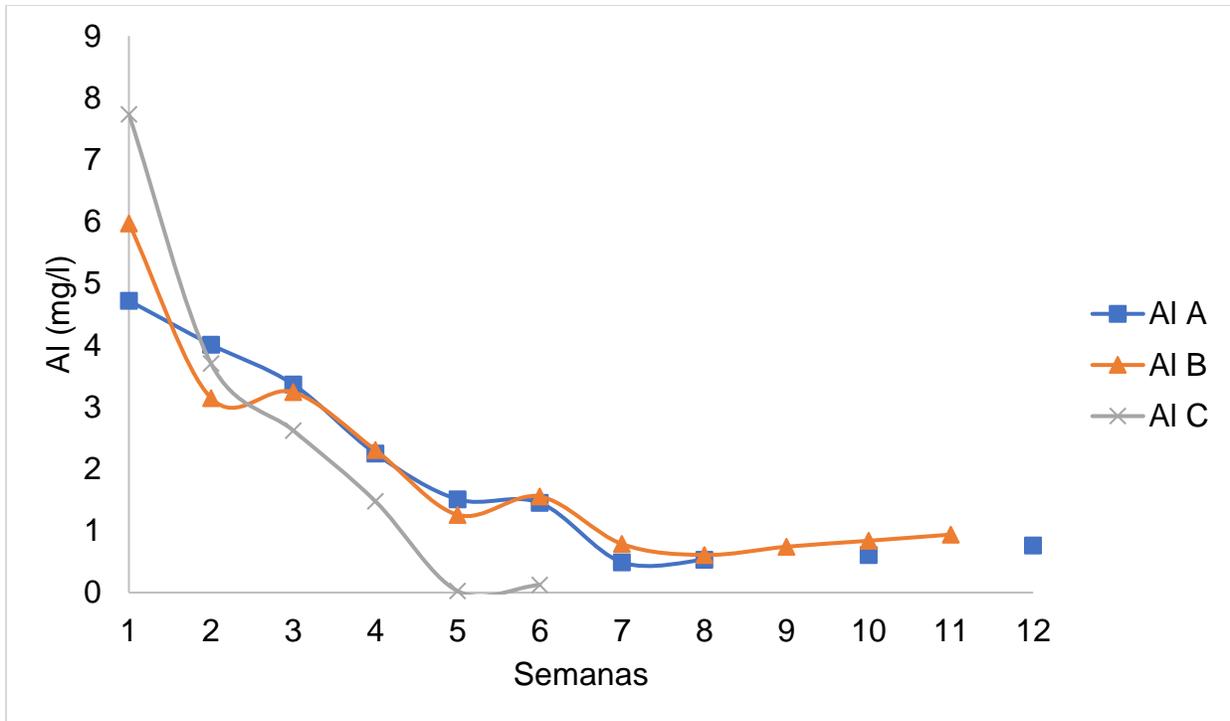


Gráfico 7. Análise comparativa do Alumínio das mineradoras A, B e C.

Conforme o Gráfico 8, a mineradora A registou as maiores concentrações de Al durante as semanas 1 e 2, tendo sido igualada pela mineradora B durante a semana 3, voltou a registar maiores concentrações de Al a partir da semana 4 até o final da semana 6; nas semanas 8 e 9, a mineradora B registou as maiores concentrações de Al, tendo a mineradora A encerrado o ensaio com as maiores concentrações de Al.

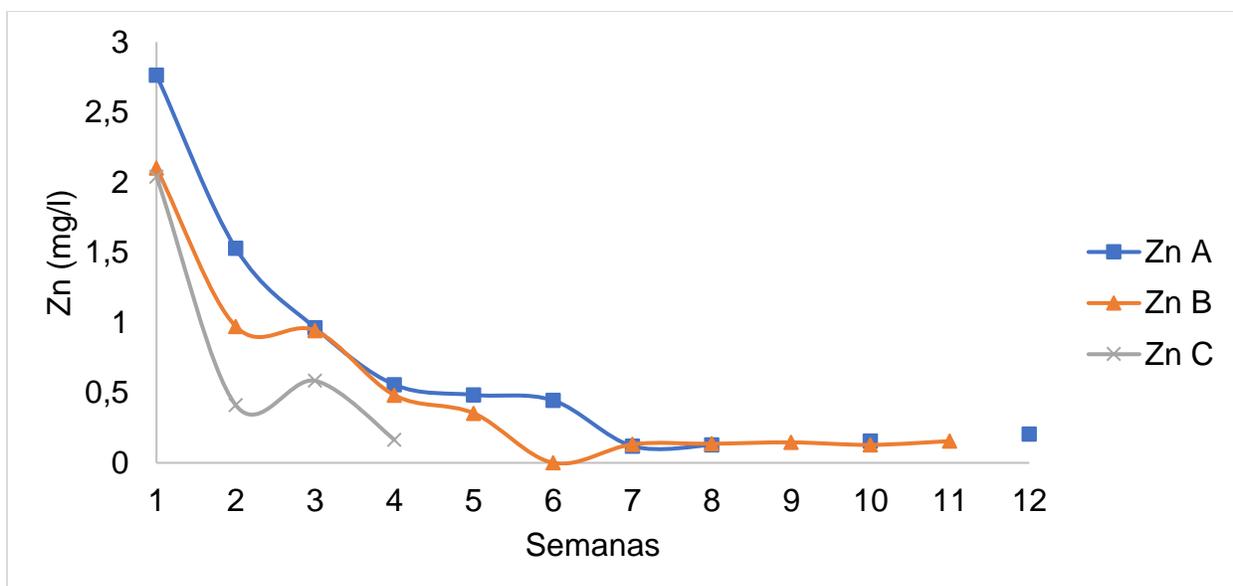


Gráfico 8. Análise comparativa do Zinco nas mineradoras A, B e C.

5.4. Comparação com a legislação nacional e internacional

Em Moçambique, está em vigor o Decreto nº 18/2004 de 02 de Junho, que aprova o Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e de Emissão de Efluentes (revisado e atualizado pelo Decreto nº 67/2010 de 31 de Dezembro), e servirá como base nacional para auferir a conformidade dos resultados obtidos neste estudo. No contexto internacional, serão usados os padrões da EPA e a OMS para efeitos de comparação.

-Tabela 5. Limites estabelecidos pelos padrões nacionais e internacionais.

Parâmetros	Limites estabelecidos pelos padrões nacionais e internacionais		
	Decreto nº 18/2004	EPA 2018	OMS 2017
pH	6 - 9	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
Condutividade elétrica	-	-	400 µS/cm
Sulfatos	-	250 mg/l	250 mg/l

Cálcio	-	-	75 mg/l
Ferro	0.3 mg/l	0.3 mg/l	0.3 mg/l
Manganês	0.1 mg/l	0.05 mg/l	0.4 mg/l
Alumínio	1.5 mg/l	0.2 mg/l	0.9 mg/l
Zinco	0.18 – 5 mg/l	5 mg/l	4 mg/l

De forma gráfica, pode-se realizar a comparação entre os limites dos padrões e os resultados obtidos no decorrer dos estudos. Em linhas horizontais estão identificados estes limites, onde a preta representa o Decreto nº 67/2010, a vermelha representa os limites estabelecidos pela OMS.

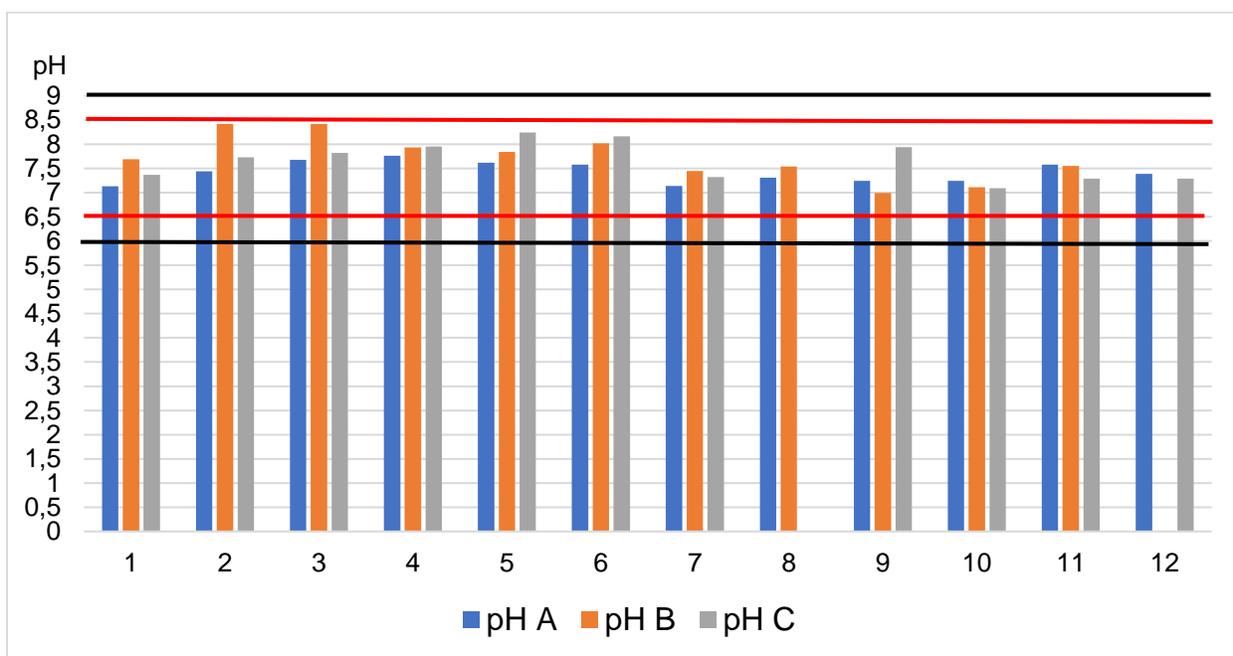


Gráfico 9. Comparação entre os valores de pH e os limites estabelecidos.

Verifica-se conformidade dos valores de pH obtidos durante os ensaios de lixiviação tanto com o padrão nacional, assim como com os padrões internacionais em todas as semanas de análise.

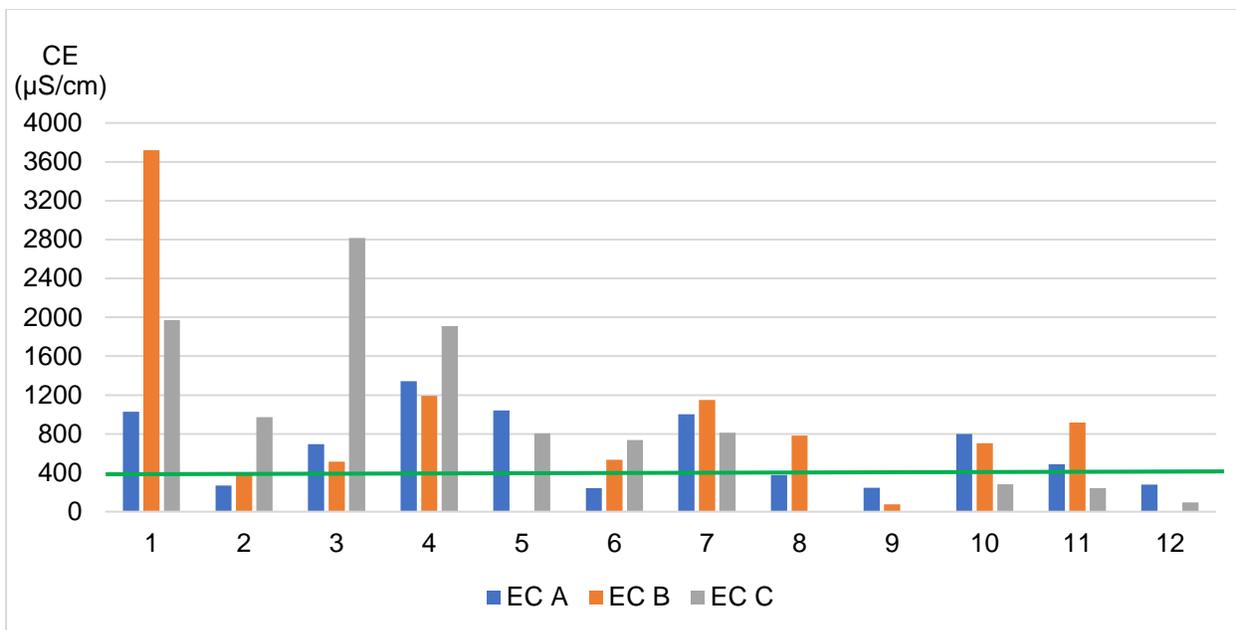


Gráfico 10. Comparação entre os valores de condutividade elétrica e os limites estabelecidos.

Os valores de CE se apresentaram superiores ao limite recomendado (linha verde) pela EPA na maioria das semanas, excetuando as semanas 9 e 12, indicando uma elevada presença de iões nas amostras de lixiviados.

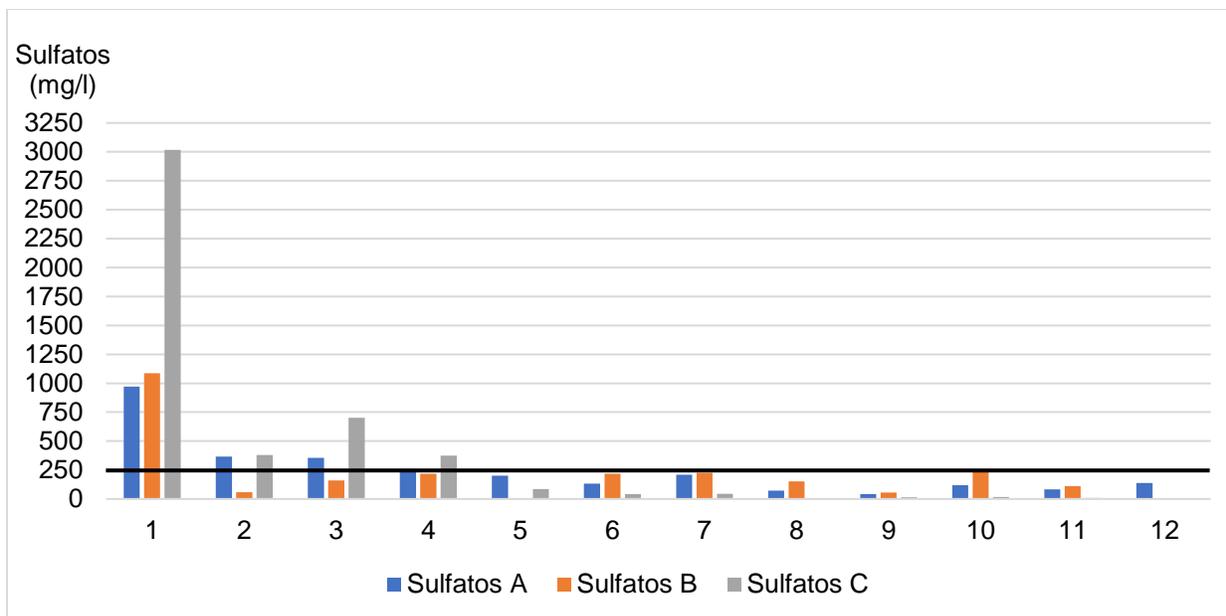


Gráfico 11. Comparação entre os valores de Sulfatos e os limites estabelecidos.

As concentrações de SO_4^{2-} se apresentaram superiores a este limite recomendado nas primeiras semanas do ensaio de lixiviação, tendo reduzido a valores próximos e até mesmo inferiores que este limite, e esta tendência manteve-se até o final do estudo.

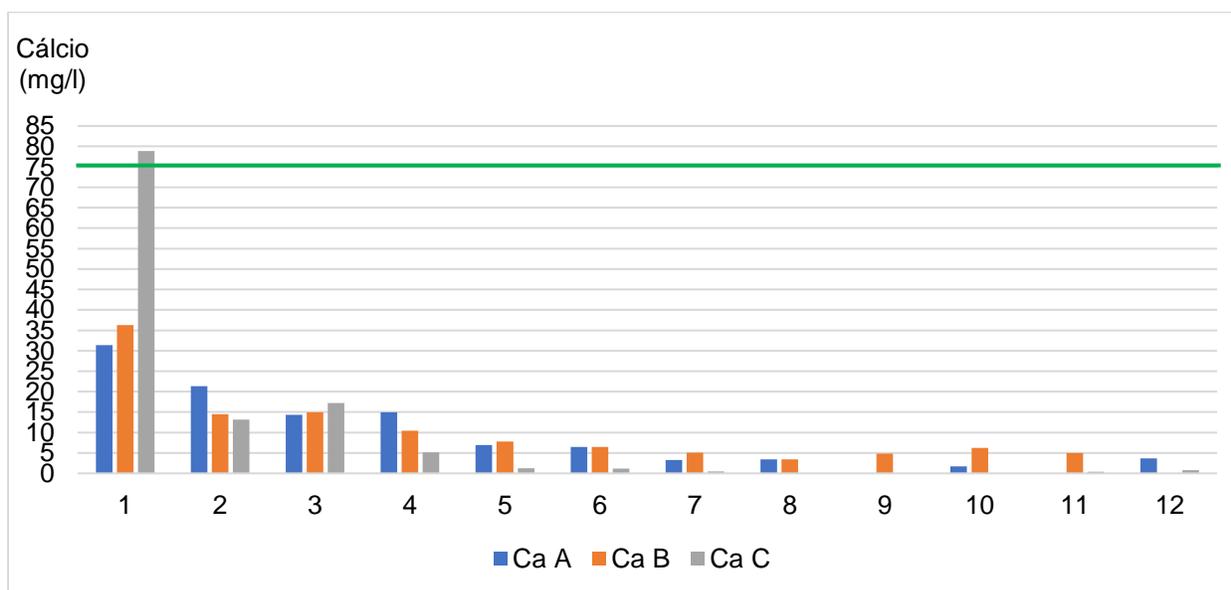


Gráfico 12. Comparação entre os valores de Cálcio e os limites estabelecidos.

Com exceção da concentração de Ca na mineradora C na semana 1, não houve excedência dos limites estabelecidos, neste caso, o recomendado pela EPA.

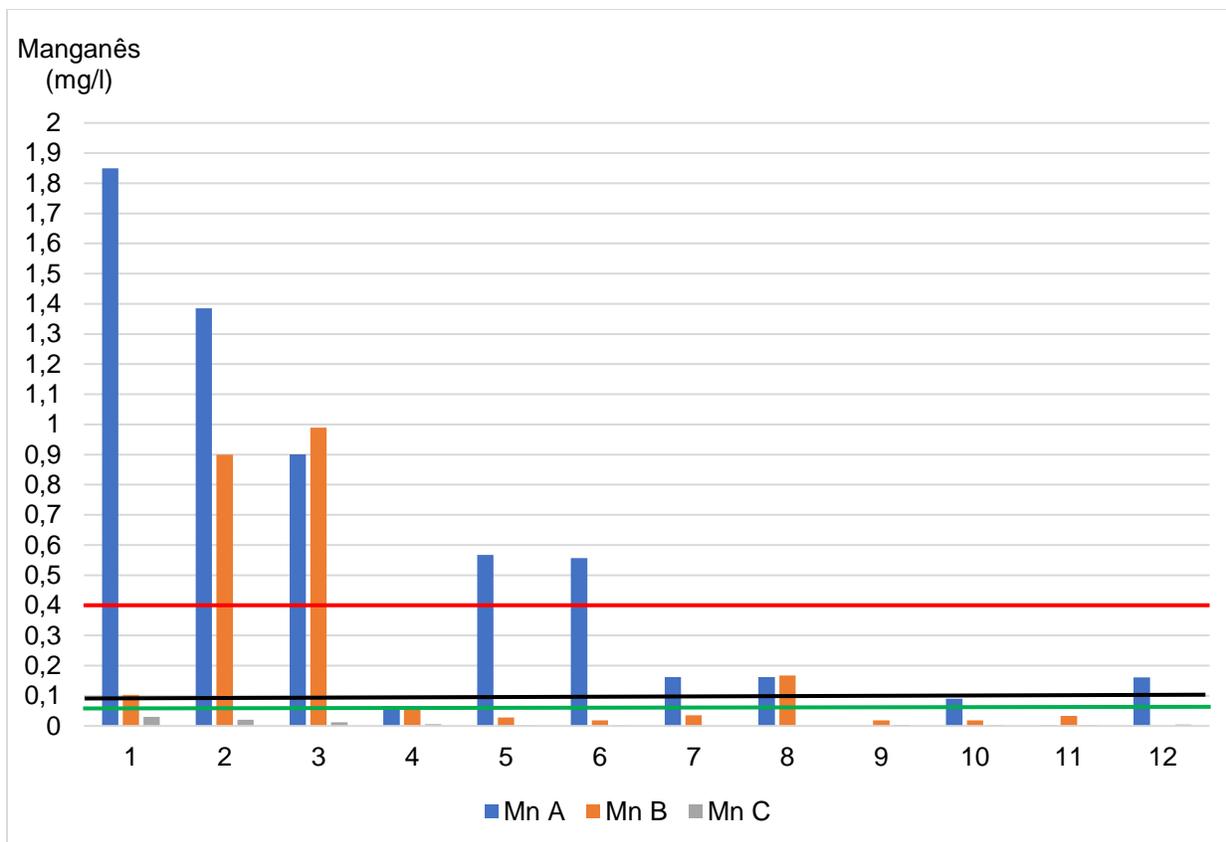


Gráfico 13. Comparação entre os valores de Manganês e os limites estabelecidos.

As concentrações de Mn em grande parte superaram os limites estabelecidos pela EPA (linha verde) e pelo Decreto nº 67/2010 (linha preta) durante o estudo. Verificou-se o mesmo para o limite estabelecido pela OMS (linha vermelha) durante as primeiras 6 semanas, mas depois deste período, os valores de Mn não excederam este limite.

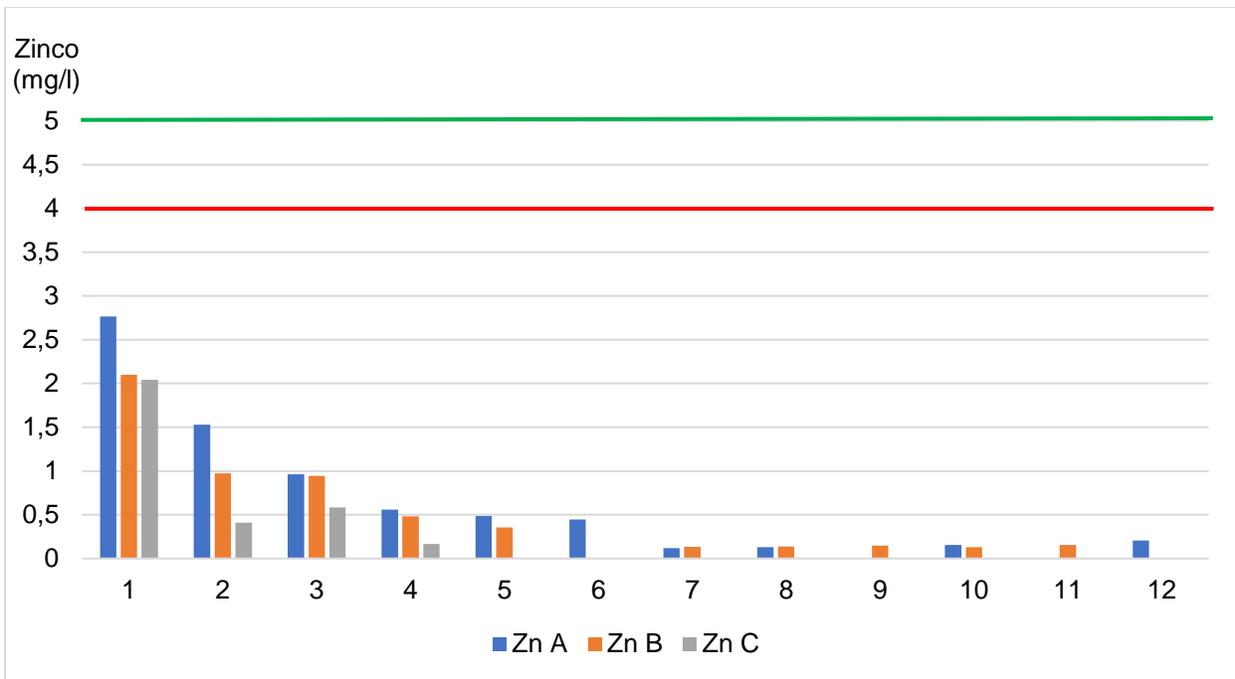


Gráfico 14. Comparação entre os valores de Zinco e os limites estabelecidos.

Os valores de Zn se apresentaram inferiores tanto para os limites da EPA (verde), assim como da OMS (vermelha).

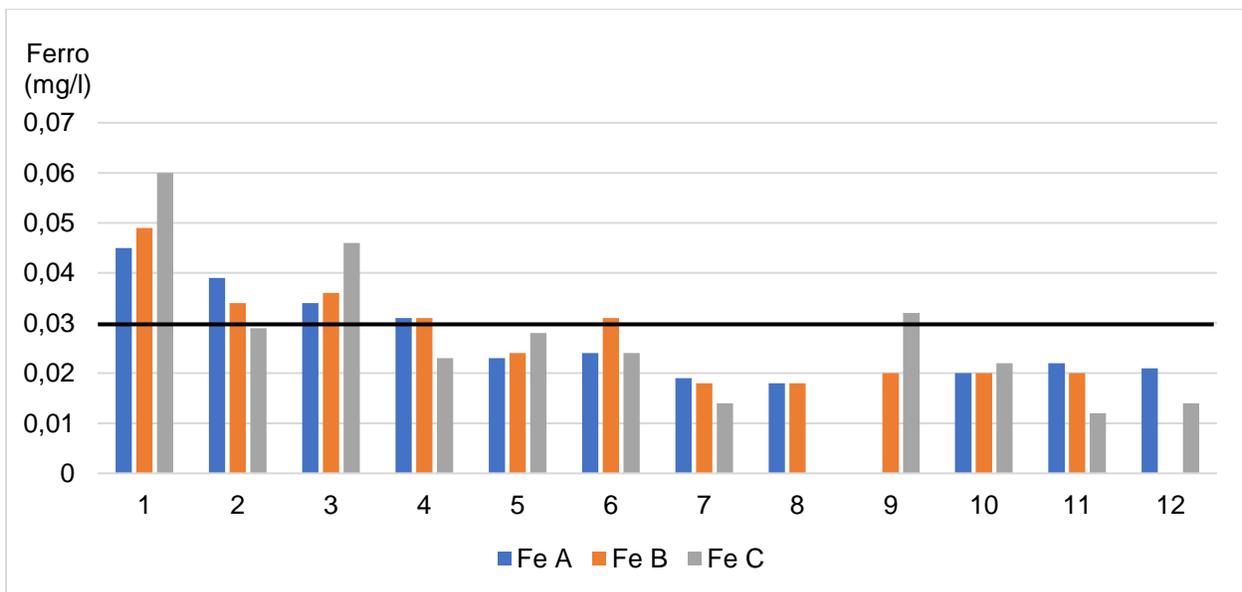


Gráfico 15. Comparação entre os valores de Ferro e os limites estabelecidos.

As concentrações de Fe se apresentaram superiores ao limite estabelecido de 0.03 mg/l durante as primeiras 3 semanas do estudo, tendo registado de seguida valores abaixo deste limite até o final do estudo.

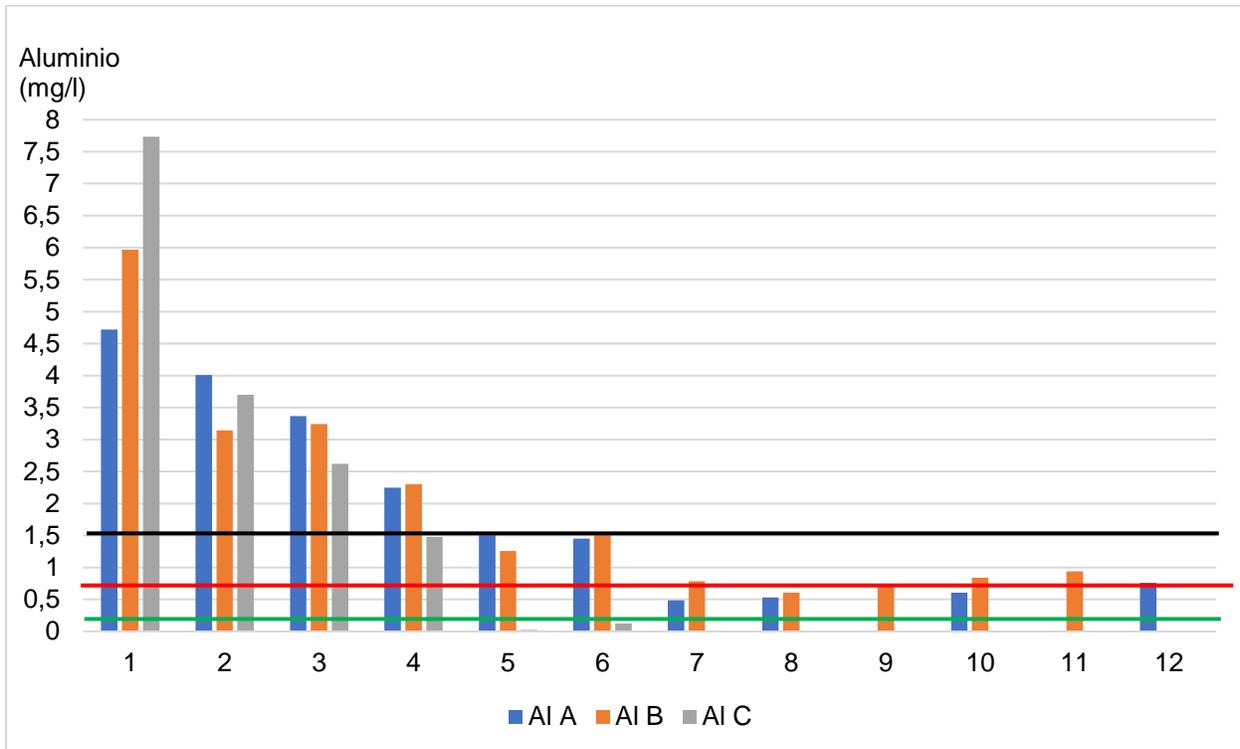


Gráfico 16. Comparação entre os valores de Alumínio e os limites estabelecidos.

As concentrações de Al excederam durante todo o estudo, o limite estabelecido pela EPA (verde). Verificou-se a mesma tendência durante as primeiras 6 semanas em relação ao limite estabelecido pela OMS (vermelha), e esteve abaixo deste limite até o final do estudo. Em relação ao limite estabelecido pela legislação nacional, apenas nas 4 semanas houve excedência deste limite, e até o final do período em estudo, os valores estiveram dentro deste limite.

5.5. Determinação das quantidades anuais de lixiviação dos parâmetros estudados

Com base nas concentrações cumulativas dos parâmetros relevantes (Ca, Fe, Mn, Al, Zn e SO_4^{2-}) para este estudo, e tendo o valor da precipitação anual (644 mm/ano) do distrito de Moatize e também as áreas das pilhas e barragens de rejeitos, é possível estimar as quantidades em peso que são lixiviadas anualmente para os solos e águas subterrâneas próximas às áreas de mineração. A tabela a seguir apresenta as áreas estimadas destas barragens:

Tabela 6. Áreas das barragens e pilhas de rejeitos.

Mineradoras	Áreas das pilhas e barragens de rejeitos
A	391 152,98 m ²
B	2 100 000 m ²
C	17 313,97 m ²

As quantidades lixiviadas anualmente destes parâmetros é determinada através do produto entre as concentrações cumulativas, o valor de precipitação anual e as áreas das barragens e pilhas de rejeitos. Assim sendo, as quantidades lixiviadas são apresentadas na tabela que segue:

Tabela 7. Quantidades anuais lixiviadas pelas mineradoras.

Mineradoras	Parâmetros relevantes					
	SO_4^{2-} (kg/ano)	Ca (kg/ano)	Fe (kg/ano)	Zn (kg/ano)	Mn (kg/ano)	Al (kg/ano)
A	742 929	27 060	75	1 850	1 486	4 960
B	3 409 644	155 549	407	7 503	3 215	28 913
C	52 267	1 321	3	36	1	174

A mineradora B pela sua área de lixiviação apresentou as maiores quantidades anuais de lixiviados, com destaque para os 3 409 644 kg/ano de SO_4^{2-} lixiviados contra os 742 929 kg/ano de SO_4^{2-} da mineradora A e os 52 267 kg/ano de SO_4^{2-} da mineradora C, os 155 549 kg/ano de Ca contra os 27 060 kg/ano de Ca da mineradora A e os 1 321 kg/ano da mineradora C, e 28 913 kg/ano de Al contra os 4 960 kg/ano da mineradora A e os 174 kg/ano da mineradora C. Também se verificou a mesma tendência para o Fe, onde a mineradora B registou 407 kg/ano contra os 75 kg/ano da mineradora A e os 3 kg/ano da mineradora C; para o Zn, a mineradora B apresentou 7 503 kg/ano contra os 1 850 kg/ano da mineradora A e os 36 kg/ano da mineradora C; para o Mn, a mineradora B apresentou 3 215 kg/ano contra os 1 486 kg/ano da mineradora C e 1 kg/ano da mineradora C.

6. Conclusões e recomendações

6.1. Conclusões

Para avaliar a possibilidade de geração de drenagem ácida nas minas de carvão no distrito de Moatize, foram realizados ensaios de lixiviação de amostras de material estéril para observar o comportamento dos parâmetros relevantes para este fenómeno. Também foi realizada uma análise elementar destas amostras para que se conhecessem os elementos presentes e as suas percentagens.

Foram analisados os lixiviados produzidos durante estes ensaios, onde obtiveram-se valores de pH entre 6.990 e 8.420, valores de CE entre 77.1 e 3720 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores de SO_4^{2-} entre 8.196 e 3008.190 mg/l, Ca entre 0.421 e 78.877 mg/l, Fe entre 0.012 e 0.060 mg/l, Zn entre 0.119 e 2.764 mg/l, Mn entre 0.001 e 1.849 mg/l e o Al entre 0.024 e 7.733 mg/l. Os valores obtidos foram comparados à padrões legais como o Decreto nº 67/2010 de 31 de Dezembro que apresenta os padrões de qualidade ambiental, da EPA e OMS para água de consumo humano, e verificaram-se valores fora destes limites estabelecidos nas semanas iniciais aos ensaios de lixiviação, mas no final estes resultados estiveram dentro dos mesmos limites.

De acordo com os resultados obtidos, pode se concluir que é improvável a ocorrência de drenagem ácida nestas minas de carvão, devido a constante dissolução de minerais que neutralizam este processo, que se manifesta pela tendência crescente do pH nestas amostras de estéril analisadas.

No entanto, as áreas de barragens e pilhas de rejeitos contribuem com grandes quantidades de SO_4^{2-} e Al que podem alterar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, o que pode afetar também a qualidade de vida da população circunvizinha.

6.2. Recomendações

Recomenda-se:

- A introdução de programas de monitorização com o objetivo de avaliar a possibilidade de geração de drenagem ácida nestas minas;
- A realização de estudos de qualidade de água nas áreas próximas às mineradoras;
- O uso de material impermeável no leito destas áreas de rejeitos, para evitar o processo de lixiviação, que pode alterar qualidade de água subterrânea e superficial;
- A realização de análises não cobertas por este estudo, tais como a análise mineralógica e os teores de Enxofre, que podem trazer mais precisão quando se pretende determinar a possibilidade de geração de drenagem ácida.

7. Bibliografia

Abbassi, R., Khan, F. & K, H., 2009. Prediction of minerals producing acid mine drainage using a computer-assisted thermodynamic chemical equilibrium model. Em: s.l.:s.n., pp. *MIne Water Environ* 28:74-78.

Acero, P., Cama, J. & Ayora, C., 2007. Rate law for galena dissolution in acidic environment. Em: s.l.:s.n., pp. *Chem Geol* 245:219-229.

Asta, M. et al., 2010. Arsenopyrite dissolution rates in oxygen bearing solutions. Em: s.l.:s.n., pp. *Chem Geol* 273:219-229.

Becker, M., 2009. *The mineralogy and crystallography of pyrrhotite from selected nickel and PGE ore deposits and its effect on flotation performance*, Pretoria: Unpublished DPhil thesis, University of Pretoria.

Belzile, N., Chen, Y., Cai, M. & Li, Y., 2004. A review on pyrrhotite oxidation. pp. *J Geochem Explor* 84:65-76.

Bowell, R., Rees, S. & Parshley, J., 2000. Geochemical predictions of metal leaching and acid generation: geologic controls and baseline assessment. Em: s.l.:s.n., pp. 799-823.

Cook, N. et al., 2009. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICP-MS study. Em: s.l.:s.n., pp. *Geochim Cosmochim Acta* 73:4761-4791.

Corkhill, C. & Vaughan, D., 2009. Arsenopyrite oxidation - a review. Em: s.l.:s.n., pp. *Appl Geochem* 24:2342-2361.

de Abreu, A. T., 2012. *Ensaio Cinéticos para Previsão e Prevenção de Drenagem Ácida: Estudo de Caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Caldas, MG*. Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto.

De Mello, J., Duarte, H. & Ladeira, A. C., 2014. *Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina*. Belo Horizonte: s.n.

Dold, B., 2005. *Basic concepts of environmental geochemistry of sulfide mine-waste*. Lima: XXIV Curso Latinoamericano de Metalurgia UNESCO-SEG.

- EPA, 2011. *Method 1627: Kinetic Test Method for the Prediction of Mine Drainage Quality*. Washington DC: United States Environmental Protection Agency.
- Evangelou, V. & Zhang, Y., 1995. A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. *Crit Rev Env Technol* 25, pp. 141-199.
- Jambor, J., 2003. *Mine-waste mineralogy and mineralogical perspectives of acid-base accounting*. s.l.:Mineralogical Association of Canada.
- Joaquim, D., 2019. *Qualidade da água em represas na Bacia do Zambeze*, Maputo: s.n.
- Johnson, M. R. et al., 1996. *Stratigraphy of the Karoo Supergroup in southern Africa: an overview*. s.l.:Journal of African Earth Sciences.
- Keith, C. & Vaughan, D., 2000. Mechanisms and rates of sulfide oxidation in relation to the problems of acid rock (mine) drainage. Em: s.l.:s.n., pp. 117-139.
- Kimball, B., Rimstidt, J. & Brantley, S., 2010. Chalcopyrite dissolution rate laws. Em: s.l.:s.n., pp. Appl Geochem 25:972-983.
- Lapakko, K., 2002. *Metal mine rock and waste characterization tools: an overview.*, s.l.: Metal mining and Sustainable development website#67.
- Leonard, J., 1991. *Coal Preparation*. Littleton(Colorado): Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Li, J. et al., 2010. Chalcopyrite leaching: the rate controlling factors. Em: s.l.:s.n., pp. Geochim Cosmochim Acta 74:2881-2893.
- Lottermoser, B., 2010. *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*. 3rd ed. Berlin: Springer.
- Moncur, M., Jambor, J. & Blowes, D., 2009. Mine drainage from the weathering of sulfide minerals and magnetite. Em: s.l.:s.n., pp. Appl Geochem 24:2362-2373.

Nesbitt, H. & Jambor, J., 1998. Role of mafic minerals in neutralizing ARD, demonstrated using a chemical weathering methodology. Em: s.l.:Mineralogical Association of Canada 27, pp. 403-421.

Nicholson, R. & Scharer, J., 1994. *Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics*. Washington DC: American Chemical Society.

Paktunc, A., 1999. Mineralogical constraints on the determination of neutralising potential and prediction of acid mine drainage. Em: s.l.:s.n., pp. Environ Geol 57:642-644.

Parbhakar-Fox, A. & Lottermoser, B., 2015. A critical review of acid rock drainage prediction processes and practices. *Min Eng* 82, pp. 107-124.

Parker, G., 1999. A critical review of acid generation resulting from sulfide oxidation: processes, treatment and control. Em: s.l.:s.n., pp. Austin Miner Energy Environ Found Melbourne 11:1-182.

Plante, B., Bussiere, B. & Benzaazoua, M., 2012. Static tests response on 5 canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. pp. J Geochem Explor 144:57-62.

Plumlee, 1999. The environmental geology of mineral deposits. Em: s.l.:s.n., pp. Rev Econ Geol 6A:71-116.

Pondja Jr, E. A., Persson, K. & Matsinhe, N. P., 2017. *Assessment of coal mine water in Moatize by static and leaching tests*, s.l.: s.n.

Riazi, M. R. & Gupta, R., 2015. *Coal Production and processing technology*. Florida: CRC Press, Taylor & Francis.

Rimstidt, J. & Vaughan, D., 2003. Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochim Cosmochim Acta* 67, pp. 873-880.

Sinoia, N. J., 2010. *ATIVIDADE MINEIRA EM MOÇAMBIQUE, CASO ESPECÍFICO DA PROVINCIA DE TETE: "Sua contribuição para a economia local no período entre 2002-2008*, Maputo: s.n.

Stanton, M., Gemery-Hill, P., Shanks, W. & Taylor, C., 2008. Removal of zinc and trace metal release from dissolving sphalerite at pH 2.0 to 4.0. Em: s.l.:s.n., pp. *Appl Geochem* 23:136-147.

Stromberg, B. & Banwart, S., 1999. Experimental study of acidity-consuming processes in mining waste rock: some influences of mineralogy and particle size. *Appl Geochem* 14, pp. 1-16.

Thomas, J., Skinner, W. & Smart, R., 2003. A comparison of dissolution behaviour of troilite with other iron (II) sulfides: implications of structure. pp. *Geochim Cosmochim Acta* 67:831-843.

Vasconcelos, L., 2000. *Overview of the Moatize coal basin geology, Tete Province, Republic of Mozambique*. s.l.:Chron. Rech. Minière.

Weiler, J., da Silva, A. C., Fernandes, E. Z. & Schneider, I. A. H., 2020. Using static, kinetic and metal mobility procedures to evaluate possibilities of coal waste land disposal at Moatize Mine, Mozambique. Em: Ouro Preto: s.n., pp. 587-596.

Weisener, C., Smart, R. & Gerson, A., 2003. Kinetics and mechanisms of the leaching of low Fe-Sphalerite. Em: s.l.:s.n., pp. *Geochim Cosmochim Acta* 67:823-830.

Yunmei, Y. et al., 2004. A kinetic study of the oxidation of arsenopyrite in acidic solutions: implications for the environment. Em: s.l.:s.n., pp. *Appl Geochem* 19:435-444.