



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**



**BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIO CALCOPIRÍTICO DE BAIXO TEOR COM
MICROORGANISMOS TÉRMOFILOS EXTREMOS**

DISCENTE: Denilson Júnior Castorino
ORIENTADOR: Prof. Dr. Versiane Albis Leão
COORIENTADOR: Me. Flávio Luiz Martins

OURO PRETO

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIO CALCOPIRÍTICO DE BAIXO TEOR
COM MICRORGANISMOS TÉRMOFILOS EXTREMOS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

DISCENTE: Denilson Júnior Castorino
ORIENTADOR: Prof. Dr. Versiane Albis Leão
COORIENTADOR: Me. Flávio Luiz Martins

OURO PRETO

2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Denilson Júnior Castorino

Biolixiviação de minério calcopirítico de baixo teor com microrganismos termófilos extremos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 05 de novembro de 2022

Membros da banca

Dr. Versiane Albis Leão - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Flávio Luiz Martins - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Ma. Liliane Coelho de Carvalho - (Instituto Federal do Maranhão - Campus Itapecuru)
Me. Matheus Mello Pereira - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Versiane Albis Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Versiane Albis Leao**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/12/2022, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0436800** e o código CRC **B2CB50AE**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por minha vida e por permitir que meus objetivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus pais Denilson Arlindo e Vânia Lúcia, e minha irmã Samara Kelly por todo amor, incentivo e apoio incondicional.

À minha namorada Lais e minha filha Maria Laura, por toda paciência, incentivo e carinho durante esta jornada.

Ao Professor Doutor Versiane Albis Leão, por todos os ensinamentos e por contribuir significativamente para meu crescimento profissional.

Ao Mestre Flávio Luiz Martins por todo apoio, incentivo e ensinamentos, contribuindo significativamente para meu crescimento profissional.

A todos do laboratório de Bio&Hidrometalurgia e professores que estiveram presentes durante minha jornada na UFOP, sendo que estes, guiaram o meu aprendizado.

À Universidade Federal de Ouro Preto e todos os seus colaboradores.

E a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta graduação, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

A calcopirita, por ser o sulfeto mineral de cobre mais abundante da crosta terrestre, tem despertado o interesse de estudos de rotas cada vez mais sustentáveis e econômicas para o seu processamento. Porém, por se tratar de um mineral refratário, sua dissolução via hidrometalurgia apresenta cinética lenta e baixa recuperação de cobre, principalmente devido a um fenômeno conhecido como passivação. A extração de metais por meio de microrganismos, compreendido como biolixiviação, é uma alternativa econômica aos processos químicos convencionais e pirometalúrgicos. Em especial para a biolixiviação da calcopirita, a utilização de arqueias termófilas extremas, que crescem em temperaturas acima de 60°C, é uma característica importante, pois esses microrganismos podem minimizar os efeitos da passivação. Além disso, o emprego de íons cloreto ocasionam aumentos na velocidade de lixiviação e na recuperação do cobre da calcopirita. Neste trabalho, portanto, foi avaliado e discutido a adição de 1,0 mol L⁻¹ de cloreto de sódio em um sistema de biolixiviação de um minério calcopirítico de baixo teor (1,79% Cu), em diferentes granulometrias (menor que 2,5mm e entre 2,5mm e 5mm), com microrganismos termófilos extremos a 70°C, pH 1,5 e 2,5% de densidade de polpa. Os resultados mostraram que quanto menor a granulometria, maior é a porcentagem de extração do metal, sendo que 91,30% do cobre foi extraído na granulometria menor que 2,5mm, na presença de microrganismos e cloreto, após 14 dias de experimento. Para a granulometria entre 2,5-5mm nas mesmas condições experimentais, a extração de cobre foi de apenas 30%. Os experimentos de controle químico sem cloreto extraíram apenas 45,90% e 9,63% nas granulometrias menor que 2,5mm e entre 2,5-5mm, respectivamente. Portanto, a adição de cloreto nos sistemas de biolixiviação possibilitou um aumento na recuperação do cobre no minério calcopirítico estudado, principalmente na menor granulometria avaliada (menor que 2,5mm).

Palavras-chave: Calcopirita; Passivação; Cobre; Cloreto; Hidrometalurgia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1: Gráfico do potencial hidrogeniônico (pH) para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda: G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5 mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais: pH 1,50; 70°C; 2,5% (m/v)..... 20

Figura 6.2: Gráfico do potencial de oxirredução (Eh) para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda: G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5 mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais: pH 1,50; 70°C; 2,5% (m/v)..... 21

Figura 6.3: Dissolução ferro total (g/L) com o tempo para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda -G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais; pH 1,50; 70°C; 2,5% (m/v)..... 22

Figura 6.4: Extração de cobre em função do tempo para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda - G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais: pH 1,50; 70°C; 2,5% (m/v). 24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Extração de cobre (%) para os experimentos abióticos e bióticos nas diferentes granulometrias ao final dos 14 dias de experimento.	24
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	11
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1	Cobre.....	12
4.2	Bióliviação.....	12
4.2.1	Microrganismos utilizados na bióliviação	13
4.2.2	Técnicas de Bióliviação	14
4.3	Bióliviação da calcopirita.....	15
4.3.1	Passivação da Calcopirita.....	16
5	MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1	Amostra inicial do minério.....	18
5.2	Microrganismos	18
5.3	Experimentos de bióliviação em <i>shaker</i>	19
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
6.1	Experimentos de bióliviação com minério de cobre.....	20
6.1.1	Comportamento do pH.....	20
6.1.2	Potencial de oxirredução (Eh)	21
6.1.3	Concentração de ferro total	22
6.1.4	Extração de cobre	23
7	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1 INTRODUÇÃO

A grande maioria dos depósitos de cobre existentes na crosta terrestre se encontra na forma de calcopirita (CuFeS_2), definindo como um mineral sulfetado com aproximadamente 35% de cobre associado ao ferro. Além disso, em torno de 80% da produção primária de cobre se realiza a partir de minérios sulfetados de baixa qualidade, com teor de cobre na faixa de 0,5% - 2,0%. Devido ao baixo teor do metal, o minério é submetido a britagem, moagem e flotação para a produção de um concentrado de cobre, com teores na faixa de 30%. Esse concentrado é alimentado em um processo de fusão e refinado posteriormente, em um processo denominado *smelting*, sendo uma rota essencialmente pirometalúrgica. Os outros 20% da produção primária do cobre ocorre por meio da extração por processos hidrometalúrgicos de minerais oxidados de baixo teor (YAMANE, ESPINOSA e TENÓRIO, 2011; DU PLESSIS *et al.*, 2007). No entanto, pode-se dizer que o processo pirometalúrgico é aplicável com eficácia em situações que se possuem altos teores de cobre, visto que é um processo de custos elevados e de grandes gastos energéticos (GARCIA; URENHA, 2001).

Neste sentido, a hidrometalurgia é um processo em meio aquoso para a extração de metais, e no caso do cobre é constituído por três (3) etapas: (i) lixiviação, (ii) separação seletiva; por solvente (*Solvent extraction-SX*) e (iii) eletrodeposição (*Eletrowinning-EW*) (WALLIS e CHLUMSY, 1999; CIMINELLI, 2007).

A biolixiviação é um processo de solubilização de componentes de interesse presentes em uma amostra mineral pela ação de microrganismos (LIMA, 2011). Este processo apresenta vantagens, tais como: baixo investimento de capital, baixo custo operacional, simplicidade das instalações utilizadas, baixa demanda de energia em comparação aos processos pirometalúrgicos, além de economia dos insumos em comparação aos processos hidrometalúrgicos convencionais, visto que, os próprios microrganismos podem produzir tais insumos a partir dos constituintes do minério (OLIVEIRA *et al.*, 2010). A biolixiviação, portanto, pode ser vista como uma prática ambientalmente amigável em relação aos processos pirometalúrgicos (SCRICHANDAN *et al.*, 2020).

A biolixiviação da calcopirita tem sido estudada extensivamente, porém devido à cinética lenta e baixa extração do cobre ainda não foi aplicada em escala industrial. Pesquisadores tem sugerido alternativas para aumentar a recuperação do cobre nos sistemas, sendo uma delas a utilização de cloreto de sódio (CARNEIRO; LEÃO, 2007; MARTINS, 2015; MARTINS; PATTO; LEÃO, 2019). Segundo Carneiro e Leão (2007), o cloreto de sódio (NaCl), quando presente nos ensaios de lixiviação de um concentrado calcopirítico com soluções de cloreto férrico, acelerou a difusão de reagentes, o que favoreceu o processo de dissolução da calcopirita. A adição de íons cloreto, no entanto, pode prejudicar a atividade microbiana, por ser tóxica para os microrganismos aplicados no processo de biolixiviação (MELO; GARCIA JR.; BELIVAQUA, 2011). Portanto, o presente trabalho visa estudar a biolixiviação de um minério de cobre de baixo teor, em diferentes granulometrias, utilizando microrganismos termófilos extremos na presença de cloreto de sódio.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar a biolixiviação de um minério calcopirítico de baixo teor com microrganismos termófilos extremos na presença de cloreto de sódio.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Realizar a revisão da literatura sobre biolixiviação da calcopirita;
- Conduzir ensaios de biolixiviação com o minério calcopirítico de baixo teor, em diferentes granulometrias, na presença e ausência de $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ de cloreto de sódio.

3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O cobre tem um papel importante na nova economia verde, sendo considerado o “novo petróleo”. Devido a isso, a expectativa é de que sua procura possa aumentar em até cinco vezes e levar a escassez do metal em meados da década de 2020. Isso tudo devido à versatilidade do metal com propriedades de condução de calor e de energia, que superam as de qualquer outro metal comercial. É maleável, reciclável, resistente à corrosão e altas temperaturas, sendo empregado na transmissão e geração de energia, e em praticamente todos os equipamentos eletrônicos. É ainda um material fundamental nas estações de recarga e nos veículos elétricos (PORTAL DA MINERAÇÃO, 2021).

Sendo a calcopirita o mineral de cobre mais abundante que existe, e considerando a rota hidrometalúrgica como alternativa ao processo pirometalúrgico, a extração do cobre pelo processo de biolixiviação deste sulfeto ainda apresenta gargalos que precisam ser superados para a aplicação em grande escala, como a cinética lenta e baixa recuperação de cobre nestes sistemas. Assim, várias abordagens têm sido sugeridas e uma delas, a utilização de cloreto, tem apresentado resultados satisfatórios de extração de cobre, porém com limitações quando aplicado na presença de microrganismos de biolixiviação (CARNEIRO e LEÃO, 2007; MARTINS *et al.*, 2019). Portanto, mesmo que os projetos industriais possuam o interesse de produzir concentrados sulfetados para venda, a biolixiviação pode ser aplicada a minérios marginais e rejeitos de forma direta, no caso de minérios calcopiríticos, precisa-se superar os problemas causados pela sua passivação (MARTINS,2015). Neste trabalho portanto, será abordado o estudo de diferentes granulometrias e aplicação de cloreto de sódio para aumentar a extração de cobre de um minério calcopirítico de baixo teor utilizando microrganismos termófilos extremos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica possui o objetivo de enfatizar alguns conceitos que se relacionam diretamente com o processo de biolixiviação da calcopirita, tais como: biolixiviação, passivação da calcopirita e características dos microrganismos empregados no processo. Além disso, também aborda os aspectos gerais das técnicas de biolixiviação por meio dos seus princípios e fundamentos.

4.1 Cobre

O cobre é um dos metais mais antigos e de maior utilização pela civilização mundial. A posse do metal, para os povos antigos, era sinônimo de riqueza e poder. Atualmente continua a ter um grande papel na sociedade, pois às suas características permitem amplas aplicações no desenvolvimento tecnológico industrial. O metal cobre é caracterizado por ser ótimo condutor de calor e eletricidade, dúctil e maleável e que facilmente forma ligas com outros metais (OLIVEIRA, 2013).

O cobre é o segundo metal não ferroso mais utilizado, tendo uso menor apenas do que o alumínio. Apresenta-se na crosta terrestre, na maioria das vezes, na forma de sulfetos, em especial, a calcopirita (BRAGA *et al.*, 2011). A extração do cobre pode ser realizada a partir de rotas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas e a escolha correta do processo, é feita em função do teor de cobre presente no minério. Nota-se que o processo de extração por rota pirometalúrgica é o método mais tradicional utilizado no mundo, sendo aplicado principalmente para minérios de alto teor (OLIVEIRA, 2013).

4.2 Biolixiviação

A hidrometalurgia é um processo de extração de metais realizado em meio aquoso, sendo aplicada principalmente para a produção de alumina, ouro, urânio, zinco, níquel, cobre, titânio, elementos de terras-raras, dentre outros (CIMINELLI, 2007). A biohidrometalurgia é uma biotecnologia que utiliza microrganismos para a extração de metais dos sulfetos, também em meio aquoso. É compreendida como uma operação simples, de baixo custo e ambientalmente amigável (OLIVEIRA, 2013).

Parâmetros como potencial hidrogeniônico (pH), potencial de oxirredução (Eh) e concentração das espécies iônicas de ferro são condicionadores da eficiência de extração do metal em estudos de biolixiviação de sulfetos. Logo, para a obtenção de elevadas recuperações do metal de interesse utilizando a biolixiviação, se faz necessário adequar estes parâmetros em valores específicos para se atingir as condições ideais de desenvolvimento dos microrganismos (LIMA, 2011). De forma geral, os sulfetos secundários de cobre, em especial, calcocita, digenita, bornita e covelita, apresentam resultados satisfatórios quando a biolixiviação é realizada com microrganismos mesófilos. Porém, quando se trata de sulfetos primários, como a calcopirita, devido a sua natureza refratária (devido a um fenômeno conhecido como passivação) sua dissolução apresenta uma cinética lenta e uma baixa extração do cobre. Assim, diversos estudos são conduzidos com o objetivo de se utilizar microrganismos termófilos para aumentar a taxa de biolixiviação da calcopirita, uma vez que, o aumento da temperatura diminui os efeitos da passivação (SANTOS, 2019).

4.2.1 Microrganismos utilizados na biolixiviação

Uma forma de classificação dos microrganismos que podem ser empregados na biolixiviação, é de acordo com o seu intervalo de temperatura de crescimento, ou seja, por meio da temperatura em que se desenvolvem. Portanto, entre 20°C - 40°C, têm-se os microrganismos mesófilos; entre 40°C - 50°C, os microrganismos termófilos moderados e entre 55°C - 90°C, os microrganismos termófilos extremos (SILVA, 2014).

Na biolixiviação, os microrganismos do gênero *Acidithiobacillus* (grupo proteobactéria) são os mais utilizados e engloba bactérias acidófilas extremas oxidantes de enxofre e/ou do íon ferro(II). As espécies mesófilas *At. thiooxidans* e *At. ferrooxidans* e as termófilas moderadas *At. caldus* são bactérias gram-negativas. As bactérias termófilas moderadas utilizadas em biolixiviação são gram-positivas pertencentes aos gêneros *Acidimicrobium*, *Ferromicrobium* e *Sulfobacillus* e as arqueias termófilas extremas englobam os gêneros *Sulfurisphaera*, *Sulfolobus*, *Acidianus* e *Metallosphaera* (ROHWERDER et al., 2003).

Os microrganismos comumente empregados na biolixiviação fazem uso do oxigênio para seu crescimento, ou seja, são aeróbicos, classificados como quimioautotróficos, oxidando

sulfetos metálicos para a obtenção de energia. Podem também serem autotróficos, utilizando gás carbônico para a execução da biossíntese de seus componentes celulares (MENDONÇA, 2017). Os microrganismos para serem utilizados no processo de biolixiviação também devem ser capazes de viver em baixos valores de pH (acidófilos extremos) e em elevadas concentrações de metais (BOCCHINI, 2019).

Estudos revelam que alguns ânions presentes em ambiente de biolixiviação, como o cloreto, podem causar danos ao crescimento microbiano, dependendo do tipo de cepa empregada, sendo que as altas concentrações de cloreto tendem ser letais para a maioria dos microrganismos utilizados em biolixiviação, pelo fato da elevação da pressão osmótica do meio (MARTINS, 2015).

4.2.2 Técnicas de Biolixiviação

Existem técnicas distintas para operacionalização dos processos de lixiviação como a lixiviação em pilhas de minérios (*heap leaching*), lixiviação em pilhas de rejeitos (*dump leaching*) e a lixiviação em tanques agitados. A escolha do tipo de técnica empregada é baseada nas características do minério, como: a granulometria, o teor e a sua susceptibilidade à (bio)lixiviação, além de se considerar quantidades a serem processadas e os custos operacionais (OLIVEIRA, 2009).

Uma das primeiras aplicações industriais dos processos biohidrometalúrgicos para extração do cobre de um minério de baixo teor foi realizada na mina Kennecott Bingham, Salt Lake City, Utah, em 1950, em que foi empregada a técnica de lixiviação em pilhas de rejeito com solução ácida contendo íons férricos (Fe^{3+}) para recuperação do cobre (SICUPIRA, 2011).

A lixiviação em pilhas de minérios (*heap leaching*) ou pilhas de rejeito (*dump leaching*), consiste na deposição de grandes quantidades de material (minério ou rejeito) sobre uma base impermeabilizada, formando uma pilha, cujo topo é irrigado com uma solução ácida. Essa solução então, percola a pilha sendo coletada e enviada para as etapas de purificação e recuperação do metal (OLIVEIRA, 2009).

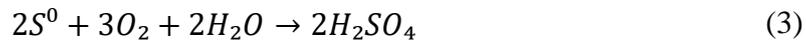
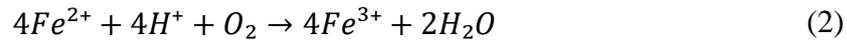
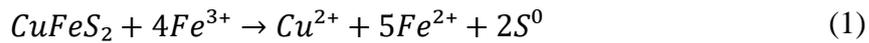
Observa-se que a biolixiviação em pilhas é mais aplicada do que a lixiviação em tanques agitados devido a vantagens econômicas. No entanto, por ser um processo em leito fixo, requer que o tamanho da partícula seja maior e é considerado um processo lento em relação aos processos em tanques agitados, além de não ser aplicável a todos os tipos de minério (LIMA, 2011).

A tecnologia em tanques agitados foi desenvolvida para o processamento de minerais concentrados por causa do elevado custo de capital e operação em relação as operações em pilha. Nos anos 80, processos foram propostos incorporando a tecnologia de tanques agitados para o tratamento de concentrados piríticos e arsenopiríticos. Dois processos foram comercializados, sendo eles, o BIOXTM onde se emprega microrganismos mesófilos e o BACOX empregando microrganismos termófilos moderados. Processos para os metais base foram desenvolvidos em escala piloto, incluindo a biolixiviação dos sulfetos de cobre, níquel e zinco usando mesófilos, termófilos moderados e termófilos extremos. Um processo para a extração de cobalto, já foi comercializado, mas nenhuma das usinas para a extração de cobre avançou para a escala piloto (SOBRAL, 2011). Os problemas causados aos microrganismos neste tipo de processo é o acúmulo de componentes tóxicos, dano físico as células como resultado da agitação e aeração e ao "estresse" devido ao carregamento de sólidos nos reatores (MAHMOUD *et al.*, 2017).

4.3 Biolixiviação da calcopirita

A calcopirita (CuFeS_2) é um mineral sulfetado de cobre sendo a fonte mais abundante de cobre disponível na crosta terrestre, mas que apresenta resistência para ser lixiviada por soluções contendo íons Fe^{3+} . Possui estrutura cristalina tetragonal simples, onde um átomo de enxofre está coordenado com dois átomos de cobre e dois de ferro, por ligações covalentes (MARQUES *et al.*, 2021).

A reatividade da calcopirita é diretamente dependente do tamanho do grão, da estrutura cristalina e da origem da amostra (HORTA, 2008). Em sistemas de biolixiviação, a calcopirita é oxidada pelos íons Fe^{3+} (Equação 1), que recebe elétrons do S^{2-} como resultado do rompimento de reações químicas. Assim, a bactéria é responsável por reoxidar o íon Fe^{2+} a Fe^{3+} (Equação 2), e o S^0 a SO_4^{2-} (Equação 3) (MARTINS, 2015):



O papel dos microrganismos na biolixiviação da calcopirita pode envolver os seguintes mecanismos: (i) mecanismo indireto de não contato, onde o Fe^{2+} é biologicamente oxidado a Fe^{3+} no seio da solução, difundindo-se então, até a interface sólido/solução e reagindo quimicamente com o sulfeto; (ii) mecanismo indireto de contato, onde a oxidação dos íons férricos ocorre no biofilme presente na superfície da partícula sólida; (iii) mecanismo direto de contato, no qual os microrganismos oxidam o sulfeto por meios puramente biológicos, por exemplo, um ataque enzimático. Porém, ainda não houve comprovação de tal mecanismo (RODRIGUES *et al.*, 2017).

4.3.1 Passivação da Calcopirita

Alguns pesquisadores descrevem o fenômeno da passivação da calcopirita como sendo devido à formação de uma camada de enxofre elementar, sulfetos secundários de cobre (calcocita e covelita) e precipitados contendo íons férricos, como a jarosita, decorrentes do processo de dissolução da calcopirita. A passivação causa uma diminuição na cinética de reação e extração do cobre do sulfeto (VIEGAS, 2016).

Velasquez-Yévenes *et al.* (2010), descrevem a passivação da calcopirita como decorrência de um efeito eletroquímico e sugerem que a calcopirita é melhor lixiviada para valores de potencial de solução compreendidas entre 350mV - 420mV (Ag/AgCl). Sendo assim, segundo Martins (2015), quando utilizado microrganismos mesófilos, a passivação da calcopirita é mais perceptível, pois esses microrganismos oxidam o íon ferroso rapidamente, gerando potenciais de oxirredução nos sistemas maiores que 550mV. No entanto, microrganismos termófilos extremos promovem a oxidação do íon Fe^{2+} lentamente, permitindo que o potencial da solução (Eh) mantenha-se em valores mais baixos (cerca de 420mV), favorecendo o processo de biolixiviação da calcopirita.

Vários estudos estão sendo conduzidos para diminuir os efeitos da passivação e uma das abordagens é a utilização de íons cloreto. A utilização de cloreto proporciona uma cinética

de lixiviação mais rápida, bem como um aumento no rendimento da lixiviação do cobre (CARNEIRO; LEÃO, 2007; MARTINS *et al.*, 2019) devido à presença do par $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ no sistema reacional, mais ativo no processo de oxidação do sulfeto. Isto ocorre porque a presença do cloreto permite a formação de complexos estáveis de cobre(I)-cloreto na solução. Portanto, a utilização de íons cloreto juntamente com arqueias termófilas é considerado um caminho que pode ser empregado na biolixiviação da calcopirita, uma vez que, as arqueias termófilas são mais tolerantes à presença desses ânions (MARTINS, 2015).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Amostra inicial do minério

Para a realização dos experimentos de biolixiviação, foi utilizada uma amostra de minério de cobre com as seguintes granulometrias: menor que 2,5mm e entre 2,5mm e 5mm. Para a obtenção dessas duas amostras, o minério foi submetido a uma britagem, em um britador de rolos e a moagem em um moinho de bolas de porcelana. Posteriormente, a amostra foi quarteada, homogeneizada e submetida a um peneiramento a úmido para a separação das frações nas granulometrias desejadas. Uma fração da amostra global na granulometria menor que 37 μ m foi preparada para análise por difratometria de raios X (DRX), para identificar as fases minerais presentes e também para análise química por espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Estas análises foram realizadas previamente, sendo encontrados por análise química os seguintes elementos: 1,79% Cu; 10,54% Fe; 17,89% S; 43,20% Ca; 19,55% Mg; 6,03% Al. Por DRX, foi possível identificar: quartzo, anortita, estantita, homblenda, talco, biotita e calcopirita.

5.2 Microrganismos

A cultura de microrganismo empregada no experimento foi a termófila extrema *Sulfolobus acidocaldarius*, adquirida de coleções depositadas na *Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen* (DSMZ 639). A cultura foi mantida em um *shaker* (*New Brunswick Scientific*) a 70°C e sob agitação de 150min⁻¹. O meio de cultura utilizado no cultivo das células foi o DSMZ 88 modificado, contendo: 1,3g/L de (NH₄)₂SO₄, 0,28g/L de KHPO₄, 0,25g/L de MgSO₄.7H₂O, 0,07g/L de CaCl₂.2H₂O, 0,02g/L de FeCl₃.6H₂O, 1,80mg/L de MnCl₂.4H₂O, 4,5mg/L de NaB₄O₇.10H₂O, 0,22mg/L de ZnSO₄.7H₂O, 0,05mg/L de CuCl₂.2H₂O, 0,03mg/L de Na₂MoO₄.2H₂O, 0,03mg/L de VOSO₄.2H₂O, 0,01mg/L de CoSO₄ e 0,1g/L extrato de levedura. As culturas foram repicadas periodicamente em meios contendo calcopirita e cloreto, para assim, serem utilizadas nos ensaios de biolixiviação.

5.3 Experimentos de biolixiviação em *shaker*

Os experimentos foram conduzidos em duplicata em *Erlenmeyers* de 250mL, contendo 200mL de meio DSMZ 88 modificado e uma densidade de polpa de 2,5% (p/v), além da adição do inóculo filtrado em membrana Millipore 22 μ m. Os *Erlenmeyers* foram armazenados em um *shaker* (*New Brunswick Scientific*), a 70°C, sob agitação de 150min⁻¹ (diâmetro da órbita de 5,0cm) e pH 1,50. Foram realizados experimentos bióticos e abióticos conduzidos na ausência e presença 1,0mol L⁻¹ de cloreto. Nos experimentos onde não houve a presença dos microrganismos, foram utilizados timol e ácido cítrico como bactericidas.

A comparação da eficiência da utilização de cloreto na biolixiviação foi realizada por meio das seguintes condições de experimentos:

- I – Presença de microrganismo e ausência do íon de cloreto (G1 e G2);
- II – Presença de microrganismo e presença do íon de cloreto (G1Cl e G2Cl);
- III – Ausência do microrganismo e ausência do íon cloreto (G1C e G2C);
- IV – Ausência do microrganismo e presença do íon cloreto (G1Clc e G2Clc);

Os experimentos foram realizados utilizando as seguintes granulometrias: (G1) e (G2). Para cada granulometria estudada foi empregada as condições experimentais descritas acima.

Os experimentos foram realizados ao longo de quatorze dias, sendo o pH acompanhado diariamente com o auxílio de um pHmetro (Digimed), composto de eletrodo de membrana de vidro e calibrado com tampões pH 4,0 e 7,0. Quando necessário, o pH foi corrigido utilizando H₂SO₄ concentrado ou NaOH 6mol L⁻¹, para o valor de 1,50. O potencial de oxirredução (Eh) da solução também foi monitorado diariamente utilizando-se um Ehmetro (Digimed) com eletrodo de platina em solução de prata saturada com cloreto de prata. Foram realizadas então, as medidas de Eh referente ao par Ag/AgCl (297mV). As concentrações de cobre e ferro total dos experimentos foram analisadas por ICP-OES (marca Varian, modelo 725).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Experimentos de biolixiviação com minério de cobre

6.1.1 Comportamento do pH

Sabe-se que o pH é um parâmetro importante para o processo de biolixiviação, visto que possui influência sobre a taxa de crescimento microbiano, sobre a cinética de oxidação do íon Fe^{2+} , sobre a concentração de Fe^{3+} em solução, bem como sobre o consumo de ácido no processo. Sabe-se ainda, que quanto maior for o pH, maior será a precipitação do Fe^{3+} como jarosita, no entanto, quanto menor o pH, maior é o consumo de ácido, elevando assim, o custo de produção de cobre (SICUPIRA, 2011). No entanto, no presente trabalho, notou-se que nos experimentos realizados em frascos agitados não houve variações significativas, permanecendo o pH na faixa entre 1,40-1,80 para todos os experimentos bióticos e abióticos, o que pode ser observado pela Figura 6.1. Vale ressaltar que durante os experimentos, o pH foi ajustado para o valor de 1,50 com a adição de ácido sulfúrico concentrado ou NaOH 6mol L^{-1} .

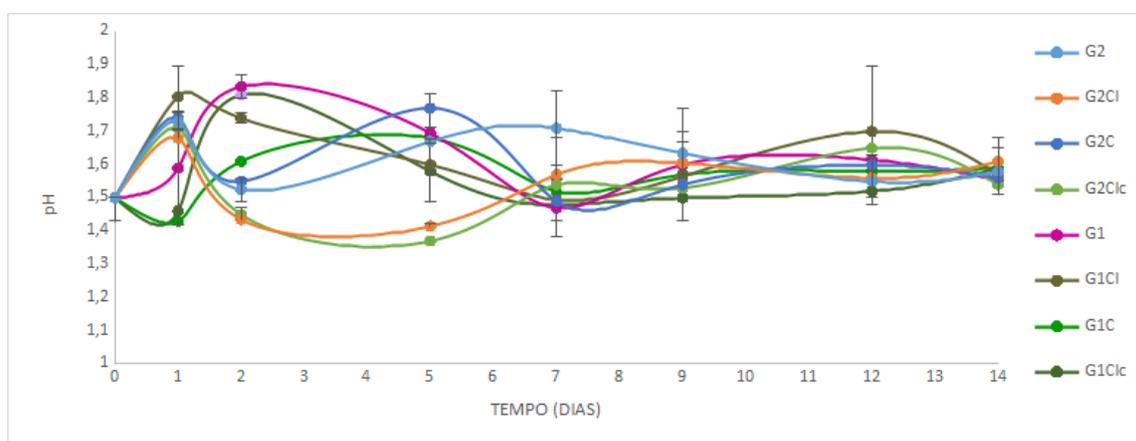


Figura 6.1: Gráfico do potencial hidrogeniônico (pH) para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda: G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5 mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais: pH 1,50; 70°C; 2,5% (m/v).

6.1.2 Potencial de oxirredução (Eh)

O potencial de oxirredução é um parâmetro físico-químico importante para o processo de biolixiviação, sendo relacionado à ação bacteriana, no caso de oxidação dos íons ferrosos a íons férricos. O aumento do valor do Eh é devido ao aumento da concentração de íons férricos. Portanto, no presente trabalho, no final dos quatorze dias de ensaios, o experimento (G1Cl) apresentou o maior valor do Eh (506,5mV), como pode ser visto na Figura 6.2, o que pode ser consequência da maior liberação do íon ferroso da amostra e assim sua oxidação pela arqueia termófila *Sulfolobus acidocaldarius*.

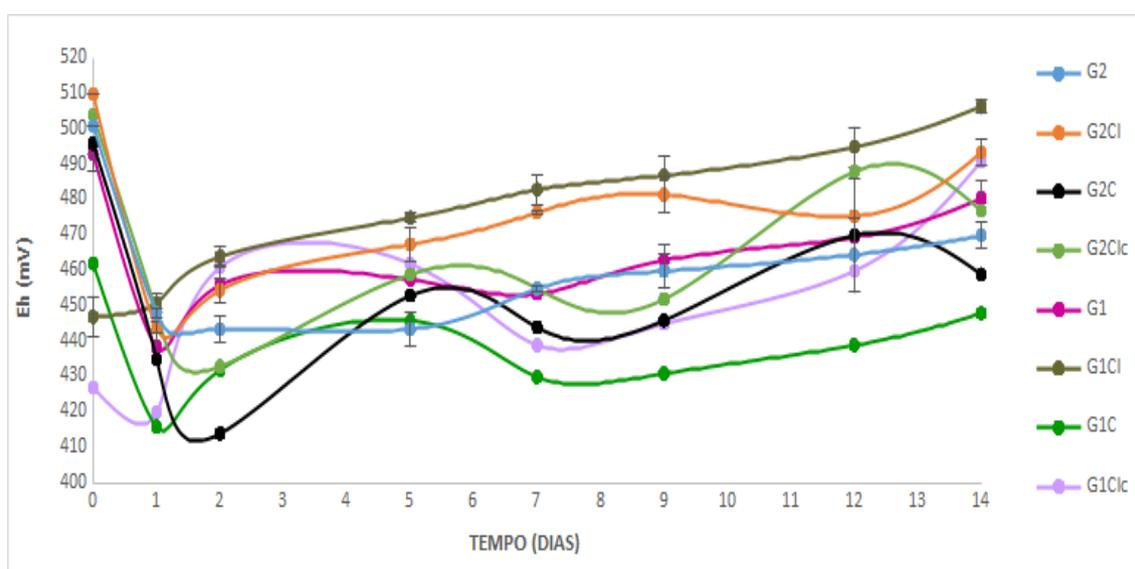


Figura 6.2: Gráfico do potencial de oxirredução (Eh) para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda: G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5 mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais: pH 1,50; 70°C; 2,5% (m/v).

Observa-se na Figura 6.2 que o Eh dos ensaios bióticos, conduzidos com 1,0mol L⁻¹ de cloreto em ambas as granulometrias (G1Cl e G2Cl), seguiram comportamentos crescentes do potencial redox, mostrando, portanto que a adição de cloreto nesta concentração não inibiu a atividade microbiana, uma vez que esses valores de Eh (aproximadamente 490-500mV) foram superiores aos valores de Eh dos sistemas bióticos sem cloreto (470-480mV).

E ainda, ao se analisar os valores do Eh dos experimentos abióticos (G2C) e (G1C) sem cloreto, nota-se de maneira geral que os dados sofreram variações no decorrer do tempo, permanecendo entre 410mV-460mV. A adição de $1,0\text{mol L}^{-1}$ de cloreto no experimento abiótico para a granulometria entre 2,5mm-5mm (G2Clc), apresentou valores superiores a 450mV já no segundo dia de experimento e chegou a 477mV, ao final dos 14 dias de ensaio. O experimento abiótico na presença de cloreto e granulometria menor que 2,5mm (G1Clc) apresentou oscilações no Eh entre 440mV-490mV, durante os 14 dias de ensaio. Portanto, os experimentos abióticos com cloreto apresentaram valores de Eh maiores do que os experimentos abióticos sem cloreto em suas respectivas granulometrias.

6.1.3 Concentração de ferro total

A dissolução do ferro durante os experimentos de biolixiviação também foi avaliada, tendo em vista que o elemento ocasiona mudança no valor do potencial da solução. Os valores da concentração total de ferro dos experimentos podem ser observados na Figura 6.3.

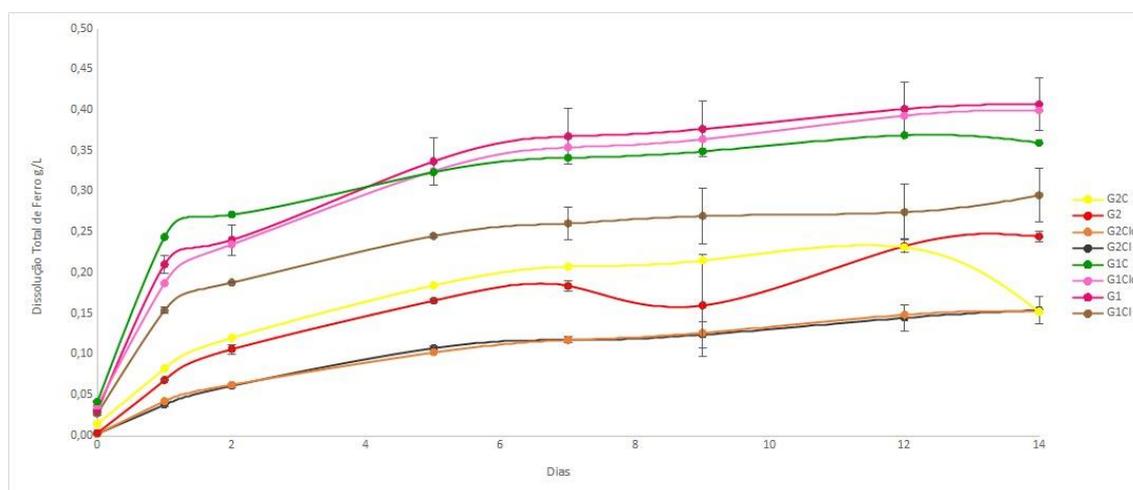


Figura 6.3: Dissolução ferro total (g/L) com o tempo para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda - G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais; pH 1,50; 70°C; 2,5%(m/v).

Observou-se que, no ensaio biótico sem cloreto e para granulometria entre 2,5-5mm (G2), ao final do ensaio, a concentração de ferro foi de 0,25g/L, enquanto que no sistema biótico e na presença de cloreto (G2Cl), foi de 0,15g/L. A adição de íons cloreto não favoreceu a

dissolução de ferro nesses experimentos e em virtude da curva de dissolução total de ferro ser crescente, pode-se inferir que não houve precipitação de ferro (III), pois a concentração de ferro total não diminuiu. Para os experimentos bióticos, com a amostra de granulometria menor que 2,5mm, a adição de cloreto não favoreceu a dissolução do ferro, visto que o experimento biótico sem cloreto (G1), a concentração de ferro total atingiu 0,40g/L e o experimento biótico com cloreto (G1Cl) apresentou o valor de dissolução igual à 0,30g/L. Portanto, a diminuição da granulometria nos experimentos bióticos aumentou a dissolução do ferro.

Nos experimentos abióticos com amostra com tamanho de partícula entre 2,5mm-5mm, sem cloreto (G2C) e com cloreto (G2Clc), não houve diferença na concentração de ferro, sendo encontrado o valor de 0,15g/L, nos dois experimentos ao final dos ensaios. Desta forma, a adição de íons cloreto não aumentou a concentração de ferro nos ensaios abióticos nesta granulometria. Nos ensaios com granulometria menor que 2,5mm, o experimento abiótico sem adição de cloreto (G1C) apresentou no final dos ensaios, concentração de ferro igual à 0,36g/L. Em contrapartida, o experimento abiótico com cloreto (G1Clc) apresentou o valor de concentração igual à 0,40g/L, ou seja, um aumento de apenas 0,04g/L na concentração de ferro, quando se adicionou $1,0\text{mol L}^{-1}$ de cloreto de sódio. Observa-se aqui também, que a diminuição na granulometria da amostra aumentou a dissolução do ferro nos experimentos abióticos, a qual passou de cerca de 0,15g/L para os experimentos com a amostra com granulometria entre 2,5mm-5mm, para aproximadamente 0,40g/L para os ensaios com a amostra com granulometria menor que 2,5mm.

6.1.4 Extração de cobre

Pela observação da Figura 6.4, notou-se que o experimento biótico G1Cl (granulometria menor que 2,5mm e presença de íon cloreto) apresentou a mais alta extração de cobre ao final do experimento (91,30%), enquanto o experimento abiótico G2C (granulometria entre 2,5-5mm e ausência de íon cloreto) apresentou a mais baixa porcentagem de extração de cobre dentre os experimentos realizados (9,63%).

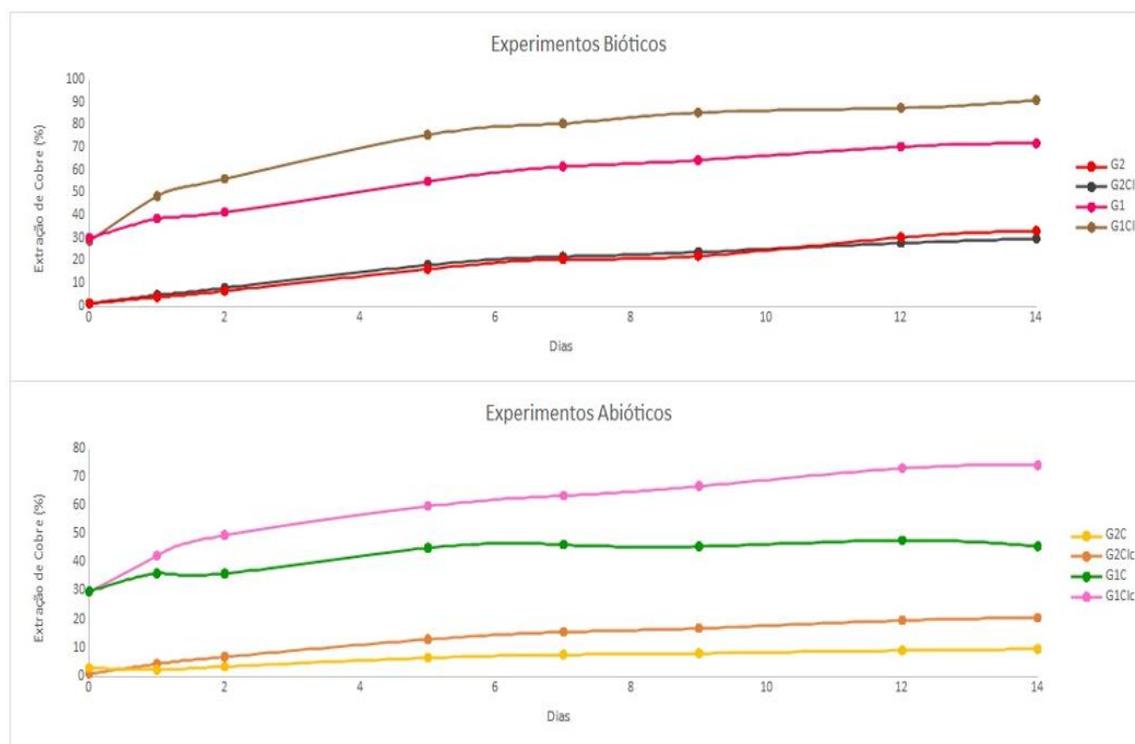


Figura 6.4: Extração de cobre em função do tempo para os experimentos bióticos e abióticos. Legenda - G2: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Cl: experimento biótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Cl: experimento biótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto; G2C: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e sem cloreto; G2Clc: experimento abiótico na granulometria entre 2,5-5mm e com cloreto; G1C: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e sem cloreto; G1Clc: experimento abiótico na granulometria menor que 2,5mm e com cloreto. Condições experimentais: pH 1,50; 70°C; 2,5% (m/v).

Notou-se também, que todos os experimentos abióticos realizados com e sem a adição de cloreto, independentemente da granulometria, apresentaram valores de extração de cobre inferiores aos observados nos experimentos bióticos com e sem adição de cloreto. Uma comparação dos resultados dos experimentos bióticos e abióticos de extração de cobre ao final dos 14 dias de experimentos podem ser observados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Extração de cobre (%) para os experimentos abióticos e bióticos nas diferentes granulometrias ao final dos 14 dias de experimento.

Abióticos	(G2C)	(G2Clc)	(G1C)	(G1Clc)
Extração de Cu (%)	9,63%	20,66%	45,90%	74,45%
Bióticos	(G2)	(G2Cl)	(G1)	(G1Cl)
Extração de Cu (%)	33,41%	29,99%	72,18%	91,30%

A granulometria possui influência direta nas taxas de extração do cobre, uma vez que quanto menor este parâmetro, maior a porcentagem de extração do metal, ou seja, as três maiores porcentagens de extração de cobre foram alcançadas para a granulometria menor do que 2,5mm, sendo: G1Cl (91,30%); G1Clc (74,45%) e G1 (72,18%). Para as mesmas condições experimentais, porém com granulometria entre 2,5mm-5mm, os resultados foram: G2Cl (29,99%); G2Clc (20,66%) e G2 (33,41%). Estes resultados foram similares ao trabalho de Rodrigues *et al.* (2015) em relação a granulometria. Tais autores citam que, ao diminuir o tamanho da partícula, a área superficial por unidade de massa da amostra é aumentada e conseqüentemente ocorre melhora na eficiência de extração do cobre.

7 CONCLUSÃO

Como a demanda mundial por cobre aumenta ao mesmo tempo que a escassez de reservas com alto teor do metal, a busca por tecnologias com foco na extração desse elemento a partir de minerais de baixo teor se faz necessária. Assim, pesquisadores tendem a estudar alternativas para resolver o desafio do processamento de minérios de baixo teor, em virtude da complexidade desses materiais, bem como, minimizar os impactos ambientais causados pelas atividades industriais.

O estudo da biolixiviação do minério de cobre calcopirítico, contendo 1,79% do metal em uma granulometria menor que 2,5mm com microrganismos termófilos extremos e presença de $1,0\text{mol L}^{-1}$ de íons cloreto, possibilitou a extração de 91,30% do cobre. Por outro lado, para a amostra com granulometria menor que 2,5mm, a extração do metal caiu para 74,45% na ausência de microrganismos termófilos extremos e presença de íons cloreto. No experimento de controle químico, conduzido na ausência de cloreto, a extração de cobre foi de 45,90%. Já para a amostra com tamanho de partícula entre 2,5-5mm, a extração do metal diminuiu para 30,00%, também no experimento abiótico e sem cloreto. Portanto, a diminuição da granulometria em sistemas com microrganismos e cloreto permitiram recuperações de cobre maiores que 90%.

Os potenciais redox nos ensaios bióticos com cloreto foram maiores (490-500mV) do que os potenciais dos sistemas bióticos na ausência do ânion (470-480mV), o que sugere que a atividade microbiana não foi inibida pela presença de NaCl. Por fim, os valores de pH sofreram pequenas variações, permanecendo no intervalo entre 1,40-1,80 durante o período dos quatorze dias de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, A. L. C.; JÚNIOR, R. N. C.; PAIVA, R. S.; VALE, B. Estudo do comportamento da recuperação metalúrgica do cobre oxidado na mina do sossego de Canaã dos Carajás submetido à lixiviação com H₂SO₄. In: **XXIV ENTMME**, 2011, Salvador, Bahia. Proceedings [...], 2011.

BOCCHINI, B. M. S. **Biolixiviação de concentrado calcopirítico utilizando Sulfolobus acidocaldarius**. 2019. 37 f. Monografia. Bacharel em Química – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Araraquara, SP, Brasil, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/215258>>.

CARNEIRO, M. F. C. e LEÃO, V. A. The role of sodium chloride on surface properties of chalcopyrite leached with ferric sulphate. **Hydrometallurgy**, v.87, n.3–4, 7, p.73-82. 2007.

CIMINELLI, V. S. T. Hidrometalurgia. In: LUZ, F. A. B.; MATOS, G. M. M.; CASTILHO, Z. C. **Introdução: Definições e escopo 1: Geociências e tecnologia mineral**. Parte I, cap. 4. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 157-176, 2007.

Cobre é considerado o “novo petróleo” na economia verde. **Portal da Mineração**, Belo Horizonte, 27 de mai. de 2021. Disponível em: < <https://portaldamineracao.com.br/cobre-na-economia-verde/>>; acesso: 28, dez, 2021.

DU PLESSIS, C. A.; BATTY, J. D. & DEW, D. W. **Commercial Applications of Thermophile Bioleaching**. Berlin: Springer. 2007.

GARCIA JUNIOR, O.; URENHA, L. C. Lixiviação bacteriana de minérios. In: LIMA, U. A. **Biotecnologia industrial**. São Paulo: Edgard Blucher, v. 3, cap. 22, p. 485-512, 2001.

HORTA, D. G. **Influência da adição da espécie Acidithiobacillus ferrooxidans e de íons Cl⁻ na dissolução da calcopirita (CuFeS₂)**. 2008. 100 f. Dissertação. Pós-Graduação em Química – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP, Brasil, 2008.

LIMA, R. B. **Biolixiviação de concentrado de flotação de sulfetos de cobre, em coluna, utilizando consórcios de micro-organismos mesófilos e termófilos.** 2011. 150 f. Tese. Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

MARQUES, P. R. R.; COSTA, J. F. S.; COSTA, M. J. S.; LIMA, R. C.; ANDRADE, F. V. Estudo do cobre partir da biolixiviação de minério sulfetado. **Brazilian Journal of Development.**v.7, n.11, p.109558-109579, 2021.

MARTINS, F. L.; PATTO, G. B.; LEÃO, V. A. Chalcopyrite bioleaching in the presence of high chloride concentrations. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology,** v.94, n.7, 2019/07/01, p.2333-2344. 2019.

MARTINS, F. L. **Biolixiviação da calcopirita utilizando micro-organismos termófilos extremos na presença de íons cloreto.** 2015. 50 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2015.

MAHMOUD, A.; CÉZAC, P.; HOADLEY, A.F.A.; CONTAMINE, F.; D'HUNGUES, P. A review of sulfide minerals microbially assisted leaching in stirred tank reactors. **International Biodeterioration & Biodegradation,** v. 119, p.118-146. 2017.

MELO, W. C. M. A.; GARCIA JR., O.; BEVILAQUA, D. Biossolubilização da calcopirita na presença dos íons cloreto e ácidos orgânicos. In: **XXIV ENTMME,** 2011, Salvador, Bahia. Proceedings [...], 2011.

MENDONÇA, B. M. **Recuperação de metais pesados de baterias usadas de celulares por biolixiviação.** 2017. 47 f. Monografia. Graduação em Engenharia Química – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2017.

OLIVEIRA, D. M. D. SÉRVULO, E. F. C. SOBRAL, L. G. S. PEIXOTO, G. H. C. **Biolixiviação: utilização de microrganismos na extração de metais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

OLIVEIRA, D. M. **Potencialidade do tensoativo biológico (Ramnolípido) comercial na biolixiviação de minério primário de cobre.** 2009. 94 f. Dissertação. Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

OLIVEIRA, K. B. **Estudo da extração de cobre utilizando contactores com membranas como alternativa ao processo convencional e extração por solvente.** 2013. 122 f. Tese. Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia – PRODERNA/ITEC, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.

RODRIGUES, M. L. M. **Biolixiviação de cobre com Microrganismos Mesófilos e Termófilos Moderados: Sulfetos Secundários Contendo Flúor e Placas de Circuito Impresso.** 2015. 116 f. Tese. Doutorado em Engenharia de Materiais – Rede Temática em Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2015.

RODRIGUES, M. L. M, CRUZ, F. L. S, RODRIGUES, I. C. B, LEÃO, V. A. Influência da taxa de aeração na biolixiviação de sulfetos secundários de cobre. In: **XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, 2017, Belém, Pará, 2017.

ROHWERDER, T.; GEHRKE, T.; KINZLER, K. e SAND, W. Biobleaching review part A: Progress in biobleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. **Applied Microbiology Biotechnology**, v.63, n.3, p.239-248. 2003.

SANTOS, G. V. Lixiviação bioassistida de concentrado de flotação de sulfetos de cobre, em coluna, utilizando consórcios de microrganismos mesófilos e termófilos. In: **XVII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**, 2019, p. 81-87, Cidade Universitária, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2019. Disponível em <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/479>; acesso: 21, dez, 2021.

SICUPIRA, L. C. **Biolixiviação de sulfetos secundários de cobre por sulfobacillus thermosulfidooxidans.** 2011. 83 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais –

Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2011.

SILVA, J. C. Saiba como bactérias podem atuar como mineradores e reduzir o impacto ambiental causado pelos rejeitos da mineração. **Temas Atuais em Biologia**, 2014. Disponível em: <http://www.temasbio.ufscar.br/?q=artigos/bact%C3%A9rias-mineradoras>; acesso: 03, dez, 2021.

SOBRAL, L. G. S.; OLIVEIRA, D. M. e SOUZA, C. E. G. **Biohydrometallurgical Process: A practical approach**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 2011

VELÁSQUEZ-YÉVENES, L.; NICOL, M. e MIKI, H. The dissolution of chalcopyrite in chloride solutions: Part 1. The effect of solution potential. **Hydrometallurgy**, v.103, n.1-4, 6, p.108-113. 2010.

VIEGAS, D. M. A. **Avaliação da Cinética Bacteriana na Biolixiviação de Calcopirita**. 2016. 106 f. Dissertação. Mestrado em Química – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP, Brasil, 2016.

WALLIS, T. L.; CHLUMSKY, G. F. *Economic considerations is SX / EW operations*. In: JER-GENSEN, G. V (ed), “*Copper leaching, solvente extraction, na eletrowinning technology*”, **Society for Mining, Metallurgy and Exploration**. Vol. 2, pp.89-91, Littleton, CO. 1999.

YAMANE, L.H.; ESPINOSA, D.C.; TENÓRIO, J. A. S. Biolixiviação de cobre de sucata eletrônica. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.64, n.3, p. 327-333, jul-set. 2011.