

## BIOLIXIVIAÇÃO EM REATORES PARA TRATAMENTO DO MINÉRIO DE COBRE PROVENIENTE DA REGIÃO DE CARAJÁS (PA)\*

Dryelle de Nazaré Oliveira do Nascimento<sup>1</sup>

Maurício César Palmier<sup>2</sup>

Andre Luiz Vilaça do Carmo<sup>3</sup>

Daniella Cardoso Buzzi<sup>4</sup>

Rafael Vicente de Pádua Ferreira<sup>5</sup>

Hélio Raymundo Ferreira Filho<sup>6</sup>

Joner Oliveira Alves<sup>7</sup>

### Resumo

A biolixiviação consiste na lixiviação do minério a partir da ação de bactérias oxidantes, como a *Acithiobacillus ferrooxidans*. Este estudo teve como objetivo avaliar o processo de biolixiviação da calcopirita em reatores com dois minérios diferentes, um sulfetado e outro oxidado, provenientes da região de Carajás (PA). O ensaio foi conduzido em tanques, em batelada, contendo 3kg de minério durante 100 dias. Caracterizações mineralógicas por DRX e químicas por EDXRF foram realizadas. Medições diárias de pH e Eh foram realizadas, e coletadas amostras para determinação da extração de cobre, também por EDXRF. Os resultados do estudo demonstraram que as amostras apresentaram comportamento semelhante quanto ao Eh e distintos com relação ao pH, o que se deu por conta de suas composições. No 100º dia, a amostra sulfetada apresentou 0,74% de extração de cobre, com o processo encontrando-se ainda ativo. A amostra oxidada apresentou 18,35% de extração no 60º dia, estabilizando-se a partir de então, com o processo praticamente encerrado no 100º dia.

**Palavras-chave:** *A. ferrooxidans*; Calcopirita; Lixiviação bacteriana.

### BIOLEACHING IN REACTORS FOR TREATMENT OF COPPER ORE FROM CARAJÁS REGION (PA)

### Abstract

The bioleaching consists of ore leaching from the oxidizing bacteria, such as *Acithiobacillus ferrooxidans*. This study aimed to evaluate the bioleaching process of chalcopyrite in reactors with two different ores, one sulfide and one oxidized, from the region of Carajás (PA), in Brazil. A test conducted in tanks, in batch, containing 3kg of ore per 100 days. Mineralogical characterizations were performed by XRD and chemical analysis by EDXRF. Measurement of pH and Eh were performed daily, and collected samples for determination of copper extraction, by EDXRF. The results highlighted the similar behavior of Eh and distinguished to pH, because of their composition. On the 100<sup>th</sup> day, the sulfide ore sample presented 0.74% copper extraction, but the process being still active. The oxidized ore sample presented 18.35% of extraction on the 60<sup>th</sup> day, stabilizing from then on, and the process virtually ended on the 100<sup>th</sup> day.

**Keywords:** *A. ferrooxidans*; Chalcopyrite; Bacterial leaching.

<sup>1</sup> Eng. Ambiental e de Energias Renováveis, Mestranda em Ciências Ambientais na UEPA, Bolsista no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil.

<sup>2</sup> Químico, Doutor em Biotecnologia, Diretor de Processos Biotecnológicos na Itatijuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.

- <sup>3</sup> *Químico Industrial, Mestre em Geologia e Geoquímica, Assistente de Pesquisa no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil.*
- <sup>4</sup> *Química, Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Pesquisadora no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil.*
- <sup>5</sup> *Biomédico, Doutor em Tecnologia Nuclear, Diretor Executivo na Itatijuca Biotech, São Paulo, SP - Brasil.*
- <sup>6</sup> *Eng. Elétrico, Doutor em Ciências de Gestão, Professor na Universidade do Estado do Pará, Belém, PA - Brasil.*
- <sup>7</sup> *Físico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Diretor no Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais, Belém, PA - Brasil.*

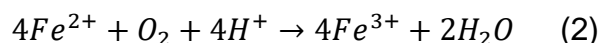
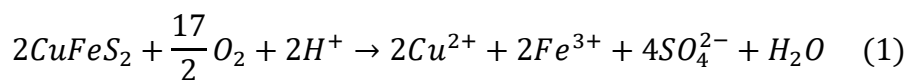
## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o 15º maior produtor de minério de cobre, com 1,6% da produção mundial no ano de 2014 [1,2]. Das reservas brasileiras, estimadas em 17,3 milhões de toneladas, quase 85% estão localizadas no Pará, detentor de projetos de produção de cobre em andamento ou previstos situados na região de Carajás [3,1,4].

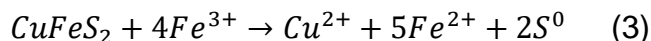
O cobre costuma ser eficientemente extraído da calcopirita por meio de processos pirometalúrgicos, os quais necessitam de grande quantidade de energia e água [5]. Entretanto, em um cenário de escassez do recurso hídrico, são exigidas metodologias que busquem à otimização do uso deste recurso. Além disso, o aumento da demanda mundial por cobre e o esgotamento das reservas nos locais de mineração, tornam a busca por tecnologias de processamento de minérios de baixa qualidade, ou baixo teor, cada vez mais visadas pela indústria mineral [6,7]. Uma técnica considerada mais sustentável do que os processos convencionais de recuperação de metais é a biolixiviação [8]. Também denominado de lixiviação bacteriana, método este inserido na área da biohidrometalurgia ou biomineração [9]. Encontra-se bem estabelecido no tratamento de alguns sulfetos minerais, em que minérios de cobre de baixo teor são lixiviados a partir da ação de bactérias oxidantes [10, 11, 12].

A calcopirita é um dos sulfetos mais estudados em processos de biolixiviação, e as *Acithiobacillus ferrooxidans* uma das principais espécies de microorganismos empregadas. Ela caracteriza-se por ser do tipo gram-negativa, de ocorrência em minérios de sulfeto metálico, possuir forma de bastão com extremidade arredondadas, com 1,0-2,0µm de comprimento por 0,5-0,8µm de largura, ocorrendo em pares ou isolados [13, 14]. São bactérias acidófilas e mesófilas, com pH ideal de atividade por volta de 1,8 e temperatura em torno de 30°C [15]. São organismos quimiolitotróficos, ou seja, obtém energia por meio da oxidação de substratos inorgânicos, geralmente compostos reduzidos de enxofre, incluindo os sulfetos metálicos, e o íon ferroso [16]

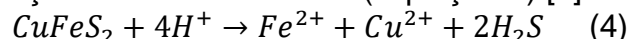
O processo de biolixiviação da calcopirita pode ser do tipo direto (Equações 1 e 2), quando ocorre o ataque da bactéria na superfície do mineral, e indireto (Eq. 3), pela oxidação dos sulfetos minerais pelo íon férrico, sendo este último o mecanismo mais estudado [17, 18, 6].



No mecanismo indireto, tem-se que:



Outro processo de dissolução paralelo, não oxidativo, também contribui para a cinética da lixiviação da calcopirita em soluções de ácido sulfúrico (Equação 4) [6]:



A *Acidithiobacillus ferrooxidans* é muito empregada para biolixiviação em tanques agitados, também possuindo aplicações comerciais, com estudos apontando as vantagens e superioridade do seu uso em processos industriais [8,19]. Ao serem consorciadas em tanques com *A. thiooxidans* para recuperação de ouro e prata em minério composto majoritariamente por pirita e arsenopirita, foram obtidos valores de 40 a 79% de extração para o ouro e de 51 a 80% para a prata, firmando o emprego de tanques agitados com consórcio de microorganismos acidófilos como uma opção promissora para estes minérios [20].

Estudo de recuperação de cobre a partir de minério de baixo teor, proveniente de Carajás, foi desenvolvido avaliando-se a ação de agentes químicos ( $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) e um surfactante (Twen 800) em processo de biolixiviação com *A. ferrooxidans*. Foram obtidas taxas de extração de cobre de 35% sem a adição dos agentes químicos propostos e valor semelhante com a adição do íon  $\text{Ag}^+$ , comprovando que a lixiviação foi promovida pela ação dos microorganismos [4].

Para minérios de cobre de alta concentração, em biolixiviação por *A. ferrooxidans* em frascos agitados sob efeito de adição de nanopartículas polares e apolares, obteve-se taxas de extração de 40% em 63 dias com emprego de nanopartículas apolares, e de cerca de 35% em 65 dias para nanopartículas polares [21]. No presente estudo, pretende-se avaliar a ação das *A. ferrooxidans* num processo de biolixiviação em reatores, para dois tipos de minério de cobre, coletados na região de Carajás/PA, um sulfetado e outro oxidado.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Coleta e Preparação das Amostras

A amostras utilizadas nos tanques foram coletadas em uma mina de cobre, na Serra dos Carajás (PA). Consistem em dois tipos de minério: um sulfetado, com elevado teor de cobre, o qual passou por cominuição manual, e posterior peneiramento, até atingir a granulometria inferior a 1,68mm; e outro oxidado, que se apresentava com aspecto solúvel em meio aquoso, dispensando cominuição e peneiramento. Cerca de 100g de cada amostra foram pulverizadas em moinho do tipo almofariz (Retsch, RM200) e submetidas a caracterização mineralógica e química.

### 2.2 Caracterização Mineralógica e Química

A composição mineralógica das amostras foi determinada por Difractometria de Raios-X (DRX) sendo empregado o preparo *backloading*, pelo método do pó, em equipamento modelo Empyrean, tubo de Raios-X cerâmico de Cobre e nível de potência máxima de 2,2kW, da marca PANalytical. A determinação da composição química foi realizada por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia

Dispersiva (EDXRF), modelo Epsilon 3<sup>XLE</sup>, tubo de Raios-X cerâmico de Ródio e nível de potência máxima de 15W, da marca PANalytical.

### 2.3 Preparo do inóculo

Foram preparados 5L de solução de inóculo, sendo 2,5L para cada reator, pois se considerou o valor de 10% de inóculo em relação ao volume de trabalho. Para o preparo, adicionou-se 10% da cultura enriquecida de *A. ferrooxidans* em meio T&K [22], mantida em temperatura ambiente, sob controle de pH e agitação durante 24 horas até a oxidação do íon ferroso para íon férrico. Tal mudança foi atestada pelo aumento do potencial de oxirredução da solução, de 420 pra 560mV, além da percepção visual da mudança de cor, de verde claro (íon Fe<sup>2+</sup>) para marrom avermelhado (íon Fe<sup>3+</sup>).

### 2.4 Montagem dos reatores

A operação dos reatores ocorreu em um sistema em batelada, onde 3kg de cada minério estudado foram adicionados a tanques com mecanismo de agitação mecânica e aeração, os quais continham 22,5L de meio T&K, sem adição de sulfato ferroso. Foi realizado ajuste do pH para 1,8 e o sistema permaneceu sob agitação constante por 12h para estabilização, até que fosse adicionado, em cada reator, 2,5L de inóculo, mantendo-se a agitação, aeração e temperatura ambiente. A Figura 1 apresenta um esquema do sistema de reatores.

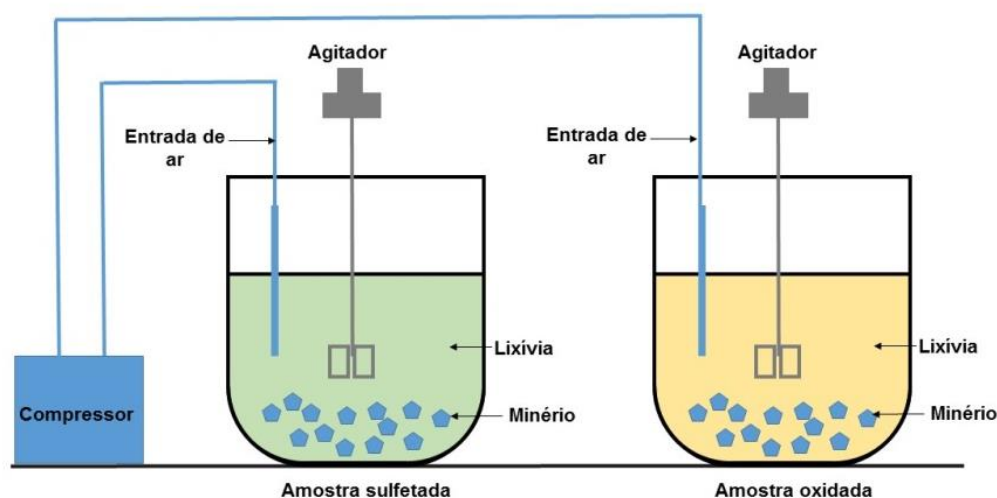


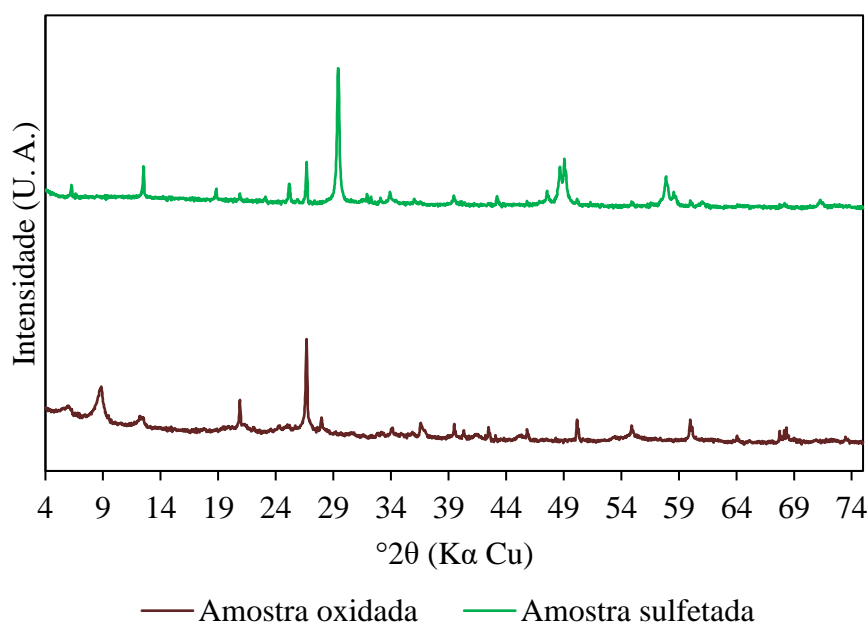
Figura 1. Esquema de funcionamento dos reatores.

A fim de acompanhar o processo de ação dos microorganismos, foram realizadas medições diárias, ao longo de 100 dias, do pH e do potencial de oxirredução do sistema. Tais medições foram realizadas em pHmetro e medidor de potencial de oxirredução da marca Electrolab, modelos Fermac 260 e Fermac 290, respectivamente. Também foram realizadas coletas de amostras diariamente para quantificação e análise química do cobre lixiviado por Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), em equipamento da marca PANalytical, modelo Epsilon 3<sup>XLE</sup>, ânodo de Rh, sendo construídas curvas de calibração nas concentrações de 2,5 a 2000ppm, a partir de sulfato de cobre.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Mineralógica

A composição mineralógica das amostras está apresentada na Figura 2.



**Figura 2.** Composição mineralógica das amostras sulfetada e oxidada.

Na composição mineralógica da amostra sulfetada, ocorre a presença predominante de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) distâncias planares principais: 3,03 e 1,85Å (mineral minério); calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), distância planar principal: 3,03Å; quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), distâncias planares principais: 3,34 e 4,25Å; e o argilomineral clorita, distâncias planares principais: 14, 7 e 3,5Å. A amostra oxidada apresenta composição mineralógica bem distinta, com presença dos argilominerais clorita e mica (distância planar principal: 10Å), além de quartzo, goethita aluminosa ( $(\text{Fe, Al})\text{OOH}$ ), distância planar principal: 4,15Å e anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), distância planar principal: 3,51Å.

#### 3.2 Caracterização Química

A Tabela 1 apresenta a composição química das amostras utilizadas. Conforme expresso na Tabela 1, observa-se que no minério sulfetado, o enxofre, ferro e cobre são os componentes majoritários, com os teores de 34,52%, 23,49% e 18,41%, respectivamente. Tais concentrações, ao serem analisadas conjuntamente à Figura 2, indicam um minério propício para processos de biolixiviação, visto que os componentes majoritários estão associados à calcopirita.

Com relação ao minério oxidado, os maiores teores foram de silício (45,94%), que se encontra associado ao mineral quartzo e à estrutura dos argilominerais clorita e mica; seguido de ferro (25,62%) e alumínio (16,03%), sendo a estrutura da clorita condicionante para a presença do magnésio (3,27%). Tais resultados novamente confirmam os expressos na Figura 2.



**Tabela 1.** Composição química das amostras utilizadas

Elemento	Concentração (%)	
	Amostra sulfetada	Amostra oxidada
SiO <sub>2</sub>	6,64	45,94
TiO <sub>2</sub>	-	1,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,17	16,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,49	25,62
CaO	13,19	1,48
CuO	18,41	1,42
MgO	0,84	3,27
MnO	<0,1	<0,1
K <sub>2</sub> O	-	3,77
SO <sub>3</sub>	34,52	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,59	1,13
Outros*	<0,1	<0,1

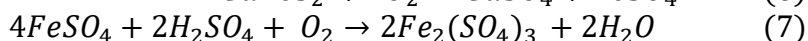
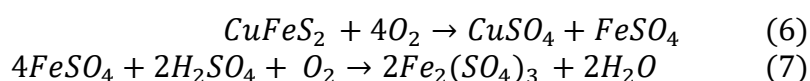
### 3.3 Avaliação dos ensaios

#### 3.3.1 Monitoramento do pH e Eh

O Eh, ou potencial redox, é um parâmetro físico-químico que está relacionado com a razão dos íons férrico/ferrosos pela equação de Nernst (Equação 5):

$$E = E_{Fe^{2+}, Fe^{3+}}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}]} \quad (5)$$

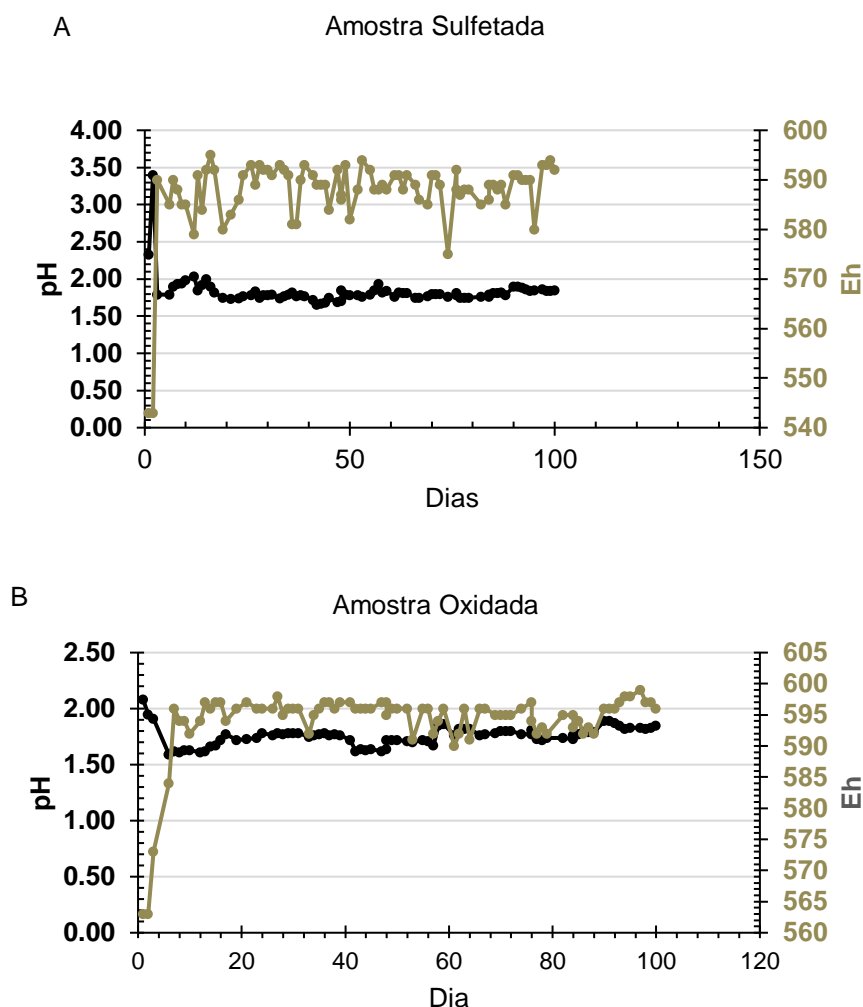
Em estudo desenvolvido por Pereira et al (2008) o mecanismo de ação das bactérias é apresentado da seguinte forma:



Assim, os íons ferrosos provenientes da dissolução da calcopirita e do meio contendo sulfato ferroso são oxidados, por ação das bactérias, a íons férricos (Eq. 6 e 7), fazendo com que a razão das concentrações de íons férrico/ferrosos seja crescente, aumentando o potencial redox ao longo da lixiviação [23].

Durante o ensaio, se observou que não houve grande variação nos valores de Eh, com poucas exceções ao longo dos 100 dias de ensaio. Nos dois primeiros dias, na amostra sulfetada, o valor de Eh foi de 543mV, com posterior aumento para valores compreendidos entre 582 e 594 mV, comprovando a atividade bacteriana. Na amostra oxidada, os valores de Eh foram de 563mV para os dois primeiros dias, 573 e 584mV para o 3º e 6º dia, respectivamente. Apresentaram aumento no 7º dia para 596mV e se estabilizaram em valores entre 592 e 597mV até o 100 dia de ensaio. As pequenas variações observadas, ao serem analisadas conjuntamente ao monitoramento do pH, corroboram o fato de que em valores de pH superiores a 1,8, ocorre a diminuição do metabolismo das bactérias (Figura 3). Este comportamento

também justifica o menor valor médio da amostra sulfetada em relação à oxidada, visto que a primeira exigia maior controle de pH.



**Figura 3.** Valores de pH e Eh para as amostras sulfetada (A) e oxidada (B) durante os 100 dias de ensaio.

Com relação ao pH, as amostras apresentaram comportamentos diferentes, o que se deve às suas naturezas distintas. No reator com minério sulfetado (Figura 3A), o aumento de pH deu-se por conta dos carbonatos presentes na amostra, e de forma mais intensa nos primeiros dias, devido à granulometria (<1,68). Posteriormente, este se estabilizou abaixo de 2.

Na amostra com minério oxidado (Figura 3B), o leve aumento no pH inicial, que não foi muito superior a 2 e diminuiu com o andamento do ensaio, é explicado pela atuação bacteriana na oxidação dos íons ferrosos, podendo também ser explicado pela hidrólise destes íons, favorecendo o ambiente ácido.

### 3.3.2 Adição de ácido sulfúrico

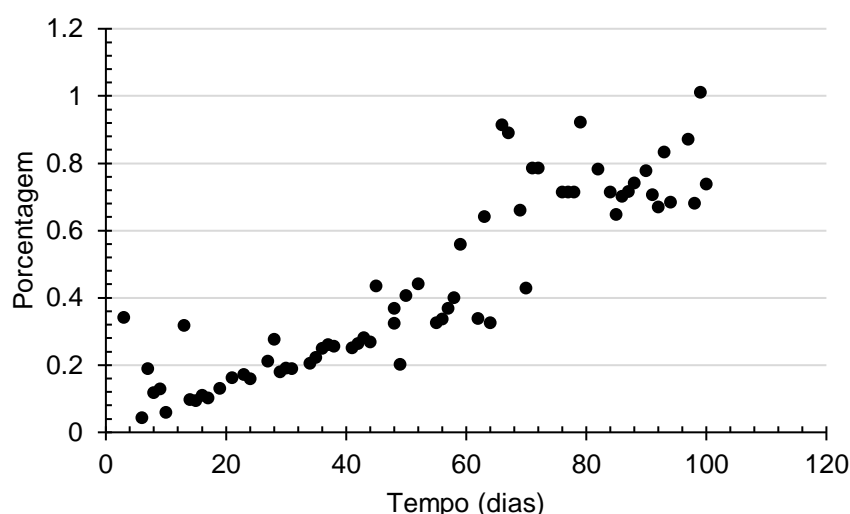
A adição de ácido sulfúrico foi necessária para a manutenção do baixo valor do pH, sendo adicionada uma quantidade superior na amostra sulfetada, dada a maior presença de cálcio e neutralização da lixívia. Esta adição também é importante para evitar a formação de sais férricos, como a jarosita ( $\text{MFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  - em que que

M =  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ag^+$  ou  $H_3O^+$ ) passam a precipitar em pH acima de 2, reduzindo a eficiência em processos de biolixiviação [24, 9, 14].

Em estudo conduzido por Fu et al., (2008), foi observado que o baixo pH reduz significativamente a formação de jarosita em cultura pura e mistura de *L. ferriphilium* e *A. caldus*. Além disso, os autores obtiveram que, em sistemas contendo *A. ferrooxidans*, a diminuição da taxa de dissolução da calcopirita após 12-16 dias, coincidiu com a formação de jarosita na superfície do mineral durante o processo de biolixiviação [8].

### 3.3.3 Extração do cobre

A Figura 4 apresenta a solubilização de cobre na amostra sulfetada ao longo de 100 dias de ensaio.

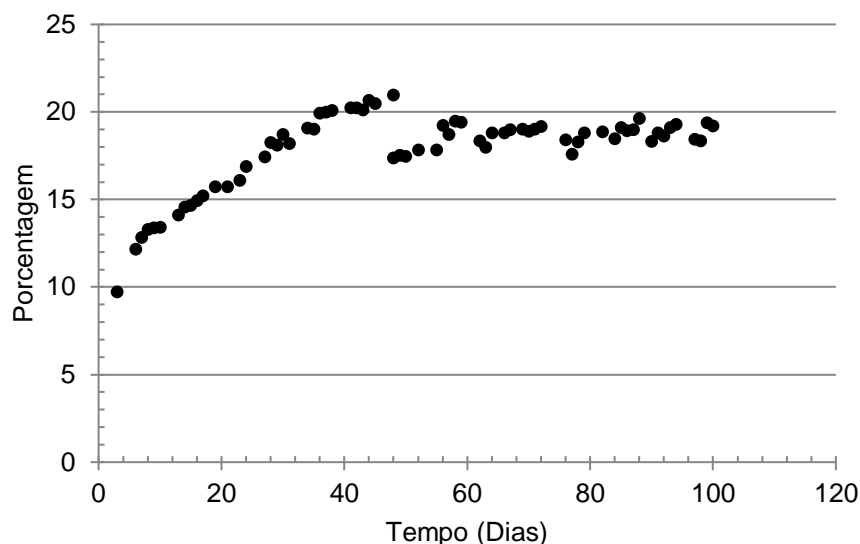


**Figura 4.** Porcentagem de extração de cobre para amostra sulfetada.

No minério sulfetado, a extração do cobre foi de cerca de 0,47% no 50º dia de ensaio e de 0,74% no 100º dia. Este valor é considerado baixo ao ser comparado com outros estudos envolvendo microorganismos mesofílicos. Liu et al (2017), em experimento de biolixiviação em batelada da calcopirita (Cu: 32,6%) com um mix de microorganismos mesofílicos composto por *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*, obteve 59,2% de extração de cobre. Tal valor foi considerado menos eficiente ao ser comparado com microorganismos extremamente termofílicos também analisados, os quais obtiveram extração de 84,56% [15].

Em estudo de biolixiviação da calcopirita desenvolvido por Silva (2011) utilizando a *A. ferrooxidans* para minérios da região de Carajás com alto teor de Cu, obteve-se taxas de extração também superiores, com valores entre 35 e 40%, mas fazendo uso alternativas para otimizar o processo de extração [22]. Nesta pesquisa, apesar da baixa extração, os valores de pH mantidos por volta de 1,8 e Eh em torno de 588mV, indicam que o processo ainda se encontra ativo e as concentrações de cobre solúvel continuarão aumentando, podendo ser adotadas técnicas que o tornem mais eficiente, tais como: o emprego de microorganismos termófilos, consórcio com outros microorganismos, testes em colunas, por exemplo.





**Figura 5.** Porcentagem de extração de cobre para a amostra oxidada.

Quanto ao minério oxidado (Figura 5), o valor de solubilização foi maior, chegando a 17,49% no 50º dia, estabilizando-se por volta do 60º dia, com 18,35% de extração. Nos últimos 10 dias de ensaio, o valor médio de extração foi de 18,83%, indicando que a dissolução foi praticamente encerrada. A maior taxa de solubilização em relação à amostra sulfetada deve-se ao fato de o ambiente ácido e oxidante favorecer a solubilização dos metais pela *A. ferrooxidans*. Para minérios com baixa concentração de cobre, uma alternativa para otimizar a biolixiviação é a adoção de pré-tratamentos ácidos para remoção de carbonatos, que demonstram bons resultados, com valores de extração de 47% para minérios com 0,5% de cobre provenientes de Carajás [12].

Os resultados da amostra oxidada também diferem dos encontrados por Giaveno et al. (2003), que ao fazer uso de biorreatores para lixiviação de minério oxidado de cobre, obtiveram valores de extração inferiores a 1% em ensaios com *A. ferrooxidans* e *A. thiooxidans*. Tal taxa de extração foi atribuída ao baixo crescimento celular, visto que os microorganismos não estavam em um pH ideal para o seu crescimento, com a *A. thiooxidans* em pH de 4,5 e a *A. ferrooxidans* em pH por volta de 3 [11]. O que confirma a necessidade do controle do pH para garantir a eficiência de processos de biolixiviação.

#### 4 CONCLUSÃO

O monitoramento do pH e a adição de ácido sulfúrico foram fundamentais para a manutenção da taxa ótima do metabolismo das *A. ferrooxidans*, principalmente na amostra em que a concentração de cálcio foi maior (sulfetada). A amostra sulfetada, apesar de possuir baixa taxa de extração (0,74%) no 100º dia de ensaio, ainda apresenta tendência de continuidade deste processo, que poderia ter sido mais eficiente se a cultura fosse melhor adaptada para o crescimento neste minério ou até mesmo realizado consórcio de microorganismos e o emprego de microorganismos termófilos. Apesar de a amostra oxidada ter apresentado taxa de solubilização do cobre bem maior que a sulfetada, ela estabilizou-se a partir do 60º dia (18,35%), com processo praticamente encerrado no 100º dia, o que ocorreu pela baixa concentração de cobre neste minério.

## REFERÊNCIAS

1. IBRAM-Instituto Brasileiro de Mineração. Informações e análise da economia mineral brasileira. 7 ed. Brasília: IBRAM; 2012. V. 35.
2. DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral 2015. DNPM, 2016.
3. DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral. Balanço mineral brasileiro 2001. DNPM, Brasília, 2001.
4. Ribeiro Neto,WA. Biolixiviação de minério de cobre da mina de Sossego (PA)- Companhia Vale do Rio Doce. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Araraquara, Universidade Estadual Paulista, 2007.
5. Bobadilla-Fazzini RA, Pérez A, Gautier V, Jordan H, Parada P. Primary copper sulfides bioleaching vs. chloride leaching: Advantages and drawbacks. *Hydrometallurgy*. 2017; 168 (2017):26–31.
6. Walting, HR. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides- A review. *Hydrometallurgy*. 2006; 84 (2006): 81-108.
7. Zhao H, Huang X, Wang J, Li Y, Liao R, Wang X, Qiu X, Xiong Y, Qin W, Qiu G. Comparison of bioleaching and dissolution process of p-type and n-type chalcopyrite. *Minerals Engineering*. 2017; 109 (2017): 153–161.
8. Fu B, Zhou H, Zhang R, Qiu G. Bioleaching of chalcopyrite by pure and mixed cultures of *Acidithiobacillus* spp. and *Leptospirillum ferrophilum*. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2008; 62 (2008); 109–115.
9. Gentina JC, Acevedo F. Application of bioleaching to copper mining in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2013 [Acesso em 24 mai. 2017] 16 (3): 1-14. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2225/vol16-issue3-fulltext-12>.
10. Guezennec A, Joulain C, Jacob J, Archane A, Ibarra D, Buyer de R, Bodenán F, d'Hugues P. Influence of dissolved oxygen on the bioleaching efficiency under oxygen enriched atmosphere. *Minerals Engineering*. 2016; 106 (2017); 64–70.
11. Giaveno MA, Lavalle TL, Donato T. Use of bioreactors in the leaching of oxidized copper ore. *Latin America applied research*. 2003; 33(1).
12. Magalhães VMA. Remoção de carbonatos para otimizar biolixiviação de rejeito calcopirítico empregando consórcio de microorganismos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
13. Francisco Júnior WE, Bevilacqua D, Garcia Júnior O. Estudo da oxidação dos sulfetos sintéticos Molibdenita (MoS<sub>2</sub>) e Covelita (CuS) por *Acidithiobacillus ferrooxidans* via respirometria celular. *Quim. Nova*. 2009; 32 (6); 1477-1481.
14. Jyn-yan L, Xiu-Jiang T. et al., Pei C. Study of formation of jarosite mediated by *thiobacillus ferrooxidans* in 9K medium. *Procedia Earth and Planetary Science*. 1009; 1 (2009); 706-712.
15. Liu H, Xia J, Nie Z, Liu L, Wang L, Ma C, Zheng L, Zhao Y, Wen W. Comparative study of S, Fe and Cu speciation transformation during chalcopyrite bioleaching by mixed mesophiles and mixed thermophiles *Minerals Engineering*. 2017; 106 (2017); 22–32.
16. Campodonico MA, Vaisman D, Castro JF, Razmilic V, Mercado F, Andrews BA, Feist AM, Asenjo JA. *Acidithiobacillus ferrooxidans*'s comprehensive model driven analysis of the electron transfer metabolism and synthetic strain design for biomining applications. *Metabolic Engineering Communications*. 2016; 3 (2016); 84–96.
17. Haddadin J, Dagot C, Fick M. Models of bacterial leaching. *Enzyme and Microbial Technology*. 199; 17 (1995); 290-305.
18. Crundwell FK, Holmes PR, Fowler TA. How do bacteria Interact with minerals. *The Journal of The South Africa Institute of Mining and Metallurgy*. 2000. 399-402.
19. Tao H, Dongwei Li. Presentation on mechanisms and applications of chalcopyrite and pyrite bioleaching in biohydrometallurgy-a presentation. *Biotechnology Reports*. 2014; 4 (2014); 107-119.

20. Arroyave DG, Márquez GM, Gallego SD, Pacheco G. Evaluación y caracterización mineralógica del proceso de biooxidación en un reactor continuo de tanque agitado. Dyna. 2010; 67(164); 18-29.
21. Silva, DR da. Efeito da adição de nanopartículas na biolixiviação da calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) por *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR. Dissertação (Mestre em Química). Araraquara, Universidade Estadual Paulista, 2011.
22. Tuovinen O H, Kelly DP. Studies on the growth of *Thiobacillus ferrooxidans*. Use of membrane filters and ferrous iron agar to determine viable number and comparison  $^{14}\text{CO}_2$  – fixation and iron oxidation as measures of growth. Arch. Microbiol. 1979. v.1; 205-210.
23. Pereira GSF, Lima RB, Sobral LGS. Biolixiviação de concentrado de flotação de sulfetos de cobre, em batelada, utilizando microrganismos mesofílicos e termofílicos. XV Jornada de Iniciação Científica-CETEM. 2008; 1-7.