

LIXIVIAÇÃO DE MINÉRIO AURÍFERO: UMA ABORDAGEM BIOTECNOLÓGICA

GOLD ORE LEACHING: A BIOTECHNOLOGICAL APPROACH

Andriela Dutra Norberto de Oliveira

Aluna de Graduação em Ciências Biológicas 5º período, Universidade Estadual da Zona Oeste (UEZO)

Período PIBIC/CETEM : agosto de 2017 a julho de 2018,
andriela.norberto7@gmail.com

Luis Gonzaga Santos Sobral

Orientador, Engenheiro Químico, Ph.D.

Lsobral@cetem.gov.br

Débora Monteiro de Oliveira

Orientadora, Bióloga, D.Sc.

mdo.debora@gmail.com

Resumo

Este estudo avaliou o potencial do uso de uma cepa de *Thiobacillus thioeparus* na lixiviação de um concentrado aurífero no qual os principais sulfetos minerais presentes são: pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$) e arsenopirita (FeAsS). Preliminarmente, foram realizados ensaios de bio-oxidação em frascos agitados para promover a dissolução dos sulfetos minerais. O sólido remanescente foi submetido ao processo de extração de ouro em ensaios nos quais foi utilizado enxofre elementar (S°) como matéria prima para a produção de íons tiosulfato e, conseqüente solubilização do ouro contido por meio da formação de um complexo auro-tiosulfato ($\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$). Os resultados foram satisfatórios e obteve-se um máximo de 28,08% de extração de ouro após 28 dias de lixiviação.

Palavras chave: Lixiviação, biolixiviação, *Thiobacillus thioeparus*, ouro.

Abstract

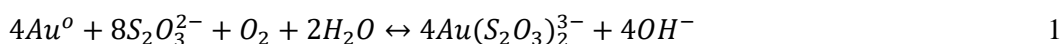
This study evaluated the potential of using a *Thiobacillus thioeparus* strain in the leaching of a gold concentrate in which the main mineral sulphides are: pyrite (FeS_2), pyrrhotite ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$) and arsenopyrite (FeAsS). Preliminarily, bio-oxidation tests were accomplished in stirred flasks to promote the dissolution of sulphide minerals. The remaining solid was subjected to the gold extraction process in tests in which elemental sulphur (S°) was used as the raw material for the production of thiosulphate ions and consequent solubilisation of the remaining gold particles by generating an auro-thiosulphate complex ($\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$). The results were satisfactory and a maximum gold extraction of 28.08% was reached after 28 days of leaching process.

Keywords: Leaching, bioleaching, *Thiobacillus thioeparus*, gold.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os processos hidrometalúrgicos, que podem ser utilizados na extração de ouro, está a lixiviação com tiosulfato. Um dos principais problemas desse processo é o elevado consumo desse reagente durante a extração; além disso, o processo é, geralmente, lento (HILSON e MONHEMIUS, 2005). Ainda assim, sua utilização tem sido considerada como uma rota alternativa à cianetação considerando a toxicidade do cianeto e o fato do uso ou transporte de cianeto ser proibido em alguns países. Dentre os esforços que têm sido envidados pelo grupo de pesquisa em biohidrometalurgia do CETEM, no desenvolvimento de rotas alternativas para a extração de ouro, está a pesquisa que visa o desenvolvimento de um processo biotecnológico de produção de tiosulfato.

Em pH baixo (inferior a 4) o tiosulfato é instável. A taxa de decomposição química depende da concentração de tiosulfato. Nas culturas em ambiente limitado em tiosulfato, a taxa de decomposição química é insignificante em comparação à taxa de bio-oxidação do tiosulfato devido às baixas concentrações de substrato residual. Da mesma forma, se o ouro estiver presente no sistema, para formar um complexo estável com o tiosulfato, o tiosulfato complexa o ouro, recém-oxidado pelo oxigênio, antes de ser oxidado fazendo, dessa forma, com que o ouro em seu estado elementar (Au^0) seja solubilizado. Para que a reação de solubilização do ouro aconteça é necessário, ainda, a presença de oxigênio que é o agente oxidante. O tiosulfato atua como agente complexante da reação para formar um complexo aniônico com íons $Au(I)$, como pode ser observado na Equação 1.



De acordo com Madigan *et. al.*, (2004) ocorre a geração de tiosulfato durante a bio-oxidação do enxofre elementar por bactérias dos gêneros *Thiobacillus* e *Acidithiobacillus* conforme a Equação 2, a seguir.



Formas reduzidas de enxofre podem ser oxidadas no solo por micro-organismos quimiolitotróficos, fotoautotróficos e heterotróficos. Segundo Ghosh e Roy (2006), diversas espécies aeróbias, quimiolitotróficas, e bactérias oxidantes de enxofre anaeróbias, fotolitotróficas, trabalham em sequência na natureza a fim de conduzir a porção oxidativa do ciclo do enxofre e disponibilizar sulfato assimilável para as plantas. No domínio Bacteria, os gêneros quimiolitotróficos obrigatórios mais comuns encontrados no solo pertencem, predominantemente, a Betaproteobacteria (*Thiobacillus*) e Gammaproteobacteria (*Acidithiobacillus*) (GOSH, 2009; DAM, 2009). Bactérias do gênero *Thiobacillus* são encontradas em vários tipos de solos podendo oxidar, aerobiamente, o tiosulfato, enxofre elementar, tetracionato e tionato. Trata-se de uma espécie Gram-negativa, com flagelos polares, autotrófica, incapaz de formar esporos, que cresce rapidamente em meio mineral contendo tiosulfato como fonte de energia e, geralmente, promove a formação de depósito de enxofre elementar. Esses depósitos de enxofre elementar (S^0) são especialmente comuns sobre placas de ágar e dão às colônias um aspecto que varia de branco leitoso a amarelo. O pH apropriado para o meio de cultivo deve se encontrar próximo à neutralidade ou levemente alcalino para se propiciar o crescimento desses micro-organismos; no entanto, há atividade na faixa de 4,5 a 7,2 (WHITE *et al.*, 1965).

2. OBJETIVO

Avaliar a capacidade de um cultivo de *Thiobacillus thioparus* na extração de ouro a partir de um concentrado de minério aurífero.

3. METODOLOGIA

3.1. Experimento de bio-oxidação (pré-tratamento)

Os ensaios de bio-oxidação foram conduzidos em frascos Erlenmeyers contendo sais inorgânicos como fonte de nutrientes: i) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 80,0 mg.L^{-1} ; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 80,0 mg.L^{-1} ; K_2HPO_4 8,0 mg.L^{-1} , pH 1,8; ii) Cultivo de *Leptospirillum ferrooxidans* (ATCC53992) previamente aclimatado; e iii) concentrado de minério aurífero. Os frascos foram incubados sob temperatura de 35°C e agitação orbital de 150 rpm. Ao longo do processo, foi realizado o monitoramento do potencial redox, e foram feitas as medições de pH sendo ajustado para 1,8 sempre que necessário por meio da adição de solução de H_2SO_4 5M. Foram utilizados frascos de sacrifício e, após o término do tempo de cada ensaio, o sobrenadante era filtrado e era feita a análise da concentração de ferro e de sulfato. A partir da disponibilização de sulfato na solução, calculou-se o percentual de oxidação de sulfeto ao longo do processo e, ao final, uma amostra representativa do sólido remanescente foi submetido a uma análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) para a determinação do teor de sulfeto.

3.2. Experimento de lixiviação com geração biológica de tiosulfato

Um cultivo da bactéria *Thiobacillus thioparus*, isolada a partir do sedimento de um dos lagos do CETEM, foi inoculado em frascos Erlenmeyers contendo 200 mL de meio S0 [Na_2HPO_4 : 1,2 g.L^{-1} ; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,205 g.L^{-1} ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 0,1 g.L^{-1} ; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 0,04 g.L^{-1} e $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: 0,02 g.L^{-1}] (HUTCHINSON, 1965) (pH 6,6) e, ainda, contendo 2,0 g de enxofre elementar (S°) e 10 g de concentrado aurífero previamente submetido ao processo de bio-oxidação. Os controles negativo (não inoculado) e positivo (não inoculado, mas com 40 mg de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) foram incluídos. Os frascos foram incubados sob temperatura de 30°C, agitação orbital de 150 rpm, na ausência de luz, por um período de 28 dias. Periodicamente, e sob condições assépticas, amostras foram retiradas para monitoramento do Eh, do pH, além das determinações das concentrações de sulfato e ouro dissolvido. Antes de cada amostragem era realizada a reposição da água evaporada nos frascos, sendo estimada pela perda de massa e compensada pela adição de água destilada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento de bio-oxidação (pré-tratamento)

A Figura 1 mostra a variação do potencial redox ao longo do processo. Nota-se que o potencial aumenta, gradativamente, indicando a evolução do processo oxidativo. Durante o processo, ocorre o aumento da concentração de ferro total devido à oxidação dos sulfetos minerais que contém ferro em suas estruturas, isto é, pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$), arsenopirita (FeAsS) e calcopirita (CuFeS_2). As flutuações nas concentrações das espécies iônicas de ferro (dados não mostrados) promovem a variação do potencial redox ao longo do experimento.

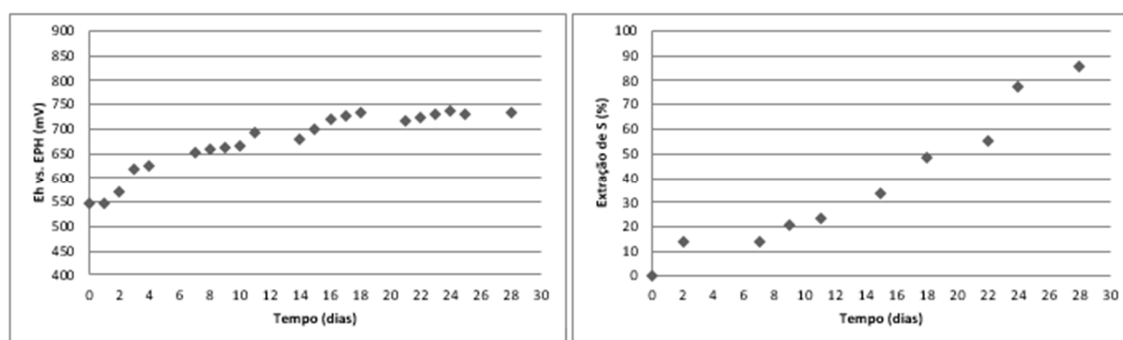


Figura 1: Variação de potencial e redox e extração de sulfetos ao longo do tempo de ensaio.

Convém comentar que ocorreu uma elevação do pH nas primeiras 24 horas; contudo, esse parâmetro não atingiu valor superior a 3. Essa elevação do pH está diretamente relacionada a reação do ácido sulfúrico com as espécies mineralógicas que compõem a ganga do concentrado que reagem facilmente com o ácido sulfúrico. Foi realizada a adição de ácido sulfúrico nos três primeiros dias, sendo adicionado o equivalente a 39 quilos de ácido por tonelada de concentrado.

Ao realizar a bio-oxidação como pré-tratamento do minério ou concentrado, que foram submetidos à cianetação, pretendeu-se reduzir o teor de sulfetos até que fossem alcançados teores que tornassem o processo mais custo-efetivo. Ao final do processo de bio-oxidação, a análise por FRX, mostrou que o teor de S, ao final do processo, era de 12,40%.

4.2. Experimento de lixiviação com geração biológica de tiosulfato

No início do processo de lixiviação, o pH da solução (Figura 2) se encontrava em 6,6 e no decorrer do processo ocorreram flutuações relacionadas a esse parâmetro devido às reações de geração de tiosulfato e dissolução de ouro. As Equações 1 e 2, anteriormente mencionadas, mostraram a formação de íons OH^- e H^+ no sistema reacional.

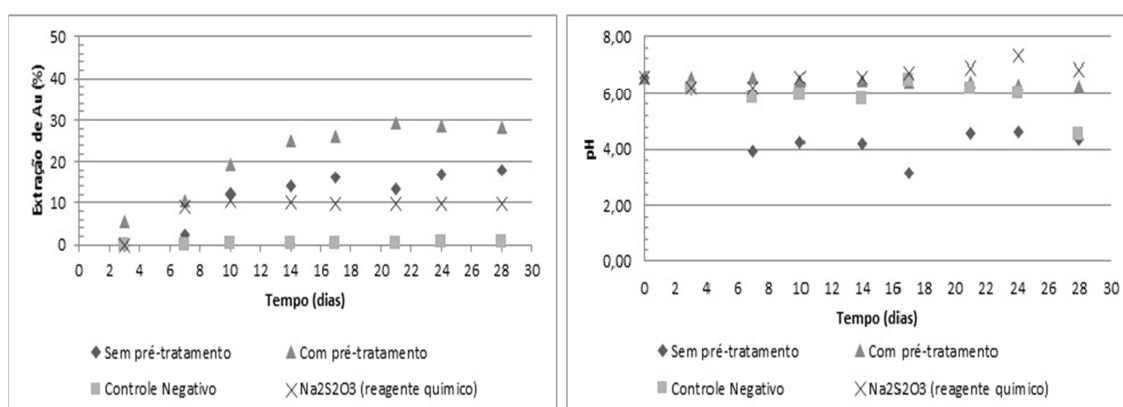


Figura 2: Extração de ouro e variação de pH nos ensaios de lixiviação.

Após 28 dias de processo, observou-se que a dissolução ocorreu de modo crescente, sendo alcançado, após 28 dias de teste, 28,02% de extração de ouro (Figura 2). O ouro dissolvido, detectado em solução, indicou que o tiosulfato produzido, como intermediário da reação de oxidação de sulfeto, ao longo do tempo, propiciou melhores resultados em comparação ao ensaio no qual se adicionou o reagente tiosulfato, onde foi observado uma extração de 9,91% do ouro contido. No caso da utilização desse mesmo concentrado sem a realização do pré-tratamento foi possível extrair 17,76% de ouro, visto que as partículas de ouro se encontravam, quase que na íntegra, liberadas para o acesso dos íons tiosulfato e, com isso, a dissolução do ouro.

A lixiviação do ouro a partir do tiosulfato gerado biologicamente se mostrou factível; embora com uma cinética pouco eficiente visto que a geração desses íons, a partir da oxidação do enxofre elementar, passa pela formação dos mesmos no caminho oxidativo da geração de íons sulfato. Entretanto, quando do surgimento de íons tiosulfato na presença de partículas de ouro metálico ocorre a dissolução desse metal com formação do complexo ouro-tiosulfato, o que demanda uma reposição desse íon complexante para que o processo de dissolução do ouro siga o seu curso. Esse processo de reposição não ocorre com a mesma eficiência que o processo de dissolução, acarretando uma diminuição da efetividade do processo extrativo. Por outro lado,

quando da geração biológica de íons tiosulfato, esses sofrem algo de degradação, devido à presença de luz, à sua transformação oxidativa em outras espécies mais oxidadas (*i.e.*, SO_3^{2-} , $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ e SO_4^{2-}), o que determina que condições experimentais sejam refinadas para que ocorram choques efetivos entre as partículas de ouro metálico e íons tiosulfato à medida que esses sejam gerados.

5. CONCLUSÕES

Com a realização dos experimentos de lixiviação com tiosulfato gerado por rota biotecnológica e, diretamente, no sistema reacional, conclui-se que existe a possibilidade de sua aplicação na extração de ouro, principalmente com a utilização de concentrados finamente cominuídos. Contudo, essa rota biotecnológica carece de estudos mais aprofundados, considerando, dentre outros parâmetros, o emprego de outras cepas bacterianas e a condução de experimentos de modo contínuo.

4 AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica, ao CETEM pela oportunidade de realização das atividades de iniciação científica, aos meus orientadores Dr. Luis Sobral e Dra. Débora Monteiro pelos ensinamentos e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GHOSH, W.; DAM, B. Biochemistry and molecular biology of lithotrophic sulphur-oxidation by taxonomically and ecologically diverse Bacteria and Archaea. **FEMS Microbiology**

GHOSH, W.; ROY, P. Ubiquitous presence and activity of sulphur-oxidizing lithoautotrophic microorganism in the rhizospheres of tropical plants. **Current Science Bangalore**, v. 91, p. 159-161, 2006.

HILSON, G., MONHEMIUS, A.J. “Alternatives to Cyanide in the Gold Mining Industry: What Prospects for the Future?”, **Journal of Cleaner Production**, 2005.

HUTCHINSON, M.; JOHNSTONE, K.I., WHITE, D. A **taxonomia of certain Thiobacilli**, *Jornal de microbiologia geral*, 1965, Cap. 41, p. 357-366.

MADIGAN, M.T., MARTINKO, J.M., PARKER, J., **Microbiologia de Brock**, São Paulo: Prentice Hall, 2004;

OLIVEIRA, Débora Monteiro. Potencial do tensoativo biológico (Rhamnolipídio) comercial na biolixiviação de minério primário de cobre. 2009. 94f. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

WHITE, H.A., The solubility of gold in thiosulphate and thiocyanate, **The Journal of the Chemical Metallurgical and Mining Society of South Africa**, 6, 109, 1905.