

BIOMINERAÇÃO: EXTRAÇÃO SUSTENTÁVEL E SILENCIOSA DE MINÉRIO

Eudocia Carla Oliveira de Araújo¹, Isabella da Rocha Silva¹, Janúbia da Silva Ferreira¹, Maria Lúcia da Silva Cordeiro¹, Glauciane Danusa Coelho².

¹Discente do curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos da Universidade Federal de Campina Grande -UFCG.
²Docente Adjunto. Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande.*Correspondência: Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande (CDSA-UFCG), Rua Luiz Grande, CEP 58540-000, Sumé, Paraíba. Email: glauciane@ufcg.edu.br.

RESUMO

Durante anos, o homem vem utilizando os minerais nas diversas atividades exercidas no planeta, provocando assim, a diminuição das reservas naturais de metais em todo o mundo. Além disso, o trabalho exercido nas minas subterrâneas é pesado e arriscado, deixando claro que sua extinção não só faria bem a humanidade como também ao meio ambiente. Nessa situação, é crescente a busca por métodos alternativos de extração que proporcione o aproveitamento eficiente destes bens minerais. Diante do exposto, a biomineração assume um papel extremamente significativo, possibilitando uma forma economicamente viável de extrair minerais da natureza através de um processo conhecido como biolixiviação ou bio-hidrometalurgia. Essa técnica apresenta muitas vantagens, tais como: baixos custos de investimento e de operação, não sendo necessária mão de obra especializada para sua operação, e não gera gases tóxicos, o que a torna ambientalmente mais aceita. O objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre biomineração com a abordagem dos principais aspectos do processo, a saber: micro-organismos envolvidos, mecanismos de biomineração e os fatores que influenciam no processo e aplicações da biomineração.

Palavras-chave: Micro-organismos; Biolixiviação; Bio-hidrometalurgia; Metais.

BIOMINING: EXTRACTION AND SUSTAINABLE SILENT ORE

ABSTRACT

For years, man has used minerals in the various activities performed on the planet, thus causing depletion of natural reserves of metals worldwide. In addition, the work performed in underground mines is heavy and risky, making it clear that their extinction would do well not only humanity but also the environment. In this situation, there is growing demand for alternative methods of extraction which provides the efficient exploitation of these minerals. Given the above, the biomining plays an extremely significant role, enabling an economically viable to extract minerals in nature through a process known as bioleaching and bio-hydrometallurgy way. This technique has many advantages, such as low investment costs and operation, isn't necessary skilled labor for its operation, and does not generate toxic gases, which makes it more environmentally acceptable. The goal of this paper is to present a literature review on biomining with the approach of the main aspects of the process, namely, micro-organisms involved, biomining mechanisms and factors that influence the process and applications of biomining.

Key words: Microorganisms; Bioleaching; Biohydrometallurgy; Metals.

INTRODUÇÃO

O significativo aumento na demanda dos bens minerais tem levado a constante diminuição das reservas naturais de metais em todo o mundo. Essa situação é agravada

pela elevada poluição ambiental causada pelos processos metalúrgicos, bem como os elevados custos para a extração dos metais. Além disso, acabar com esse trabalho pesado e muitas vezes arriscado, como no caso das minas subterrâneas, não só faria bem à humanidade como também ao meio ambiente. Diante do exposto, é crescente a busca por métodos alternativos que venham substituir os métodos tradicionais da atividade mineradora proporcionando a extração e o aproveitamento eficiente destes bens minerais (1).

Dentro deste contexto, a Biomineração assume importância significativa, uma vez que, a mesma possibilita uma forma economicamente viável de extrair esses metais da natureza, por meio de um processo conhecido como biolixiviação ou bio-hidrometalurgia(2).

A biolixiviação é um processo biotecnológico que se fundamenta na utilização de micro-organismos capazes de solubilizar metais pela oxidação de sulfetos metálicos (3). Esta técnica apresenta diversas vantagens quando comparada aos métodos tradicionais de extração, mas, destaca-se principalmente pela possibilidade da retirada eficiente de metais de interesse econômico a partir de materiais que apresentam baixos teores dos mesmos, permitindo o reaproveitamento dos resíduos deixados pela indústria mineradora, o que não é possível quando são empregadas as tecnologias convencionais.

Estudos de biolixiviação vêm ganhando especial interesse mostrando que além de ser usada na mineração, a biolixiviação pode ser aplicada como um método de reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos para recuperação de metais presentes em circuitos impressos. Esse processo pode também ser aplicado na solubilização de metais em lodo de esgoto, possibilitando a disposição final do lodo como condicionador de solos ou, como fertilizante. A biolixiviação destaca-se ainda como uma alternativa viável para a recuperação de áreas contaminadas com cobre (4).

Tendo em vista as questões apresentadas acima, o presente estudo objetivou revisar a produção científica referente à biolixiviação, presente na literatura específica sobre o assunto.

Biolixiviação

Em virtude do avanço da tecnologia mundial, houve um aumento considerável na demanda de bens minerais, e como resultado desse processo intensificou-se de forma rápida o esgotamento das reservas naturais, ocasionando dessa forma, o aumento da poluição ambiental por processos metalúrgicos. De acordo com Garcia et. al (6) esses problemas acabaram contribuindo para o desenvolvimento de métodos

alternativos na metalurgia que pudessem reduzir os efeitos negativos e suprir a demanda de metais de interesse econômico.

Entre os métodos alternativos de extração dos metais destaca-se a biolixiviação de sulfetos minerais, reconhecida hoje como uma metodologia interessante, sendo considerado um processo de recuperação de metais mediante ação de micro-organismos capazes de utilizar compostos inorgânicos como fonte energética para suas atividades metabólicas. Segundo Pradhan et al (6) a biolixiviação pode ser definida como um processo de dissolução de sulfetos minerais que resulta da ação de um grupo de micro-organismos.

Segundo Holmes (8) e Ehrlich (9) escritas chinesas descrevem o uso da biolixiviação cerca de dois mil anos atrás, sugerindo que a recuperação biológica de metais é uma das mais antigas utilizações da biotecnologia no mundo. Bosecker (10) também afirma que gregos e romanos poderiam ter usado processos biotecnológicos há dois mil anos atrás para extrair cobre. A partir da identificação dos micro-organismos como os responsáveis por esse processo, uma grande diversidade de micro-organismos úteis para a biolixiviação foram descobertos em todo o mundo (11).

Atualmente, a biolixiviação representa aproximadamente 20% da extração mundial de metais, a qual está sendo empregada em cerca de 20 minas no mundo (12). Países como Chile, Peru, Austrália, EUA, China dentre outros, aplicam a biolixiviação para a recuperação de cobre, ouro, urânio e zinco (2).

Segundo Garcia Junior e Bevilaqua(6) quando comparada às técnicas convencionais de mineração, a biolixiviação apresenta vantagens como, baixo investimento de capital inicial e baixo custo operacional; economia de insumos utilizados em processos hidrometalúrgicos convencionais (ácidos e agentes oxidantes) devido ao fato do próprio micro-organismo produzir tais insumos a partir de substratos presentes no minério; baixa exigência de energia, se comparado a um processo pirometalúrgico convencional; reduzida necessidade de mão de obra especializada na operação e menor impacto ambiental principalmente pela não emissão de SO₂.

Micro-organismos envolvidos no processo de biolixiviação

A biolixiviação consiste na utilização de micro-organismos capazes de promover a solubilização de determinados componentes presentes na amostra mineral(13). Segundo Garcia e Urenha (14) vários tipos de bactérias, fungos e algas têm seu habitat em depósitos minerais. A maioria dos organismos presentes são procariontes e muitos de variedade filogenética dos domínios Bacteria e Archaea (15-17).

Os micro-organismos capazes de causar a lixiviação de sulfetos minerais são acidófilos, quimiotróficos (adquirem energia a partir da oxidação de compostos inorgânicos), autotróficos (realizam a biossíntese de todos os constituintes celulares utilizando o dióxido de carbono CO_2 como único fonte de carbono) e são classificados de acordo com a temperatura em que se desenvolvem, distinguindo-se em mesófilos (até $\sim 40^\circ\text{C}$), termófilos moderados ($\sim 40 - \sim 55^\circ\text{C}$) e termófilos extremos ($\sim 55 - \sim 80^\circ\text{C}$) (18).

As bactérias do gênero *Acidithiobacillus*, oxidam os íon **ferroso**(Fe^{2+}) e enxofre (S) e suas formas reduzidas, são os principais micro-organismos envolvidos no processo de biolixiviação (19).

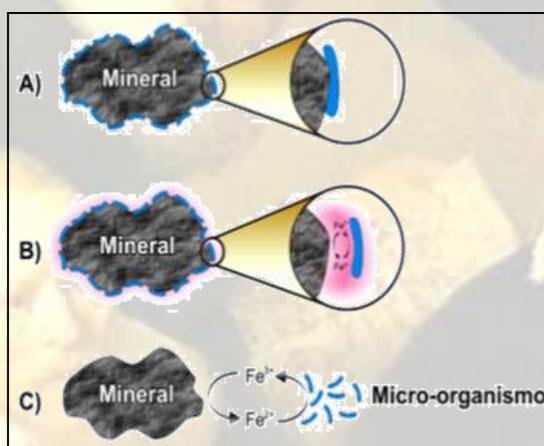
A bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* foi a primeira espécie isolada de regiões mineradas e, portanto, tem sido a mais amplamente estudada, tanto em estudos genéticos quanto em experimentos de biolixiviação(20). Por muitos anos, a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* foi considerada a espécie dominante em diversos sistemas de biolixiviação, em que a temperatura era inferior à 40°C (21). A referida bactéria se apresenta como bastonete Gram-negativo, não esporulado, com dimensões médias de $0,5$ a $0,6 \mu\text{m}$ de diâmetro por $1,0$ a $2,0 \mu\text{m}$ de comprimento, ocorrendo sozinho ou em pares, raramente em cadeias pequenas. As células móveis apresentam flagelo polar, e sua reprodução ocorre por divisão binária (22). É uma bactéria mesófila, com temperatura ótima de crescimento em torno de 30°C . É acidófila estrita com pH ótimo situado na faixa de $1,8$ a $2,5$ (23). Outra característica fisiológica marcante da espécie é sua generalizada resistência a elevadas concentrações de íons metálicos (24). Esse aspecto é de grande interesse prático no processo de biolixiviação, ao passo que a concentração de metais aumenta, gradativamente, no decorrer do processo de biolixiviação (2).

Mecanismos de Biolixiviação

De acordo com Crundwell (25), em um sistema de biolixiviação podem ocorrer três tipos de mecanismos. São eles: a) mecanismo de contato direto: ocorre interação da célula com a superfície do sulfeto mineral, seguindo-se um ataque enzimático aos componentes do mineral susceptíveis de serem oxidados, a exemplo do íon ferroso (Fe^{2+}). Nesse caso, o micro-organismo extrai elétrons diretamente do mineral, os quais são transferidos ao oxigênio (aceptor final de elétrons) após passagens por subsequentes reações bioquímicas; b) mecanismo de contato indireto. Nesse processo a interação entre o micro-organismo e o mineral é mediada por um polissacarídeo

extracelular (EPS). Estudos conduzidos por Rodrigués et. al (26) mostraram que a excreção de uma substância polimérica extracelular, é importante para a adesão microbiana, e há subsequente dissolução do mineral, pois o ferro, que se complexa ao material polimérico, confere carga positiva à célula. Dessa forma, é estabelecida uma atração eletrostática entre a célula microbiana e a superfície negativamente carregada de alguns minerais (26) e c) mecanismo indireto: o mineral é oxidado, quimicamente, pelo íon férrico (Fe^{3+}) em solução (26, 21).

Durante a oxidação química do mineral, o íon férrico (Fe^{3+}) é reduzido a íon ferroso (Fe^{2+}). A função do micro-organismo, nesse caso, é oxidar o íon ferroso (Fe^{2+}) a íon férrico (Fe^{3+}), regenerando, dessa forma, esse agente oxidante (1).



Fonte: Oliveira, 2009

Figura 1. Mecanismos de interação micro-organismo/substrato mineral propostos para a biolixiviação de sulfetos minerais.

Fatores que afetam a Biolixiviação

A biolixiviação, como qualquer outro processo que utiliza micro-organismos vivos, é influenciada por diversos fatores: temperatura, pH, pressão osmótica, disponibilidade de nutrientes, disponibilidade de oxigênio, carbono e metais tóxicos afetam o crescimento e a eficiência das bactérias no processo de biolixiviação (6).

Temperatura

A temperatura influencia, consideravelmente, o processo de dissolução de sulfetos minerais. A elevação, desde que dentro dos limites aceitáveis pelos micro-organismos, pode intensificar a extração do metal (1). Cada espécie bacteriana apresenta para o seu crescimento uma temperatura mínima, ótima e máxima. Acima da temperatura máxima de crescimento ocorre um decréscimo rápido do crescimento principalmente por inativação de sistemas enzimáticos necessários à célula (29).

pH

Na biolixiviação, o controle de pH é necessário para o crescimento das bactérias em faixa ideal e também para a solubilização dos metais (10). A maioria das bactérias cresce com pequenas variações de pH e próximos da neutralidade, entre 6,5 e 7,5. Poucas bactérias, como as acidófilas, são capazes de crescer em pH menor que 4,0 (29). Segundo Francisco Jr. (3) em um sistema de biolixiviação o pH é um indicativo da atividade bacteriana, pois a elevação ou diminuição de seus valores pode indicar, respectivamente, o consumo de ácido pelo substrato e pela bactéria ou a produção deste a partir das reações bioquímicas de oxidação do sulfeto.

Pressão osmótica

A presença de sais em uma solução, com consequente aumento da pressão osmótica pode ser indicio de morte bacteriana. Em relação à biolixiviação, altas concentrações de sais podem inibir o crescimento das bactérias (9).

Nutrientes

Segundo Jonglertjunya (29) por serem quimiotróficos micro-organismos envolvidos nos processos de biolixiviação possuem necessidades nutricionais relativamente simples, exigindo somente alguns nutrientes inorgânicos tais como nitrogênio (N) e fósforo (P), e traços de potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca) e cobalto (Co).

Disponibilidade de oxigênio

Os micro-organismos oxidantes de ferro e enxofre são aeróbios, dessa forma, é fundamental a disponibilidade de oxigênio dissolvido na superfície do mineral, sendo a concentração de oxigênio dependente do substrato energético utilizado e da concentração do mesmo (1).

Disponibilidade de Carbono

Nos processos de mineralização das substâncias carbonadas, com a consequente reposição do CO₂ à atmosfera, os micro-organismos heterotróficos têm relevante papel (30). A carência de CO₂ restringe o crescimento das bactérias, logo, o processo de biolixiviação pode ser afetado pela concentração de CO₂ disponível, principalmente em função do aumento de salinidade que ocorre nos sistemas de biolixiviação, quando a solubilidade dos gases é diminuída (2). Barron e Lueking (31),

estudando a influência da disponibilidade de CO_2 sobre o crescimento de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, verificaram máximos de atividade do micro-organismo para concentrações de CO_2 de 7 a 8%. No entanto, valores superiores a 8% causaram a inibição da cultura.

Concentração Celular

Dada a complexidade do sistema enzimático das bactérias lixiviantes, uma vez estabelecidas às condições mínimas propícias para seu desenvolvimento, ocorrerá a propagação celular e, como consequência, a biolixiviação. Nota-se, porém, que a taxa de oxidação microbiana tanto do íon ferroso (Fe^{2+}) quanto do enxofre (S) contido nos sulfetos minerais depende, entre outros fatores, da concentração de micro-organismos presentes no sistema reacional (6).

Granulometria

A extração de metais é mais eficiente quanto menor for a partícula da amostra mineral, pois um número maior de sítios de reação estará exposto para uma mesma massa total de partículas (2).

Potencial de oxirredução

Segundo Oliveira et. al (1) o potencial de oxi-redução da solução é determinado pela relação das concentrações de íon ferroso (Fe^{2+})/íon férrico (Fe^{3+}). A oxidação dos íons ferrosos, indicada pela elevação do potencial de oxi-redução, é uma indicação da dissolução dos sulfetos minerais e consequente, da solubilização do metal de interesse. O potencial de oxi-redução é uma referência para as taxas de oxidação das espécies iônicas de ferro, ao passo que representa a tendência da solução de ser oxidada ou reduzida, ou seja, a sua capacidade de capturar ou liberar elétrons (32).

Aplicações

Santos (33) investigou o efeito da adição de diferentes quantidades de pirita, sulfeto de ferro (FeS_2) no aumento da solubilização de cobre da calcopirita. Os estudos foram realizados por meio de ensaios respirométricos e de lixiviação em frascos agitados. O mesmo observou que a composição da mistura entre calcopirita e pirita nas proporções 1:3 e 1:1, favoreceu o efeito oxidativo bacteriológico dos substratos minerais, levando a recuperação aproximadamente 60 % de todo o cobre presente na amostra inicial.

Silva (34) avaliou o efeito da adição de nanopartículas polares e apolares no crescimento de *Acidithiobacillusferrooxidans* bem como a influência do material nanoparticulado estudado na biolixiviação da calcopirita por esse mesmo micro-organismo. Os ensaios de oxidação de íons ferrosos e de biolixiviação em frascos agitados constantemente a 150 rpm a 30°C, mostraram que a adição de nanopartículas polares de sílica nas concentrações 0,25%, 0,5% e 1,0%, apresentou maiores níveis de extrações de cobre em relação aos testes em que a referida partícula não foi utilizada. No entanto, altas concentrações (> 2,5%) de nanopartículas polares e apolares de sílica provocaram inibição no crescimento de *Acidithiobacillusferrooxidans*.

Yamane (35) realizou o estudo sobre a recuperação dos metais de interesse econômico presentes em placas de circuito de computadores obsoletos por meio de biolixiviação bacteriana do cobre, para posterior extração do ouro. Os estudos de biolixiviação foram conduzidos com o micro-organismo mesófilo *Acidithiobacillusferrooxidans*, a 30°C. Observou-se que a biolixiviação do material não-magnético de placas de circuito impresso de computador extraiu 99% do cobre nas seguintes condições definidas nos estudos de biolixiviação: 10% (v/v) de inóculo de bactérias adaptadas, 15gL⁻¹ de densidade de poupa, velocidade de rotação de 170 rpm, e concentração inicial de íon ferroso Fe⁺² de 6,75 gL⁻¹.

Villar (36) estudou a aplicação do processo de lixiviação bacteriana no lodo de esgoto gerado pela Estação de Tratamento de Esgoto do município de Franca-SP (ETE-Franca) para solubilização dos metais cromo, cobre, chumbo, níquel e zinco. O autor observou valores de solubilização final após o período de 7 dias para o lodo digerido e de 9 dias para o lodo não-digerido, respectivamente conforme apresentado na figura 2.

Cromo	38 e 36 %
Cobre	77 e 76 %
Chumbo	57 e 54 %
Níquel	95 e 94 %
Zinco	91 e 86 %

Figura 2. Porcentagens de solubilização final após o período de 7 dias para o lodo digerido e de 9 dias para o lodo não-digerido.

Tendo-se verificado que a utilização de lodo digerido ou não-digerido não afetava significativamente a eficiência do processo de lixiviação bacteriana. Encerrando este trabalho, pode-se afirmar que, de modo geral, o processo de lixiviação bacteriana dos elementos citados anteriormente. O trabalho afirmou que o processo de lixiviação

bacteriana aplicado a lodo de esgoto mostrou-se viável tecnicamente, e proporcionou uma higienização adicional do lodo pelo decaimento de bactérias indicadoras.

Francisco Jr et.al (2) estudaram o processo de oxidação microbiológica de uma complexa amostra mineral contendo molibdenita, pirita e pirrotita, caracterizando os produtos intermediários e finais do processo, fase aquosa e na fase sólida. Por meio da técnica de respirometria celular (técnica que indica rapidamente a capacidade, ou não, da bactéria em oxidar sulfetos metálicos) os autores observaram que a capacidade de *Acidithiobacillus ferrooxidans* em utilizar a amostra mineral em estudo está provavelmente associada à presença dos minerais de ferro e não, à molibdenita. Para os autores, baixa suscetibilidade da molibdenita ao ataque bacteriano provavelmente está relacionada com seu alto potencial de repouso o que, frente a outros minerais em um mesmo sistema de biolixiviação (no caso pirita e pirrotita), desfavorece sua dissolução oxidativa. Foi possível observar a importância do papel catalítico da *Acidithiobacillus ferrooxidans*, pois a mesma aumenta significativamente a velocidade de dissolução desses sulfetos, os quais são oxidados completamente, após 22 dias de ensaio. Em contrapartida, a molibdenita mostrou-se o sulfeto mais recalcitrante da amostra mineral.

Lima (11) realizou um estudo da extração de cobre por processo de lixiviação bacteriana, em coluna, simulando o processo de biolixiviação em pilha, a partir de concentrado de flotação de sulfetos de cobre, que continha calcopirita (CuFeS_2) e bornita (Cu_5FeS_4) como os únicos sulfetos presentes, os quais apresentavam cerca de 30% deste metal. Os ensaios empregaram consórcios de micro-organismos mesófilos, termófilos moderados e extremófilos, visando acelerar, em particular, a abertura da calcopirita presente no concentrado de flotação em questão. No ensaio de biolixiviação com agitação de 150 rpm obteve-se cerca de 82% de extração de cobre, e no ensaio de biolixiviação em coluna, alcançou-se um percentual de extração de cobre 89%. As análises de bioidentificação comprovaram a presença de micro-organismos mesófilos (*Leptospirillum spp.*), termófilos moderados (*Sulfobacillus spp.*) e termófilos extremos (*Sulfolobus spp.* e *Sulfolobus acidocaldarius*) durante todo o processo.

Oliveira (2) avaliou a influência de um tensoativo biológico (ramnolipídio) comercial na biolixiviação de uma amostra de minério primário de cobre em função da concentração de um consórcio microbiano constituído das espécies bacterianas *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*, nas concentrações de 10^6 células/mL de cada uma dos três isolados, visando intensificar a extração de cobre. No estudo verificou-se que as linhagens de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, de *Acidithiobacillus thiooxidans*

de *Leptospirillum ferrooxidans* mostraram-se capazes de promover a dissolução da calcopirita presente no minério primário de cobre em estudo, sendo que o melhor resultado foi obtido em presença do tensoativo na concentração de 5mg/L de ramnolípido, com a qual foi obtida uma extração de 64,6% ao final de 28 dias de experimento.

Ribeiro et al (37) procedeu um estudo de isolamento e seleção de bactérias mineralizadoras de fósforo em locais próximos a áreas de mineração no estado de Minas Gerais. Micro-organismos foram isolados a partir de amostras de solos coletadas nas margens de estradas próximas a uma área de mineração. Após um período de incubação de 9 dias, o número de colônias formadoras de halo desolubilização de fosfato (P) foi determinado. A partir das amostras analisadas, foram obtidos 150 isolados bacterianos capazes de mineralizar fósforo. Foi possível avaliar os isolados e selecionar, com base na formação de halo e potencial de liberação de P em meio líquido, duas espécies bacterianas ainda não identificadas, que no experimento receberam os nomes, B4 e B5.

Vasconcelos (38) mostra pesquisa desenvolvida na Universidade de São Paulo em conjunto com a Vale do Rio Doce na Mina do Sossego (Pará) para coleta e seleção de micro-organismos capazes de recuperar cobre em rejeitos minerais. Eles estão identificando micro-organismos que vivem na própria mina para uso no processo de aproveitamento do cobre dos rejeitos. O trabalho ainda está em fase inicial. Nos primeiros testes, foram encontrados cerca de trinta e cinco micro-organismos com potencial biominerador na barragem de rejeitos da referida mina.

Firmino, Rosa e Bevilaqua (39) utilizaram diferentes linhagens de *Acidithiobacillus ferrooxidans* da coleção pertencente ao laboratório de Biohidrometalurgia (IQ-UNESP) e a linhagem ATCC 23270. Para isto, as linhagens mencionadas foram utilizadas em estudos de cinética de oxidação de íons ferrosos na presença de diferentes concentrações de íons cloreto (mmol L^{-1}): 0, 50, 100, 200, 400 e 500. Estas mesmas linhagens foram testadas quanto à capacidade de oxidação da calcopirita na presença de 50mmol L^{-1} de íons cloreto, pois esta foi a concentração em que todas as linhagens não apresentaram inibição significativa. Nos ensaios de cinética de oxidação de íons ferrosos a linhagem que apresentou maior tolerância aos íons cloretos foi a linhagem denominada de AMF, que foi capaz de oxidar íons ferrosos na presença de todas as concentrações de íons cloretos testados. Em relação ao consumo de oxigênio as linhagens que apresentaram menores porcentagens de inibição na presença de cloreto foram: AMF, LR, V3, ATCC, PCEL, S e SJ22.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biomineração ou biolixiviação é uma alternativa biotecnológica à extração convencional de minérios, e pode ser aplicada para a obtenção de metais a partir de rejeitos da indústria mineradora, visto que, tais rejeitos apresentam baixos teores do metal de interesse e a utilização de procedimentos convencionais como a pirometalurgia e a hidrometalurgia são inviáveis, devido ao alto custo de operação dessas técnicas representando um passivo ambiental. Nesse sentido, é possível afirmar a existência de um aspecto de biorremediação abrangido pela biomineração.

É importante ainda ressaltar que biolixiviação permite a extração de diferentes tipos de minérios, o que não é possível nos modos de extração convencionais de metais. Diante disso, o interesse em estudos de biolixiviação é crescente e as pesquisas vêm demonstrando que a eficiência dessa tecnologia tem aumentado com a utilização de micro-organismos mesófilos e termófilos competentes, dentre os quais se destacam as espécies do gênero *Thiobacillus*.

Considerando que essa tecnologia possibilita o tratamento de rejeitos e a consequente geração de renda, espera-se que a biolixiviação venha se tornar uma técnica mais amplamente difundida entre as indústrias mineradoras, evitando-se dessa forma os impactos causados por meio da contaminação ambiental gerada pelos resíduos da indústria de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Oliveira DM, Sérvulo EFC, Sobral LGS, Peixoto GHC. Biolixiviação: utilização de micro-organismos na extração de metais. *Série Tecnologia Ambiental*. Rio de Janeiro. 2010; 40.
2. Oliveira DM. Potencialidade do tensoativo (ramnolípido) comercial na biolixiviação de minério primário de cobre [dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009; 94.
3. Francisco JrWE, Bevilaqua D, Garcia JrO. Estudo Da Dissolução Oxidativa Microbiológica De Uma Complexa Amostra Mineral Contendo Pirita (Fes₂), Pirrotita (Fe₁-Xs) E Molibdenita (Mos₂). *Quim. Nova*. 2007; 30:1095-1099.
4. Rossi G. *Biohydrometallurgy*. Hamburgo: McGraw-Hill. 1990; 1-7.
5. Neto WAR. Biolixiviação de minério de cobre da mina de Sossego, PA - Companhia Vale do Rio Doce [dissertação]. Araraquara: Universidade Estadual Paulista. 2007; 68.
6. Garcia JO, Bevilaqua D. *Microbiologia ambiental: micro-organismos, minerais e metais*. Jaguariúna: Embrapa. 2008; 49-81.
7. Pradhan N, Nathsarma KCS, Rao K, Sukla LB, Mishra BK. Heap bioleaching of chalcopyrite: A review. *Minerals Engineering*. 2008; 21: 355-365.
8. Holmes DS. *Review of International Biohydrometallurgy Symposium*, Frankfurt. 2007.
9. Ehrlich HL. Past, Present and Future of Biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 2001; 59: 127-134.
10. Bosecker K. Bioleaching: Metal Solubilization by Micro-organisms. *FEMS- Microbiology Reviews*. 1997; 20: 591-604.

11. ProCobre.org, de 25 outubro, 2014. Bactérias mineradoras: comem pedra e liberal cobre. Disponível em <http://www.procobre.org/pr/noticias/0309_03.htm>.
12. Lima RB. Biolixiviação de concentrado de flotação de sulfetos de cobre, em coluna, utilizando consórcios de micro-organismos mesófilos e termófilos [dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2011; 150.
13. Horta DG. Influência da adição da espécie *Acidithiobacillusferrooxidans* e de íons Cl⁻ na dissolução da calcopirita (CuFeS₂)[dissertação]. Araraquara: Universidade Estadual Paulista. 2008; 100.
14. Garcia JrO, Urenha LC. Lixiviação Bacteriana de Minérios. In: Urgel de Almeida Lima: Eugênio Aqarone; W. Schmidel. (Org). Biotecnologia Industrial- Processos Fermentativos Industriais. São Paulo: Edgard Blücher Editora.2001; 3: 485-512.
15. Johnson DB. Acidophilic Microbial Communities: Candidates for Bioremediation of Acidic Mine Effluents, International Biodeterioration & Biodegradation. 1995; 95: 41-58.
16. Backer BJ, Banfield JF. Microbial Communities in Acid Mine Drainage. FEMS- Microbiology Ecology. 2003; 44: 139-152.
17. Johnson DB. Biodiversity and Interactions of Acidophiles: Key to Understanding and Optimizing Microbial Processing of Ores and Concentrates. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008; 18: 1367-1373.
18. Schippers A. Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification and quantification. La Plata: Springer. 2007; 3-33.
19. Arena FA. Estudos físico-químicos e de lixiviação de calcopirita (CuFeS₂) por *Acidithiobacillusferrooxidans*[dissertação]. Araraquara: Universidade Estadual Paulista. 2010; 103.
20. Johnson DB. Importance of microbial ecology in the development of new mineral technologies, Hydrometallurgy. 2001; 59: 147-157.
21. Watling HR. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – A review. Hydrometallurgy. 2006; 84: 81-108.
22. Ehrlich HL, Newman DK. Geomicrobiology. 2008.
23. Donati ER, Sand W. Microbial processing of metal sulfides. La Plata: Springer. 2006; 3-33.
24. Novo MTM, Silva AC, Moreto R, Cabral PCP, Costacurta A, Garcia JrO, Ottoboni LMM. *Thiobacillusferrooxidans* response to copper and other heavy metals: growth, protein synthesis and protein phosphorylation. Antonie van Leeuwenhoek. 2000; 77: 187-195.
25. Crundwell FK. How do bacteria interact with minerals? Hydrometallurgy. 2003; 71: 75-81.
26. Rodriguez Y, Ballester A, Blazquez ML, Gonzalez F, Munoz JA. New information on the chalcopyrite bioleaching mechanism at low and high temperature, Hydrometallurgy. 2003; 71: 47-56.
27. Sand W, Gehrke T. Extracellular polymeric substances mediate bioleaching/biocorrosion via interfacial processes involving iron (III) ions and acidophilic bacteria Research in Microbiology. 2006; 157: 49-56.
28. Colling AV. Oxidação Da Pirita Por Via Bacteriana Em Rejeitos De Carvão Para A Produção De Sulfato Férrico [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010; 106.
29. Jonglertjunya W. Bioleaching of chalcopyrite. Department of Chemical Engineering, School of Engineering, the University of Birmingham, United Kingdom. 2003.
30. Ambiente Agropecuário, de 25 outubro, 2014. Ciclo do Carbono. Disponível em <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuaria/artigoagropecuaria/ciclodo_carbono.html>.
31. Barron JL, Lueking DR. Growth and maintenance of *Thiobacillusferrooxidans* Cells. Applied and Environmental Microbiology. 1990; 56:2801-2806.
32. Fossatti J, Bizani D, Kautzmann RM, Sampaio CH. Caracterização Físico-Química E Comparativa De Drenagem Ácida (DAM) Gerada Em Laboratório E Naturalmente Formada Em Áreas De Mineração De Carvão. Rio grande do sul. 2011.
33. Santos MS. Avaliação da atividade oxidativa do *Acidithiobacillusferrooxidans* sobre uma mistura composta de diferentes proporções dos sulfetos minerais pirita e calcopirita [dissertação]. Araraquara: Universidade Estadual Paulista. 2011; 66.

34. Silva DR. Efeito da adição de nanopartículas na biolixiviação da calcopirita (CuFeS_2) por *Acidithiobacillusferrooxidans* [dissertação]. Araraquara:Universidade Estadual Paulista. 2011; 81.
35. Yamane LH. Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2012.
36. Villar LD. Estudo Da Lixiviação Bacteriana De Metais Presentes Em Lodo De Esgoto Sanitário [dissertação]. São Paulo: Universidade Estadual Paulista. 2003.
37. Ribeiro VP, Abreu CS, Takahashi JA, Teixeira JA, Oliveira CA, Marriell E. Isolamento e seleção de bactérias mineralizadoras de fósforo em região de mineração no município de Vertentes. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Julho- Agosto de 2013. Florianópolis- SC. 2013.
38. Vasconcelos Y. Bactérias mineradoras. PESQUISA FAPESP 200.2012.
39. Firmino SM, Rosa T, Bevilaqua D. Biossolubilização da calcopirita (CuFeS_2) na presença de íons cloreto. 7 Congresso de Médio Ambiente. rev. AUGM. La Plata. 2012.