

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

**Biolixiviação: Utilização de Micro-organismos na
Extração de Metais**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

José Alencar Gomes da Silva

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sérgio Machado Rezende

Ministro da Ciência e Tecnologia

Luiz Antonio Rodrigues Elias

Secretário-Executivo

Luiz Fernando Schettino

Secretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

José Farias de Oliveira

Diretor do CETEM

Carlos César Peiter

Coordenador de Apoio à Micro e Pequena Empresa

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

Silvia Cristina Alves França

Coordenador de Processos Minerais

Cosme Antônio de Moraes Regly

Coordenador de Administração

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Planejamento, Acompanhamento e Avaliação

SÉRIE DE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN 978-85-61121-57-0

STA - 53

Biolixiviação: Utilização de Micro-organismos na Extração de Metais

Débora Monteiro de Oliveira

Bióloga, M.Sc., bolsista PCI CETEM/MCT

Eliana Flávia Camporese Sérvulo

Engenheira Química, D.Sc., professora adjunta da Escola de Química da UFRJ

Luis Gonzaga Santos Sobral

Engenheiro Químico, Ph.D., pesquisador titular do CETEM/MCT

Gabriel Henrique Costa Peixoto

Graduando em Química pelo FTESM, bolsista de iniciação científica CNPq do CETEM.

CETEM/MCT

2010

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Luis Gonzaga Santos Sobral

Editor

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Marisa B. de M. Monte (CETEM), Paulo Sérgio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos A. da Costa (UERJ), Fátima Maria Zanom Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virgínia S. Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minero-metalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Thatyana Pimentel Rodrigo de Freitas

Coordenação Editorial

Vera Lúcia Espírito Santo Souza

Programação Visual

Débora Monteiro de Oliveira

Editoração Eletrônica

Andrezza Milheiro da Silva

Revisão

Biolixiviação: utilização de micro-organismos na extração de metais / Débora Monteiro de Oliveira [et al.]. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

40p. (Série Tecnologia Ambiental, n.53)

1. Biolixiviação. 2. Micro-organismo. 3. Extração de metais. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Oliveira, Débora Monteiro. III. Servulo, Eliana F.C. IV. Sobral, Luis Gonzaga. V. Peixoto, Gabriel H. C. VI. Série.

CDD – 669.0283

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 BIOLIXIVIAÇÃO	9
2 MICRO-ORGANISMOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE BIOLIXIVIAÇÃO	11
2.1 <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	12
2.2 <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	13
2.3 <i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	14
3 MECANISMOS DE BIOLIXIVIAÇÃO	15
4 FATORES QUE AFETAM A BIOLIXIVIAÇÃO	21
4.1 Característica da amostra mineral	21
4.2 Disponibilidade de dióxido de carbono (CO ₂)	22
4.3 Disponibilidade de oxigênio (O ₂)	23
4.4 Temperatura	23
4.5 Nutrientes	24
4.6 Concentração celular	24
4.7 Tamanho de partícula	25
4.8 pH	26
4.9 Potencial de oxirredução e concentração de espécies iônicas de ferro	28
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

RESUMO

Ao longo dos anos, o homem vem utilizando os minerais nas diversas atividades exercidas no planeta. Contudo, nas últimas décadas, a busca incessante por melhorias na qualidade de vida tem concorrido para o crescente desenvolvimento tecnológico dos setores industriais associados à mineração e metalurgia para a produção de artefatos metálicos, impondo uma progressiva demanda pelos mais diversos tipos de metais. Se por um lado a demanda por metais é crescente, por outro, a indústria de mineração está diante do esgotamento das reservas contendo teores elevados de determinados metais (teores superiores a 1%). Isso impõe a necessidade de extrair metal a partir de minérios de baixos teores e de rejeitos. Para tanto são necessários processos que exijam baixos custos de investimento e de operação para que a extração não se torne algo inviável economicamente. Uma alternativa é a rota bio-hidrometalúrgica, mais especificamente a biolixiviação, através da qual é possível extrair os metais com baixo custo operacional. O objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre biolixiviação com a abordagem dos principais aspectos do processo, a saber: micro-organismos envolvidos, mecanismos de biolixiviação e os fatores que influenciam no processo.

Palavras-chave

Biolixiviação, metais, micro-organismos, acidófilos

ABSTRACT

Over the years, man has been using minerals in various activities carried out on the planet. However, in recent decades, the ceaseless search for improvements in quality of life is competing for the growing technological development of industrial sectors associated with the mining and metallurgy for producing metal artifacts, imposing a progressive demand by various types of metals. If on one hand the demand for metals is growing, on the other hand the mining industry is facing the depletion of certain high metal contents minerals (contents higher than 1%). That imposes the need to extract metals from low content ores and tailings. Therefore, low investment and operation extraction costs are needed so as to do it economically. An alternative is the bio-hydrometallurgical route, more precisely the bioleaching, through which it is possible to extract metals with low operational cost. This work aims at presenting a literature survey on bioleaching approaching the main aspects of the process, namely: the microorganisms involved, bioleaching mechanisms and factors influencing that process.

Keywords

Bioleaching, metals, microorganism, acidophiles

1 | BIOLIXIVIAÇÃO

A biolixiviação pode ser definida como um processo de dissolução de sulfetos minerais que resulta da ação de um grupo de micro-organismos (PRADHAN *et al.*, 2008). Essa tecnologia apresenta uma série de vantagens, tais como (WATLING, 2006):

- Economia dos insumos utilizados nos processos hidrometalúrgicos convencionais (ácidos e agentes oxidantes), uma vez que os micro-organismos podem produzir tais insumos a partir dos constituintes do minério;
- Baixo requerimento de energia se comparado a um processo pirometalúrgico, e mesmo aos processos hidrometalúrgicos, os quais dependem de reatores (abertos ou sob pressão);
- Baixo investimento de capital inicial e baixo custo operacional, devido à simplicidade das instalações utilizadas.

As principais técnicas utilizadas na operacionalização de processos de biolixiviação são: lixiviação em pilhas (*heap leaching*), lixiviação em montes (*dump leaching*) e lixiviação em tanques agitados (WATLING, 2006; PRADHAM *et al.*, 2008).

A lixiviação em pilhas consiste na deposição de grandes quantidades de minério sobre uma base impermeabilizada, com formação de uma pilha, formato de um tronco de pirâmide, cuja superfície é irrigada com uma solução ácida, às vezes com adição de micro-organismos lixiviantes. A solução percola através do leito mineral, e, ao chegar à base, é coletada em um tanque, de onde segue para a recuperação do metal de interesse. Em geral, a solução é recirculada pela pilha, quantas vezes forem necessárias, a fim de permitir a máxima extração do metal.

A lixiviação em montes ocorre em material depositado como rejeito. A maioria dos montes é formada próxima às minas, geralmente aproveitando a conformação natural do terreno.

Na biolixiviação em tanques agitados, a interação da solução ácida com o mineral é muito superior quando comparada aos sistemas estáticos (pilhas e montes) visto que ocorre maior contato entre os agentes oxidantes e a superfície do mineral. Nesse sistema é utilizado um grande reator que pode ser agitado mecanicamente ou por meio de injeção de ar, que, além da agitação, pode suprir a demanda de oxigênio e dióxido de carbono dos micro-organismos. Em vista da condução do processo, distintamente dos dois anteriormente referenciados, é possível controlar as variáveis de processo. Contudo, essa tecnologia é bastante limitada devido ao elevado custo de instalação. Por essa razão, ela é empregada somente na dissolução de minérios que contenham metais de elevado valor agregado, como ouro (KARAMANEV, MARGARITIS e CHONG, 2001).

A escolha do tipo de processo deve considerar, em particular, as características do minério, a sua susceptibilidade à biolixiviação, a quantidade a ser processada, a sua granulometria e os custos operacionais.

2 | MICRO-ORGANISMOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE BIOLIXIVIAÇÃO

Várias espécies de micro-organismos foram isoladas em ambientes onde ocorre a lixiviação natural de sulfetos minerais, a maioria já identificada. Em geral, após o isolamento, as espécies microbianas são caracterizadas fisiologicamente e filogeneticamente, e depositadas em coleções de culturas (HALLBERG e JOHNSON, 2001).

De um modo geral, os micro-organismos capazes de promover a lixiviação de sulfetos minerais são acidófilos, quimiotróficos (obtem energia a partir da oxidação de compostos inorgânicos), autotróficos (executam a biossíntese de todos os constituintes celulares utilizando o dióxido de carbono (CO₂) como única fonte de carbono) e são classificados de acordo com a temperatura em que se desenvolvem, distinguindo-se em: mesófilos (até ~40° C), termófilos moderados (~40 - ~55° C) e termófilos extremos (~55 - ~80°C) (SHIPPERS, 2007).

As bactérias mesófilas mais frequentemente isoladas em ambientes de lixiviação são linhagens das espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* (ROHWERDER, 2003; LAVALLE, 2005). Em geral, devido às similaridades fisiológicas e ambientais, essas bactérias coexistem simultaneamente, intensificando a solubilização dos metais constituintes dos sulfetos minerais.

Experimentos de biolixiviação, em geral, têm sido realizados com culturas puras ou mistas, em condição de mesofilia e termofilia (AKCIL, CIFTCI E DEVECI, 2007; FU *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2008; QIU *et al.*, 2008; PLUMB, MCSWEENEY e FRANZMANN, 2008). Entretanto, em vista do exposto, o processo conduzido com consórcios microbianos é tecnicamente mais vantajoso, além de ser mais representativo das condições de campo (pilhas e montes) ou operacionais quando o pro-

cesso é conduzido em tanques, dada à impossibilidade de se manter a pureza do cultivo nesse tipo de sistema.

2.1 | *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Essa 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 (JOHNSON, 2001). Por muitos anos, a bactéria *A. ferrooxidans* foi considerada a espécie dominante em diversos sistemas de biolixiviação, nos quais a temperatura era inferior a 40°C (WATLING, 2006). No entanto, essa não é, necessariamente, a espécie microbiana mais importante para os processos de biolixiviação. Alguns estudos recentes demonstraram que pode ocorrer uma grande variação das espécies microbianas envolvidas no processo de extração microbiológica de metais em função de diversos fatores, principalmente a temperatura (ZHANG *et al.*, 2008; PLUMB, MCSWEENEY e FRANZMANN, 2008; FU *et al.*, 2008).

A. ferrooxidans se apresenta como bastonete Gram-negativo, não esporulado, com dimensões médias de 0,5 a 0,6 µm de diâmetro por 1,0 a 2,0µm de comprimento, ocorrendo sozinho ou em pares, raramente em cadeias pequenas. As células são móveis por meio de flagelo polar, e sua reprodução ocorre por divisão binária (EHRlich e NEWMAN, 2008).

A energia necessária para a fixação do CO₂ atmosférico, bem como para outras funções do metabolismo, é obtida a partir da oxidação do íon ferroso e de compostos reduzidos de enxofre e de sulfetos minerais.

Esta bactéria é 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 (DONATI e SAND, 2006). Outra ca-

racterística fisiológica marcante dessa espécie é sua generalizada resistência a elevadas concentrações de íons metálicos (NOVO *et al.*, 2000). Esse aspecto é de grande interesse prático no processo bio-hidrometalúrgico, visto que a concentração de metais aumenta, gradativamente, no decorrer do processo de biolixiviação.

2.2 | *Acidithiobacillus thiooxidans*

A. thiooxidans é morfologicamente e, sob alguns aspectos, fisiologicamente semelhante à *A. ferrooxidans*, sendo a principal diferença entre ambas as espécies a incapacidade de *A. thiooxidans* de obter energia a partir da oxidação de íon ferroso. Comparativamente, *A. thiooxidans* é capaz de produzir e tolerar concentrações maiores de ácido sulfúrico (LIU, LAN e CHENG, 2004). Por isso, *A. thiooxidans* é capaz de crescer em ambientes com elevada acidez. Os valores limites de pH para seu crescimento são 0,5 (mínimo) e 5,5 (máximo), com pH ótimo compreendido na faixa de 2,0 a 3,0 (DONATI e SAND, 2006).

A espécie *A. thiooxidans* é capaz de atuar na oxidação de covelita (CuS), galena (PbS) e esfalerita (ZnS) (POGLIANI e DONATI, 2000; DONATI e SAND, 2006), embora seja incapaz de oxidar a pirita (FeS₂) (SAND, 2001). A espécie *A. thiooxidans* executa uma função importante nos sistemas de biolixiviação por ser capaz de oxidar enxofre elementar (S⁰) e, como consequência, produzir ácido sulfúrico, que contribui na manutenção do sistema reacional na faixa ácida de interesse.

O crescimento em S⁰ é favorecido pela excreção de metabólitos que atuam como agentes tensoativos, os quais facilitam a oxidação do enxofre elementar. Beebe e Umbreit (1971) relataram a presença de três diferentes fosfolipídios em meio exaurido (após o crescimento) para *A. thiooxidans*, tendo S⁰ (insolúvel)

como única fonte de energia. O fosfolipídio encontrado em maior proporção foi o fosfatidilglicerol.

2.3 | *Leptospirillum ferrooxidans*

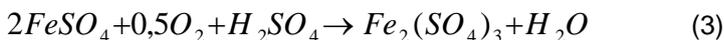
A bactéria possui forma de espirilo e sua movimentação se dá por meio de um único flagelo polar. Suas células, cujas dimensões variam de 0,2 a 0,4 μm x 0,9 a 1,1 μm , dividem-se por divisão binária.

O pH ótimo de crescimento se situa entre 1,5 e 3,0, sendo a faixa limite de pH de 1,3 a 4,0. A temperatura ótima encontra-se na faixa de 32 a 35° C. Porém, esta bactéria é considerada termo-tolerante, pois é capaz de suportar temperaturas de até 45°C; por esta razão, alguns autores a consideram termófila moderada, a exemplo de Johnson (2001).

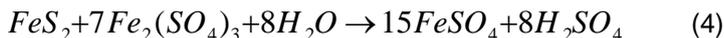
Essa bactéria é capaz de oxidar somente íon ferroso, e, comparativamente com *A. ferrooxidans*, possui maior afinidade com esta espécie iônica (ROHWEDER *et al.*, 2003; RAWLINGS, 2005). Rawlings, Tributsch e Hansford (1999), ao compararem a atividade metabólica de *L. ferrooxidans* com a de *A. ferrooxidans*, observaram que a primeira é capaz de promover maiores taxas de oxidação de íon ferroso em baixos valores de potencial de oxirredução (~600 mV vs. EPH), sendo capaz de sustentar maior atividade, inclusive em condições máximas de potencial de oxirredução (~830 mV vs. EPH). Isto demonstra sua alta afinidade com íons ferrosos e sua tolerância a concentrações elevadas de íons férricos.

3 | MECANISMOS DE BIOLIXIVIAÇÃO

A dissolução de sulfetos minerais ocorre naturalmente nas áreas de mineração e, durante muito tempo, foi considerada como um fenômeno puramente químico, decorrente de reações químicas oxidantes, mediadas por água e oxigênio atmosférico (PRADHAN *et al.*, 2008). A pirita (FeS_2), frequentemente encontrada associada a outros sulfetos minerais, pode ser oxidada com geração de sulfato férrico em águas de drenagem aeradas, de acordo com as Equações 2 e 3.



O sulfato férrico, gerado a partir da Equação 3, é um eficiente agente lixiviante/oxidante, capaz de promover a dissolução de sulfetos em geral, incluindo a calcopirita (CuFeS_2) e a pirita (FeS_2), retornando ao estado ferroso, como mostra a Equação 4 (YAHYA e JOHNSON 2002).



Contudo, as reações mostradas nas Equações 2 e 3 ocorrem muito lentamente na ausência de um catalisador (HEBERT, 1999), pois o íon ferroso é estável em meio ácido. Logo, a oxidação intermediada pelo íon férrico (Equação 4) também é lenta. Dessa forma, para que uma quantidade significativa de íons férricos seja gerada naturalmente numa pilha de lixiviação é necessário um longo período de tempo.

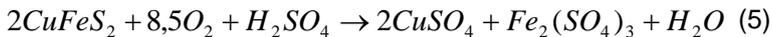
A descoberta de bactérias capazes de oxidar compostos inorgânicos contendo ferro e/ou enxofre redefiniu o conceito de lixiviação natural de sulfetos minerais como um processo primordialmente microbiológico, pois a velocidade de oxidação de diversos sulfetos minerais é acelerada, sensivelmente, na presença desses micro-organismos. De acordo com Hebert (1999), a

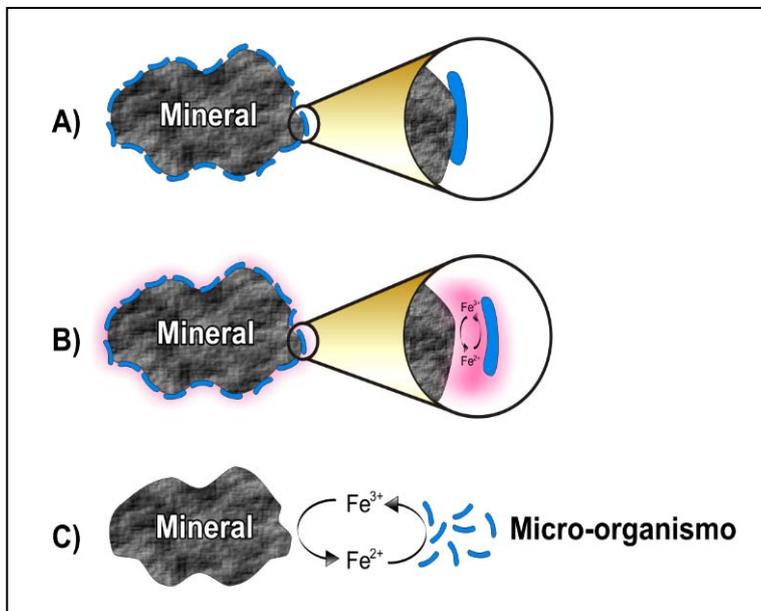
reação catalisada por *A. ferrooxidans* pode ser até 10^6 vezes mais rápida do que por reação puramente química oxidante (meio abiótico).

Em função da reação de formação do íon férrico (Equação 3), acreditava-se que a biolixiviação era um processo oxidante indireto. Entretanto, alguns estudos sugerem que existe interação direta entre o micro-organismo e a superfície do sulfeto mineral (CRUNDWELL, 2003; HARNEIT *et al.*, 2006; GHAURI, OKIBE e JOHNSON, 2007). A adesão dos micro-organismos à superfície do mineral também pode ser mediada por substâncias poliméricas extracelulares (EPS - *Extracellular Polymeric Substances*), as quais são produzidas por alguns dos micro-organismos lixiviantes, como *A. thiooxidans* (HUGUES *et al.*, 2008).

Em linhas gerais, de acordo com Crundwell (2003), em um sistema de biolixiviação podem ocorrer três tipos de mecanismos, os quais estão representados, esquematicamente, na Figura 1. São eles: mecanismo de contato direto, mecanismo de contato indireto e mecanismo indireto.

No mecanismo de contato direto ocorre a 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 Fe^{2+} (Figura 1A). Nesse mecanismo, o micro-organismo extrai elétrons diretamente do mineral, que após passagens por subseqüentes reações bioquímicas, são transferidos ao oxigênio (acceptor final de elétrons). O mecanismo de contato direto pode ser descrito pela Equação 5.





Fonte: Oliveira, 2009

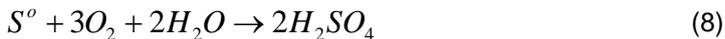
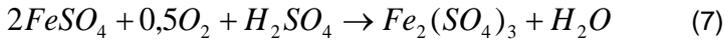
Figura 1. Mecanismos de interação micro-organismo/substrato mineral propostos para a biolixiviação de sulfetos minerais.

A descoberta de uma substância polimérica extracelular, de origem microbiana, contribuiu para elucidar os mecanismos de interação do micro-organismo com o substrato mineral (Figura 1B). Estudos conduzidos por Rodrigués *et al.* (2003) mostraram que a excreção de material exopolimérico é importante para a adesão microbiana, e a 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 (SAND e GEHRKE, 2006). A interação micro-organismo/mineral, mediada por EPS, é denominada como mecanismo de contato indireto (CRUNDWEL, 2003; WATLING, 2006).

No outro mecanismo, denominado mecanismo indireto (Figura 1C), o mineral é oxidado, quimicamente, pelo íon férrico (Fe^{3+}) em solução (CRUNDWEL, 2003; WATLING, 2006).



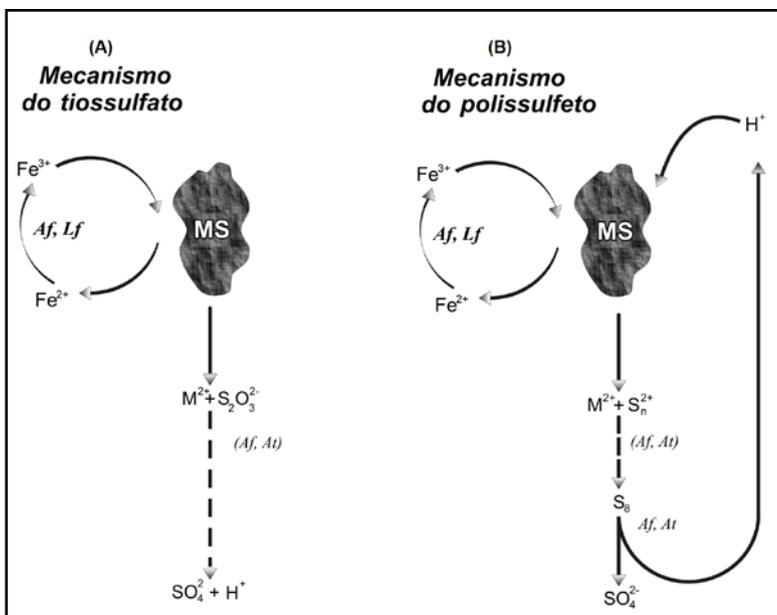
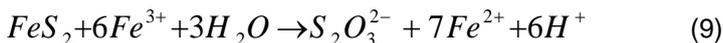
Durante a oxidação química do mineral, o íon férrico é reduzido a íon ferroso (Fe^{2+}). A função do micro-organismo, nesse caso, é oxidar o íon ferroso a íon férrico, regenerando, dessa forma, esse agente oxidante (Equação 7). Além disso, ao ocorrer a formação de enxofre elementar (Equação 6), é importante a ação oxidativa do micro-organismo (Equação 8), de modo a impedir a deposição do enxofre elementar sobre o mineral, que forma uma barreira para a difusão do agente oxidante até a superfície do mineral. Tal fato impediria a reação de oxidação dos constituintes do mineral (Equação 5).



Schippers e Sand (1999) e Sand *et al.* (2001) propuseram dois tipos de mecanismos indiretos de oxidação a partir da via pela qual ocorre a dissolução do sulfeto: mecanismo do tiosulfato e mecanismo do polissulfeto, os quais estão representados, de forma esquemática, na Figura 2.

O mecanismo do tiosulfato (Figura 2A) é observado nos sulfetos molibdenita (MoS_2), pirita (FeS_2) e tungstenita (WS_2), nos quais a dissolução ocorre apenas por ataque oxidativo, visto que não são passíveis de serem solubilizados por ataque pró-tônico. Portanto, a oxidação dos sulfetos pelo íon férrico gera tiosulfato (Equação 9) como intermediário, o qual a seguir é, também, oxidado pelo íon férrico, conforme Equação 10. Nesse caso, a função dos micro-organismos oxidantes do ferro é for-

necer o suplemento de íons férricos a partir da oxidação dos íons ferrosos (ACEVEDO e GENTINA, 2005).

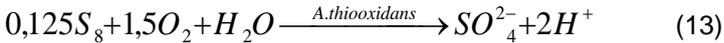
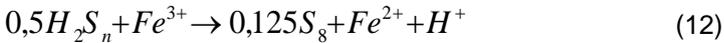
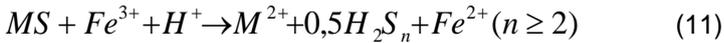


Fonte: Oliveira, 2009

Figura 2. Representação esquemática dos mecanismos de oxidação do tiossilfato e polissulfeto. Onde: M^{2+} : íon metálico; $S_2O_3^{2-}$: tiossilfato; S_n^{2-} : polissulfeto; S_8 : enxofre elementar; *A.f. Lf, At.* reação enzimática catalisada por *A. ferrooxidans*, *L. ferrooxidans* e/ou *A. thiooxidans*.

Diferentemente, a maioria dos outros sulfetos minerais pode ser dissolvida por ataque protônico (Figura 2B). De acordo com Shippers (1999), exemplos de sulfetos de grande importância industrial são: calcopirita ($CuFeS_2$), esfalerita (ZnS) e galena

(PbS). A dissolução desses sulfetos pode ser iniciada através do ataque de prótons (H^+) com geração de ácido sulfídrico (H_2S) como produto da reação (Equação 11). Convém ressaltar que o íon férrico é mais eficiente que os prótons na dissolução de sulfetos minerais (RAUTENBACH, 2007). Em ambiente ácido, o H_2S é oxidado gerando enxofre elementar (Equação 12), que é convertido, microbiologicamente, a sulfato, conforme Equação 13.



A diferenciação dos mecanismos com formação de tiosulfato e polissulfeto ocorre devido à estrutura cristalina do sulfeto mineral. No caso da pirita, da molibdenita e da tungstenita as bandas de valência são derivadas somente dos orbitais dos átomos de metais, enquanto que para todos os demais sulfetos minerais, as bandas de valência são derivadas de ambos os orbitais, isto é, do metal e do enxofre. Consequentemente, as bandas de valência da pirita, molibdenita e tungstenita não contribuem para a quebra da ligação entre o metal e o enxofre. Esta ligação pode somente ser quebrada por várias etapas de oxidação pela ação do agente oxidante (Fe^{3+}). Já no caso do mecanismo do polissulfeto, os sulfetos rompem a ligação que existe entre o metal e o enxofre antes que o enxofre seja oxidado.

4 | FATORES QUE AFETAM A BIOLIXIVIAÇÃO

Independentemente do tipo de processo e da escala de trabalho (bancada, semi-piloto, piloto ou industrial), diversos fatores influenciam diretamente a biolixiviação de sulfetos minerais, sendo eles físicos, químicos e microbiológicos. A seguir, um breve comentário sobre os principais fatores.

4.1 | Característica da Amostra Mineral

A dissolução de sulfetos minerais, seja por agentes químicos oxidantes ou por ação de micro-organismos, depende da natureza dos minerais, ou seja, da sua composição química e da origem do minério.

Na oxidação de misturas complexas de sulfetos minerais, as interações eletroquímicas podem exercer efeitos significativos (WATLING, 2006), pois quando dois sulfetos minerais estabelecem contato no meio de lixiviação, uma célula galvânica é formada. Dessa forma, de acordo com as associações minerais existentes na amostra, da qual se pretende extrair o metal de interesse, o sulfeto mais ativo do par irá sofrer corrosão, enquanto o outro, de menor atividade, estará catodicamente protegido (CRUZ *et al.*, 2005). Liu, Li e Zhou (2007) demonstraram que no par constituído por calcopirita (CuFeS_2) e pirita (FeS_2), a calcopirita é oxidada preferencialmente à pirita, uma vez que seu potencial de repouso é menor do que o da pirita, tornando-a menos nobre.

A contribuição da interação galvânica nos processos de biolixiviação pode variar, significativamente, dependendo de alguns fatores. Entre os mais importantes estão: a diferença entre os potenciais de repouso; a área superficial relativa entre o catodo e o anodo (um anodo menor em contato com um catodo maior facilita a dissolução anódica); a distância entre os sulfetos; o

tempo de duração do contato; a condutividade do mineral e do eletrólito; as propriedades do eletrólito tais como: pH, sais dissolvidos, presença ou ausência de oxigênio, de outros pares redox e de micro-organismos.

4.2 | Disponibilidade de dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono atmosférico é utilizado pelos micro-organismos como fonte de carbono, cuja assimilação se dá através do ciclo de Calvin (MADIGAN, MARTINKO e PARKER, 2004). 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.

Barron e Lueking (1990), estudando a influência da disponibilidade de CO₂ sobre o crescimento de *A. ferrooxidans*, verificaram máximos de atividade do micro-organismo para concentrações de CO₂ de 7 a 8%. No entanto, valores superiores a 8% causaram a inibição da cultura.

Gómes, Blásquez e Ballester (1998) avaliaram a biolixiviação de uma amostra de concentrado mineral contendo esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS₂) e pirita (FeS₂), com tamanho de partícula inferior a 30 µm, em experimentos conduzidos em frascos agitados com cultura mista composta por *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans* e *L. ferrooxidans*. A eficiência de extração dos metais não variou com o aumento da concentração de CO₂ de 0,03 para 1% v/v. Ao final de 10 dias de processo, os autores determinaram percentuais de extração de 80% de zinco (Zn), 30% de cobre (Cu) e 20% de ferro (Fe).

Já Witne e Phillips (2001) obtiveram um incremento de 56% na extração de cobre a partir da biolixiviação de uma amostra

complexa de minério de cobre, ao insuflar 10% de CO₂, em sistema de tanque agitado.

Cabe, ainda, destacar que a simples presença de carbono orgânico pode inibir o crescimento de alguns micro-organismos autotróficos. Garcia (1991) relatou a impossibilidade de realizar o cultivo de *A. ferrooxidans* em meio solidificado com Agar. A inibição do crescimento foi atribuída ao efeito inibitório dos açúcares. Segundo o autor, para o cultivo dessa espécie em meio de cultura solidificado, deve ser utilizada agarose, a forma purificada desse polissacarídeo.

4.3 | Disponibilidade de oxigênio (O₂)

Os micro-organismos oxidantes de ferro e enxofre são aeróbios; portanto, para que a biolixiviação se estabeleça, é fundamental a disponibilidade de oxigênio dissolvido na superfície do mineral, sendo a concentração de oxigênio dependente do substrato energético utilizado e da sua concentração. No caso da pirita, por exemplo, como visto na Equação 2 (página 10), são necessários quatro átomos de oxigênio para cada átomo de enxofre.

A disponibilidade de oxigênio em sistemas estáticos é restrita devido à baixa difusão do ar e à limitada superfície de lixívia a ele exposta. Por essa razão, na confecção de uma pilha de biolixiviação são instaladas tubulações por onde é insuflado ar, quando da operação da pilha (KELLY, 2008).

4.4 | Temperatura

A temperatura influencia, consideravelmente, o processo de dissolução de sulfetos minerais. Sua elevação, desde que den-

tro dos limites aceitáveis pelos micro-organismos, pode intensificar a extração do metal.

A dissolução dos sulfetos é favorecida pela elevação da temperatura mesmo que na ausência de micro-organismos. Na lixiviação química de concentrado de calcopirita (CuFeS_2) e molibdenita (MoS_2), mediada por íons férricos, foram obtidos percentuais de extração de cobre 30, 60 e 100% para 30, 45 e 68° C, respectivamente (ROMANO *et al*, 2001).

Convém ressaltar a importância de utilizar culturas mistas em sistemas de biolixiviação, principalmente em montes e em pilhas, onde ocorrem variações de temperatura. Dessa forma, cada uma das distintas espécies presentes poderá exercer sua atividade metabólica à medida que as condições ambientais favoráveis forem sendo estabelecidas.

4.5 | Nutrientes

Por serem quimiotróficos, os micro-organismos envolvidos nos processos de biolixiviação possuem necessidades nutricionais relativamente simples, exigindo, somente, alguns nutrientes inorgânicos, tais como nitrogênio (N), fósforo (P), traços de potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca) e cobalto (Co) (JONGLERTJUNYA, 2003). Dependendo da composição da amostra mineral, as exigências nutritivas dos micro-organismos podem ser supridas pelas impurezas presentes nos minérios e em águas de minas (PRADHAN *et al.*, 2008).

4.6 | Concentração celular

Dada a complexidade do sistema enzimático das bactérias lixiviantes, uma vez estabelecidas as condições mínimas propícias para seu desenvolvimento, ocorrerá a propagação celular e,

como consequência, a biolixiviação. Notae-se, porém, que a taxa de oxidação microbiana tanto do íon ferroso quanto do enxofre contidos nos sulfetos minerais depende, entre outros fatores, da concentração de micro-organismos presentes no sistema reacional (PRADHAN *et al.*, 2008). Deste modo, se presentes naturalmente em pequeno número, convém adotar a inoculação, a fim de obter quantidades adequadas de células e evitar taxas reduzidas de extração do metal. Neste caso, deve ser levada em consideração a área superficial dos minerais para que o número de células seja condizente com os sítios de captação do mineral a ser oxidado.

4.7 | Tamanho de partícula

Reduzir o tamanho de partícula de uma determinada amostra mineral significa aumentar a área superficial específica, isto é, aumentar a disponibilidade de substrato energético ao ataque químico e microbiano. Logo, a extração de metais é mais eficiente quanto mais finamente dividida estiver a amostra mineral, pois um número maior de sítios de reação estará exposto para uma mesma massa total de partículas.

Por muito tempo o emprego de material finamente dividido só tinha aplicação em experimentos de laboratório ou em reatores agitados. Era, pois, a sua aplicação em pilhas de biolixiviação considerada algo impossível. No entanto, existem, atualmente, metodologias que permitem a construção de pilhas de biolixiviação com amostras minerais finamente divididas. Para tanto, é utilizado um suporte (por exemplo, minério marginal) que é recoberto com uma polpa constituída de amostra mineral e solução ácida (HARVEY, SHIELD e CROWELL, 1999; PETERSEN e DIXON, 2002; HARVEY e STANEK, 2002).

Convém ressaltar que o tamanho ótimo de partícula para qualquer processo de lixiviação é determinado pelos benefícios que podem ser obtidos a partir da aceleração do processo de extração do metal. Entretanto, devem ser levados em consideração os aspectos econômicos que envolvem o Índice de Trabalho de Bond (*Bond Working Index*), que, de acordo com Almeida e Figueira (2002), é o trabalho necessário e a energia consumida (em kWh/t) para reduzir a granulometria da amostra mineral, desde um tamanho inicial até uma granulometria 80% passante em peneira de 100 μm .

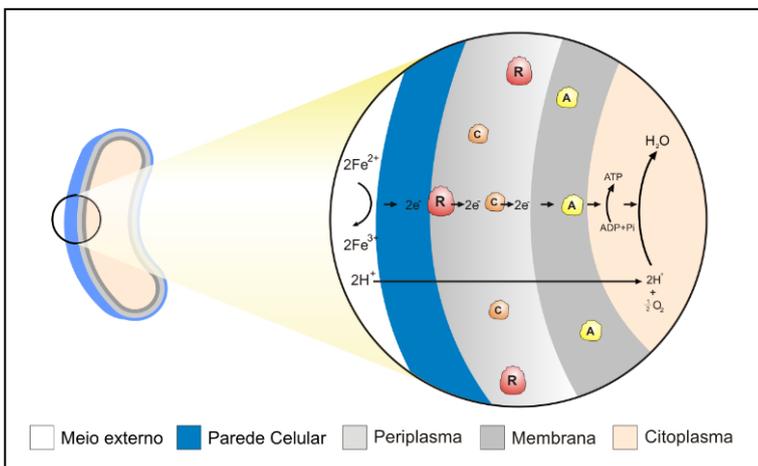
4.8 | pH

O ajuste do pH é uma condição necessária para a solubilização dos compostos metálicos, principalmente ao se trabalhar com minérios que possuam ganga associada (LEAHY e SCHARZ, 2009). Além disso, o controle desse parâmetro é condição básica para minimizar a hidrólise dos íons férricos na solução, com consequente precipitação de hidróxidos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeOOH etc.) (DAOUD e KARAMANEV, 2006) e esgotamento do íon ferroso, necessário para a manutenção do metabolismo celular.

Por serem acidófilos, os micro-organismos empregues em processos de biolixiviação são, obviamente, dependentes do ambiente ácido para sua sobrevivência. De acordo com Madigan, Martinko e Parker (2004), os prótons alcançam o citoplasma de *A. ferrooxidans* por intermédio de enzimas específicas localizadas na membrana celular (ATPases translocadoras de prótons). Intracelularmente, eles são consumidos na redução do O_2 que participa da cadeia respiratória como acceptor final de elétrons com formação de água (H_2O).

A Figura 3 mostra, de forma esquemática, o papel fundamental dos prótons no metabolismo de *A. ferrooxidans*, mais especifi-

camente, sua participação no fluxo de elétrons captados durante a oxidação do ferro presente no ambiente extracelular.



Fonte: Oliveira, 2009

Figura 3. Esquema representativo do sistema de captação e transferência de elétrons durante a oxidação do íon ferroso, bem como transporte de prótons (H^+) para o interior da célula de *A. ferrooxidans*. R: rusticianina. C: citocromo c; A: citocromo a.

Nota-se que a rusticianna (proteína periplasmática que contém cobre em sua estrutura) é o acceptor imediato de elétrons provenientes da oxidação do Fe^{2+} . A partir do periplasma, os elétrons são transferidos ao longo de uma pequena cadeia transportadora, acarretando a redução de O_2 a H_2O , conforme as Equações 14, 15 e 16.



Existe a necessidade de íons H^+ para redução do O_2 e para estabelecer um gradiente elétrico através da membrana. Além disso, íons H^+ são, também, necessários para a redução de nucleotídeos e pirimidinas (NAD e NADP), os quais são necessários para a fixação do CO_2 atmosférico.

Como o pH ótimo de crescimento de *A. ferrooxidans* é 1,8 e o pH intracelular situa-se próximo da neutralidade (6,0), esse ΔpH confere o gradiente à membrana e, conseqüentemente, o potencial elétrico requerido na formação de ATP, bem como o suprimento necessário de H^+ para redução de O_2 e de algumas reações necessárias para a fixação do carbono. Em suma, isso explica a natureza acidófila obrigatória de *A. ferrooxidans* e dos demais micro-organismos acidófilos envolvidos na biolixiviação, além de ressaltar a importância de realizar o monitoramento do pH e seu ajuste, a partir da adição de ácido, sempre que necessário.

4.9 | Potencial de oxirredução e concentração de espécies iônicas de ferro

O potencial de oxirredução (*Eh*) acena para a tendência de um dado elemento doar ou receber elétrons; portanto, é um parâmetro indicativo da capacidade oxidante de um eletrólito. Nos sistemas de biolixiviação, o *Eh* da solução é determinado pela relação entre as concentrações das espécies iônicas de ferro (Fe^{2+} e Fe^{3+}). A oxidação dos íons ferrosos, indicada pela elevação do potencial de oxirredução, é um indício da dissolução dos sulfetos minerais que contém ferro e, conseqüentemente, da solubilização do metal de interesse (RAWLINGS, TRIBUTSCH e HANSFORD, 1999).

A Equação de *Nernst* (Equação 17), a qual espelha situações de equilíbrio termodinâmico entre espécies iônicas, demonstra

que, nos sistemas de biolixiviação, qualquer alteração nas concentrações de Fe^{3+} e Fe^{2+} altera o valor do potencial padrão (MERUANI e VARGAS, 2003). Portanto, por ser um sistema dinâmico, com frequentes flutuações de concentrações dessas espécies iônicas, o valor do potencial redox varia proporcionalmente a essas flutuações.

$$Eh = E^{\circ}_{Fe^{3+}, Fe^{2+}} + \frac{RT}{nF} \log \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}]} \quad (17)$$

Onde:

Eh : Potencial (V vs. EPH) medido, experimentalmente, com eletrodo de platina contra $Ag^0/AgCl$;

E° : Potencial padrão (V) do par Fe^{3+}/Fe^{2+} (EPH);

R: Constante dos gases $8,31441 \text{ Joule.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$;

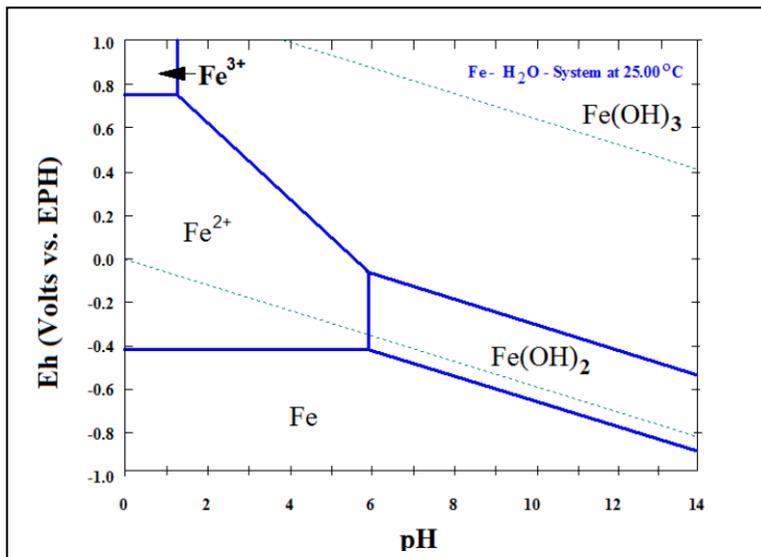
T: Temperatura em graus *Kelvin*;

F: Constante de *Faraday* ($96493,5 \text{ Coulombs.mol}^{-1}$); e

n: Número de elétrons envolvidos na reação (nesse caso, 1 elétron)

Por estar intimamente relacionado com as concentrações das espécies iônicas de ferro, o Eh pode ser usado para definir se as condições experimentais são favoráveis à manutenção dos íons férricos no sistema reacional, como pode ser observado no diagrama de equilíbrio termodinâmico do sistema $Fe-H_2O$ (Figura 4). É possível notar que a região de estabilidade do íon férrico é muito restrita, dependente de elevados valores de potencial de oxirredução em combinação com baixos valores de pH. Por esta razão, a precipitação do Fe^{3+} , nos sistemas de biolixiviação, nas formas insolúveis supracitadas ($Fe(OH)_3$, $FeOOH$ etc.), é um inconveniente que deve ser evitado, pois, além de dificultar o processo de extração do metal, por restringir o acesso dos micro-organismos à superfície do sulfeto mineral,

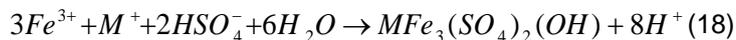
pode, adicionalmente, aprisionar nutrientes, íons férricos e metais em sua estrutura.



Fonte: Software HSC (Outotec).

Figura 4. Diagrama de equilíbrio termodinâmico (Eh-pH) do sistema ferro-água à 25°C.

Segundo Daoud e Karamanev (2006) e Leahy e Schawrz (2009), dentre os precipitados férricos formados durante a biolixiviação está a jarosita, um oxi-sulfato duplo de ferro, cuja formação, num sistema de biolixiviação pode ocorrer conforme a Equação 18, onde M pode ser K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ag^+ ou H_3O^+ .



Jiang e Lawson (2006) determinaram maior quantidade de jarosita formada em pH 2,2, em experimentos conduzidos em valores de pH variando de 1,8 a 2,2. Esse resultado já era esperado, pois, conforme observado na Figura 4, a elevação do pH acarreta a formação dos precipitados de ferro. Daoud e

Karamanev (2006) estudaram, também, a formação de jarosita durante a oxidação do íon ferroso por *A. ferrooxidans*, em função do tempo de oxidação, do pH e da temperatura. Eles concluíram que o pH é o principal parâmetro que afeta a formação de jarosita; as menores taxas de formação desse composto cristalino foram determinadas para pH de 1,6 a 1,7 a 35°C. Contudo, convém salientar que variações de temperatura influenciam, consideravelmente, a precipitação das espécies iônicas de ferro. Isto é, à medida que a temperatura se eleva, ocorre aumento na taxa de formação de jarosita, conforme afirmam Kinnunen e Puhakka (2003).

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por muito tempo, a biolixiviação foi considerada como um processo inadequado para aplicação em sulfetos refratários, a exemplo da calcopirita (CuFeS_2). Entretanto, com o avanço das pesquisas e com a utilização de micro-organismos termófilos, essa rota bio-hidrometalúrgica tem sido considerada em inúmeras unidades industriais. De um modo geral, o objetivo das minerações é utilizar em seus processos extrativos uma tecnologia que permita o processamento de minérios e/ou concentrados de minerais e a obtenção do metal a custos mais competitivos quando comparados às vias convencionais de processamento, que, na maioria das unidades produtivas é o beneficiamento por flotação, seguido de um processo pirometalúrgico, o qual possui elevado custo de implementação e de operação. Entre outras vantagens, o processo biológico não emite os gases poluentes e impactantes do processo pirometalúrgico, que podem conter metais pesados como cádmio, arsênio, mercúrio, bismuto, chumbo etc. Além disso, a biolixiviação, quando comparada ao processo convencional, apresenta uma redução de custos de operação e de investimento superiores a 50%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, F.; GENTINA, J. C. (editores), **Fundamentos e Perspectivas Biomineras**, Ediciones Unversitarias Valparaiso, 2005.
- AKCIL, H.; CIFTCI; DEVECI, H., Role and contribution of pure and mixed cultures of mesophiles in bioleaching of a pyritic chalcopyrite concentrate **Minerals Engineering**, v. 20, p. 310–318, 2007.
- BARRON, J.L.; LUEKING, D. R. Growth and maintenance of *Thiobacillus ferrooxidans* Cells. **Applied And Environmental Microbiology**, v. 56, p. 2801-2806, 1990.
- BEEBE, J. L.; UMBREIT, W. W. Extracellular lipid of *Thiobacillus thiooxidans* **Journal of bacteriology**, p. 612-614, 1971.
- CRUNDWELL, F.K. How do bacteria interact with minerals? **Hydrometallurgy** v. 71, p. 75-81, 2003.
- CRUZ, R., LUNA-SÁNCHEZ, R.M., LAPIDUS, G.T., GONZÁLEZ, I., MONROY, M. An experimental strategy to determine galvanic interactions affecting the reactivity of sulfide mineral concentrates. **Hydrometallurgy**, v. 78, p. 19, 8-208, 2005.
- DAOUD, J.; KARAMANEV, D. Formation of jarosite during Fe²⁺ oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Minerals Engineering** v. 19, p. 960-967, 2006.
- DONATI, E. R.; SAND, W. **Microbial processing of metal sulfides**. La Plata: Springer, Cap. 1, p. 3-33. 2007.
- EHRlich, H. L.; NEWMAN, D. K., **Geomicrobiology**, 5ª Edição, 2008.

- FU, B., ZHOU, H., ZHANG, R., QIU, G. Bioleaching of chalcopyrite by pure and mixed cultures of *Acidithiobacillus* spp. and *Leptospirillum ferriphilum*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 62, p. 109-115, 2008.
- GARCIA, JR. O. Isolation and purification of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans* from some coal and uranium mines of Brazil. **Revista de Microbiologia**, v. 20, p.1-6, 1991.
- GHAURI, M. A.; OKIBE, N.; JOHNSON, D. B. Attachment of acidophilic bacteria to solid surfaces: The significance of species and strain variations **Hydrometallurgy**, v. 85, p. 72-80, 2007.
- GÓMEZ, C., BLÁZQUEZ, M.L., BALLESTER, A. Bioleaching of a Spanish Complex Sulphide Ore Bulk Concentrate, **Minerals Engineering**, v. 12, p. 93-106, 1999.
- HALLBERG, K.B.; JOHNSON, D.B., Biodiversity of acidophilic prokaryotes. **Advances in Applied Microbiology**, v. 49, p. 37-84, 2001;
- HARNEIT, K.; GÖKSEL, A.; KOCK, D.; KLOCK, J.H., GEHRKE, T., SAND, W. Adhesion to metal sulfide surfaces by cells of *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans*, **Hydrometallurgy**, v. 83, p. 245-254, 2006.
- HARVEY, T J.; HOLDER, N.; STANEK, T. Thermophilic Bioleaching of Chalcopyrite Concentrates with GEOCOAT Process. **Alta 2002 Nickel/Cobalt 8 - Copper 7 Conference**, 2002.
- HEBERT, Jr., R. B. **MiMi – sulfide oxidation in mine waste deposits: a review with emphasis on dysoxic weathering**, Stockholm: department of Geology and Geochemistry, Stockholm University, 1999.

- HUGUES, P.; JOULIAN, C.; SPOLAORE, P.; MICHEL, C.; GARRIDO, F.; MORIN, D. Continuous bioleaching of a pyrite concentrate in stirred reactors: Population **Hydrometallurgy**, v. 94, p. 34-41, 2008.
- JIANG, H.; LAWSON, F. Reaction mechanism for the formation of ammonium jarosite. **Hydrometallurgy**, v. 82, p. 195-198, 2006.
- JOHNSON, D. B. Importance of microbial ecology in the development of new mineral technologies, **Hydrometallurgy**, v. 59, p.147-157, 2001.
- JONGLERTJUNYA, W. **Bioleaching of chalcopyrite**. Department of Chemical Engineering, School of Engineering, The University of Birmingham, United Kingdom, April, 2003.
- KELLY, G.; AHLBORN, G.; CARRETERO, E.; GUNN, M.; HARVEY, P., Laboratory And Demonstration Scale Optimisation Of The Quebrada Blanca Heap Leach Bacterial Regime Using GEOLEACH™, II Taller Internacional de Procesos Hidrometalurgicos, **HydroProcess**, 2008.
- KINNUNEN, P.H.M.; PUHAKKA, J.A., High rate ferric sulfate generation by a *Leptospirillum ferriphilum*-dominated biofilm and the role of Jarosite in biomass retainment in a fluidised-bed reactor. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 85, p. 697-705, 2003.
- LEAHY, M. J.; SCHWARZ, M. P., Modelling jarosite precipitation in isothermal chalcopyrite bioleaching columns, **Hydrometallurgy**, v. 98, p. 181-191, 2009.
- LIU, H.; LAN, Y.; CHENG, Y. Optimal production of sulphuric acid by *Thiobacillus thiooxidans* using response surface methodology. **Process Biochemistry**, v. 39, p. 1953-1961, 2004.

LIU, Q., LI, H., ZHOU, L., Galvanic interactions between metal sulfide minerals in a flowing system: Implications for mines environmental restoration, **Applied Geochemistry**, v. 23, p. 2316-2323, 2008.

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

MERUANE, G., VARGAS, T., Bacterial oxidation of ferrous iron by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the pH range 2.5-7.0, **Hydrometallurgy**, v. 71, p. 149-158, 2003.

NOVO, M.T.M.; SILVA, A. C.; MORETO, R.; CABRAL, P.C. P.; COSTACURTA, A., GARCIA, Jr. O.; OTTOBONI, L.M. M. *Thiobacillus ferrooxidans* response to copper and other heavy metals: growth, protein synthesis and protein phosphorylation. **Antonie van Leeuwenhoek** v. 77, p. 187-195, 2000.

OLIVEIRA, D. M. **Influência do Tensoativo Biológico Ramnolipideo na Biolixiviação de Minério Primário de Cobre**. Dissertação (mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 95p, 2009.

PETERSEN, J., DIXON, D.G. Thermophilic heap leaching of a chalcopyrite concentrate, **Minerals Engineering**, v. 15, p. 777-785, 2002.

PLUMB, J.J.; MCSWEENEY, N.J.; FRANZMANN, P.D. Growth and activity of pure and mixed bioleaching strains on low grade chalcopyrite ore. **Minerals Engineering**, v. 21, p. 93-99, 2008.

POGLIANI, E. DONATI; Immobilisation of *Thiobacillus ferrooxidans*: importance of jarosite Precipitation. **Process Biochemistry**, v. 35, p. 997-1004, 2000.

- PRADHAN, N.; NATHSARMA, K.C.; S.RAO, K.; SUKLA, L.B., MISHRA, B.K Heap bioleaching of chalcopyrite: A review. *Minerals Engineering*, v. 21, p. 355-365, 2008.
- RAWLINGS, E.; TRIBUTSCH, H.; HANSFORD, G. Reasons why *Leptospirillum*-like species rather than *Thiobacillus ferrooxidans* are the dominant iron-oxidizing bacteria in many commercial processes for the biooxidation of pyrite and related ores, *Microbiology*, v. 145, p 5-1, 1999.
- RODRIGUEZ, Y., BALLESTER, A., BLAZQUEZ, M.L., GONZALEZ, F., MUNOZ, J.A.. New information on the chalcopyrite bioleaching mechanism at low and high temperature, ***Hydrometallurgy***, 71, 47-56, 2003.
- ROHWERDER, T.; GEHRKE, T.; KINZLER, K.; SAND, W. Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation, ***Appl Microbiol Biotechnol***, v. 63, p. 239-248, 2003.
- ROMANO, P.; BLAZQUEZ, M.L.; ALGUACIL, F.J.; MUNOZ, J.A.; BALLESTER, A.; GONZALEZ, F., Comparative study on the selective chalcopyrite bioleaching of a molybdenite concentrate with mesophilic and thermophilic bacteria, ***FEMS Microbiology Letters***, v. 196, p. 71-75, 2001.
- SAND, W. ***Microbial processing of metal sulfides***. La Plata: Springer, Cap. 1, p. 3-33, 2007.
- SAND, W.; GEHRKE, T., Extracellular polymeric substances mediate bioleaching/biocorrosion via interfacial processes involving iron(III) ions and acidophilic bacteria. ***Research in Microbiology***, v. 157, 49–56, 2006.
- SAND, W.; GEHRKE, T.; JOZSA, P.; SCHIPPERS, A., (Bio)chemistry of bacterial leaching-direct vs. indirect bioleaching. ***Hydrometallurgy***, v. 59, p. 159-175, 2001.
- SCHIPPERS, A. Microorganisms involved in bioleaching and nucleic acid-based molecular methods for their identification

and quantification. Em: DONATI, E.R., SAND, W. Microbial processing of metal sulfides. La Plata: Springer, Cap. 1, p. 3-33, 2007.

SCHIPPERS, A.; SAND, W., Bacterial Leaching of Metal Sulfides Proceeds by Two Indirect Mechanisms via Thiosulfate or via Polysulfides and Sulfur, *Applied And Environmental Microbiology*, v. 65, p. 319-321, 1999.

WATLING, H.R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – A review. **Hydrometallurgy**, v. 84, p 81-108, 2006.

WITNE, J.Y.; PHILLIPS, C.V. Bioleaching Of Ok Tedi Copper Concentrate In Oxygen- And Carbon Dioxide, Enriched Air. **Minerals Engineering**, v. 14, pp. 25-48, 2001.

YAHYA, A., D.; JOHNSON, B.. Bioleaching of pyrite at low pH and low redox potentials by novel mesophilic Gram-positive bacteria. **Hydrometallurgy**, v. 63, p. 181-188, 2002.

ZHANG, Y.; QIN, W.; WANG, J.; ZHEN, S.; YANG, C.; ZHANG, J.; NAI, S.; QIU, G. Bioleaching of chalcopyrite by pure and mixed culture, **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, v. 18, p. 1492 – 1496, 2008.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2009, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, cerca de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-52 – Aplicação de Resíduos de Mármore na Indústria Polimérica. Larissa Ribeiro de Souza, Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Regina Coeli Casseres Carrisso, Luciana Portal da Silva, Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Leila Léa Yuan Visconte, 2009.

STA-51 – Utilização da fibra da casca de coco verde como suporte para a formação de biofilme visando o tratamento de efluentes. Bianca de Souza Manhães de Azevedo, Andréa Camardella de Lima Rizzo, Selma Gomes Ferreira Leite, Luis Gonzaga dos Santos Sobral, Danielle Reichwald, Gustavo Mendes Walchan, 2008.

STA-50 – Biorremediação de solo impactado com óleo cru: avaliação da potencialidade da utilização de surfatantes. Valéria Souza Millioli, Luis Gonzaga Santos Sobral, Eliana Flávia Camponese Sérvulo e Denize Dias de Carvalho, 2008.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3867-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233
Telefax: (21) 2260-2837
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.