

## BIOHIDROMETALURGIA EN LA RECUPERACIÓN DE VALORES METÁLICOS

Víctor Rosales U.\*, José Guerrero R.\*\* y Margarita Sáez\*\*.

### RESUMEN

En tiempos actuales, dentro de la metalurgia extractiva se da especial interés en el uso de nuevas tecnologías para la recuperación de los valores presentes en los minerales o concentrados, los que difícilmente pueden ser extraídos por tecnologías convencionales. Una de estas nuevas tecnologías es la lixiviación bacteriana.

En el presente trabajo se dan a conocer los aspectos teóricos de la lixiviación bacteriana, haciéndose notar la importancia del mecanismo involucrado en la biooxidación de Fe(II) hacia Fe(III). También se mencionan aspectos experimentales como la metodología seguida en los procesos biohidrometalúrgicos.

Para tal efecto, se presentan los resultados de pruebas realizadas en el laboratorio, con los cuales podemos graficar mejor el interés que tiene el empleo de sistemas biológicos en la recuperación de valores metálicos.

**Palabras clave :** Lixiviación bacteriana. Biohidrometalurgia. Biooxidación.

### ABSTRACT

In current times, and with regard to extractive metallurgy, the use of new technologies for the recovery of values that can be present in minerals or in their concentrates and which can be hardly extracted by means of conventional technologies are shown special interest. One of these new technologies is bacterial leaching.

In the present work, the theoretical aspects of bacterial leaching are made known, remarking on the importance of the mechanism involved in the biooxidation of Fe(II) towards Fe(III). Experimental aspects are also mentioned, such as the methodology followed in biohydrometallurgical processes.

To that effect, results of tests carried out in the laboratory are presented, with which we can better outline the interest that the use of biological systems in the recovery of metallic values arouses.

**Key words:** Bacterial leaching. Biohydrometallurgy. Biooxidation.

### INTRODUCCIÓN

Los microorganismos suelen tener un rol predominante en la solubilización, transporte y deposición de metales y minerales en el medio ambiente(1), lo que hace que los valores metálicos puedan ser extraídos vía la Lixiviación Microbial (6), proceso que se ha dado en llamar **lixiviación bacteriana**.

La **lixiviación bacteriana** puede ser definida como un proceso natural que resulta de la acción de un grupo de bacterias (principalmente *Acidithiobacillus* (*Thiobacillus*) *ferrooxidans*) quienes oxidan minerales sulfurados para liberar los metales valiosos presentes (2). Dentro de los minerales que pueden ser tratados por lixiviación bacteriana tenemos: chalcopinita, pirita, covelita, sulfuros de Zn, Pb, etc.

Por mucho tiempo se creyó que la disolución o lixiviación de metales a partir de minerales era un proceso netamente químico mediado por agua y oxígeno atmosférico. El descubrimiento de bac-

\* Licenciado en educación. Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Industrial. UNMSM.  
E-mail: d260044@unmsm.edu.pe

\*\* Biólogo. Facultad de Ciencias Biológicas. UNMSM

terias acidófilas ferrooxidantes, fue primordial en la definición de la lixiviación de metales como un proceso catalizado biológicamente(1). La tecnología microbiana presenta ventajas sobre los métodos no biológicos (3,5), entre los que podemos encontrar:

- Requiere poca inversión de capital(las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas).
- Bajos costos de operación necesarios para las operaciones hidrometalúrgicas en comparación con los procesos convencionales.
- Relativa ausencia de polución o contaminación ambiental durante el proceso.
- El tratamiento del creciente acumulo de minerales de baja ley en las minas, los cuales no pueden ser económicamente procesados por los métodos convencionales.

## ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS

Los microorganismos que son responsables de la disolución de los metales a partir de minerales principalmente son organismos quimiosintéticos y autotróficos, pertenecientes al género *Thiobacillus* (en la actualidad algunas especies, sobre todo aquellas involucradas en la disolución de metales han sido reclasificadas bajo el género *Acidithiobacillus*). De las especies de *Acidithiobacillus* que se conocen el que más atención ha recibido es *Acidithiobacillus (Thiobacillus). ferrooxidans*.

A comienzos de los años 50, dos investigadores, Colmer y Hinkle, demostraron que el ácido y el hierro contenido en el drenaje de una mina de carbón era el resultado de la acción bacterial sobre los sulfuros de hierro en las vetas de carbón. Ellos llamaron a esta bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Los *Acidithiobacillus ferrooxidans* (4), presentan forma bacilar, algunas cepas tienen flagelos, es quimioautotrófico, capaz de oxidar compuestos inorgánicos como iones ferroso (Fe(II)) y azufre. los cuales le sirven como fuente primaria de energía. El carbono necesario para su arquitectura celular lo obtiene por fijación de CO<sub>2</sub>, empleando un mecanismo semejante al utilizado por las plantas verdes (Ciclo de Calvin-Benson). Es aerobio (requiere de O<sub>2</sub> como aceptor final de electrones), acidófilo (se desarrolla a valores de pH entre 1.5 y 3.0), y requiere de temperaturas que oscilan entre 25°C-35°C. Esta bacteria es considerada como el mayor contribuyente en la producción de aguas ácidas que drenan de depósitos de metales sulfurados, gracias a la capacidad que tienen de oxidar minerales de

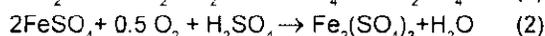
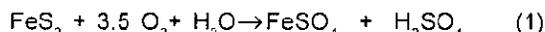
disulfuro de hierro, generando soluciones ácidas de sulfato férrico.

Los principales mecanismos involucrados en el proceso de lixiviación bacteriana son: directa e indirecta.

### a. Lixiviación Indirecta :

Dos reacciones importantes mediadas por *T. ferrooxidans* son:

#### Pirita



El sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurados. La lixiviación con Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> recibe el nombre de lixiviación indirecta porque se realiza en ausencia de oxígeno o de bacterias y, es responsable de la disolución o lixiviación de varios minerales sulfurados de cobre de importancia económica:

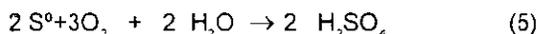
#### Chalcopyrita



#### Chalcocita



El mecanismo de lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2). El azufre (S<sup>0</sup>) generado en las reacciones 3 y 4 puede ser convertido en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por *T. ferrooxidans* según:



Este ácido sulfúrico, así generado, mantiene el pH del sistema a niveles favorables para el desarrollo de la bacteria.

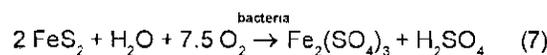
### b. Lixiviación Directa:

Las bacterias ferrooxidantes también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente sin la participación del sulfato férrico producido biológicamente. El proceso se describe en la siguiente reacción:

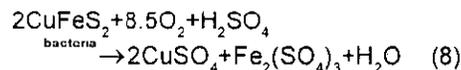


donde, M representa un metal bivalente.

#### Pirita



#### Chalcopyrita



Debido a que el hierro siempre está presente en ambientes de lixiviación natural, probablemente, tanto la lixiviación indirecta como la directa ocurren simultáneamente.

Un tercer mecanismo es la denominada Conversión Galvánica, que se origina por el contacto físico entre dos fases de sulfuros disimilares inmersos en un electrolito creando una celda galvánica. La contribución de la conversión galvánica a la lixiviación es desconocida.

El efecto de ciertos factores ambientales sobre el desarrollo y crecimiento de las bacterias, juega un rol importante dentro del proceso de lixiviación bacteriana, es por ello de mucha importancia el control de estos factores. Entre ellos tenemos:

- **pH:** En general los *A. ferrooxidans*, desarrollan bien en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollar sobre Fe(II) a un pH mayor de 3.0. Normalmente los valores sobre el que los tiobacilos se desarrollan se ubican dentro del rango de 1.5 a 2.5.
- **Nutrientes:** Como todos los seres vivos, *A. ferrooxidans* requiere de fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, entre las que tenemos fuente de N<sub>2</sub> (amonio), de fosfato, de S, iones m e t etc. El magnesio es necesario para la fijación de CO<sub>2</sub> y el fósforo es requerido para el metabolismo energético. Los medios de cultivo empleados presentan estos requerimientos, siendo los más importantes el 9K y el TK.
- **Oxígeno:** La disponibilidad de oxígeno es un factor que controla la extracción de metales por bacterias. No se conoce otro oxidante que pueda ser utilizado por los microorganismos en ambientes de lixiviación.
- **Luz:** La luz visible y la no filtrada tienen un efecto inhibitorio sobre algunas especies de *Acidithiobacillus*, pero el hierro férrico ofrece alguna protección a los rayos visibles.
- **Temperatura:** El rango sobre el cual se desarrollan se encuentra entre 25°C y 35°C.

## ASPECTOS EXPERIMENTALES

La muestra, fué mineral sulfurado de las minas de Cobriza, trabajada a malla -400. Se hicieron corridas de consumo de ácido, previo a la lixiviación bacteriana. La composición química en % del mineral se muestra en el Cuadro 1.

El estudio mineralógico reportó la presencia de ganga (45.99%), chalcopirita (30.49%), pirita (12.88%), pirrotita (4.21%), arsenopirita (0.797%), etc.

Las bacterias fueron aisladas de agua de mina de Cobriza (nivel 10), y adaptadas a medio cultivo líquido (9K+Fe<sup>+2</sup>) previo a su adaptación y trabajo con el mineral propiamente dicho. El aislamiento de *A. ferrooxidans* comprende los siguientes pasos:

- Filtrado del agua de mina, este líquido filtrado debe contener bacterias.
- Nuevamente se filtra la solución conteniendo bacterias, empleando filtros de membrana (Sartorius-Membrane Filter) en las cuales deben quedar retenidas las bacterias.
- Se lava el filtro de membrana con agua ácida. Este concentrado, homogenizado es recogido y guardado en un tubo de 13 x 100 mm y mantenido como cepario.

Para la adaptación de las bacterias a medio líquido se emplea el medio 9K de Silverman y Lundgren, cuya composición es (g/l): 3.0 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 0.1 KCl; 0.5 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; 0.5 MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O; 0.144 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y 44.2 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O. El cultivo se realiza en frascos Erlenmeyer, en agitación constante (shaker, 150-180 rpm) a 35°C y en oscuridad.

Se hace desarrollar hasta que alcance el 70% de oxidación de Fe(II) a Fe(III) -titulación con KMnO<sub>4</sub> -, y luego se procede a transferir cierto volumen de cultivo a otro erlenmeyer conteniendo medio fresco. Esta operación se realiza por 2 ó 3 veces. Como se puede observar, durante el cultivo inicial se alcanza el 75% de oxidación en 65 horas; mientras que en las restantes transferencias, el tiempo se acorta debido a que las bacterias están mejor adaptadas y en su estado óptimo de desarrollo (72% en 50 horas, para la 1ª transferencia, y 78% en 42 horas para la 2ª transferencia). La prueba en blanco no tiene mayor progreso, lo que indica que la oxidación se debe a la acción bacteriana.

Cuadro 1. Composición química en porcentaje del mineral.

S	Cu	Fe	As	FeO	Insol.
17.3	5.0	33.4	1.0	19.8	24.1

Fuente : Elaboración propia

El mineral molido a malla -400 fue sometido a lixiviación ácida para determinar el consumo de ácido del material, lográndose determinar un consumo de 245.2 kg por tonelada.

Las pruebas de lixiviación bacteriana fueron corridas para 20% de sólidos, empleando para tal efecto 30 g de mineral y 120 ml de solución lixivante, según se detalla en el cuadro 2

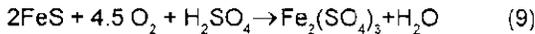
**Cuadro 2.** Pruebas de lixiviación bacteriana

Mineral (malla -400)	30.0 gr
9K sin Fe (II)	101.0 ml
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.	4.0 ml
Inóculo bacterial	15.0 ml

Fuente : Elaboración propia

Transcurrido 01 día de iniciada la prueba se procedió a inocular los frascos con inóculo bacterial. Durante la prueba se evidenció un aumento en el consumo de ácido, llegándose a valores promedio de 340 k H<sup>+</sup>/ton. Este ácido consumido se puede deber a la chalcopirita, según se deduce de la reacción 8; pero más probablemente el alto consumo es originado por la pirrotita presente, ya que para su oxidación requiere de ácido:

#### Pirrotita



Se realizaron determinaciones de las concentraciones de Cu<sup>+2</sup> y Fe<sub>1</sub> empleando un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer, los valores de pH se controlaron en un potenciómetro Cole Palmer, tratando de mantener el pH entre 1.8 y 2.0. Ante alguna variación se reajustó añadiendo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ó NaOH según sea el caso. Para los análisis de Cu y Fe, se tomó 1 ml de muestra, restituyendo este volumen con 9K sin Fe<sup>+2</sup>. Las pérdidas de peso debido a la evaporación se compensaron con agua destilada.

## RESULTADOS

Se puede evidenciar que el cobre es extraído hasta el 57% en 17 días en un cultivo inicial mientras que en la primera transferencia se alcanza el 100% en 13 días.

Las extracciones de Fe también muestran un incremento en un menor tiempo durante la primera transferencia, notándose que debe transcurrir más tiempo para alcanzar la extracción máxima.

Una de las desventajas presentes durante esta prueba en particular, es el alto consumo de ácido registrado.

## CONCLUSIONES

La lixiviación bacteriana es un campo que cuenta con gran futuro dentro de la metalurgia extractiva, pues es una tecnología económicamente barata en comparación con otras técnicas convencionales (2).

Las bacterias pueden ser aisladas fácilmente a partir de aguas de mina y adaptadas en el laboratorio a condiciones de trabajo ideales, lográndose notar que su manejo es sencillo si se consideran los parámetros necesarios para su desarrollo.

El alto consumo de ácido es un factor que puede ser limitante para el normal funcionamiento del proceso. Hay que hacer notar que durante la adaptación de las bacterias a medio líquido se evidenció su condición de ser consumidoras de ácido.

De todo esto podemos decir que *A. ferrooxidans* es capaz de remover los valores metálicos presentes en determinado mineral, en este caso la extracción de Cu, por oxidación del Fe presente en la chalcopirita (CuFeS<sub>2</sub>).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Hutchins, S.R.; Davidson, M.S.; Brierley, J.A.; Brierley, C.L., 1986. "Microorganisms in the reclamation of metals". Ann. Rev. Microbiol. 40:311-336.
2. Gilbert, S.R.; Pounds, C.O.; Ice, R.R., 1988. "Comparative economics of bacterial oxidation and roasting as a pretreatment for gold recovery from an auriferous pyrite concentrate". CIM Bulletin 81 (910) : 89-94.
3. Hurtado, J., 1984. "Aislamiento, purificación y presencia de plásmidos en cepas nativas de *Thiobacillus ferrooxidans*". Tesis de Magister U.P.C.H., Lima, Perú.
4. Olson, G.J.; Kelly, R.M., 1986. "Microbiological metal transformations: Biotechnological applications and potential". Biotechnol. Progress. 2(1): 1-15.
5. Bauer, J.L., 1986. "Lixiviación Bacteriana: Introducción a la parte microbiológica de la Biohidrometalurgia con sp. de *Thiobacillus*". Revista de la ANBIOP, 3(2): 53-60.
6. Roy Chaudhury, G.; Das, R.P. 1987, "Bacterial Leaching - complex sulfides of copper, lead and zinc". Int. J. Min. Process. 21:57-64.
7. Van Aswegen, P.C.; Haines, A.K., 1988. "Bacteria enhance gold recovery". Int. Mining. , pp. 19-23.