# THIOBACILLUS FERROXIDANS

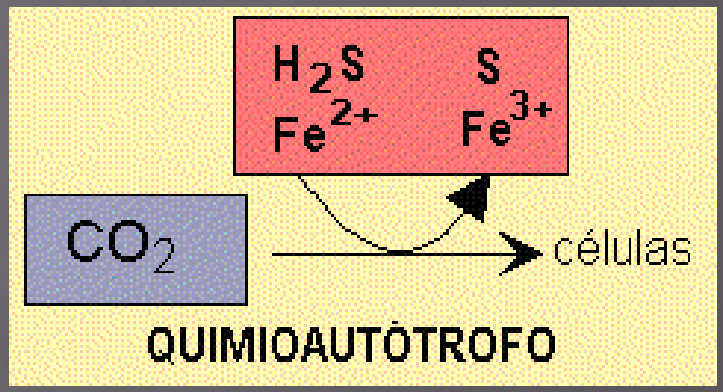
- ESTA BACTERIA ES PROPIA DEL MINERAL, POR LO CUAL SOLO BASTA CON DARLE LAS CONDICIONES NECESARIAS PARA SU REPRODUCCION Y DESARROLLO.
- OXIDA O REDUCE COMPUESTOS DERIVADOS DE AZUFRE Y MINERALES SULFURADOS.
- ES CAPAS DE OXIDAR EL AZUFRE ELEMENTAL DE LOS MINERALES SULFURADOS



# PROPIEDADES

* Son Quimioautróficas

La energía que usan para su crecimiento y mantenimiento la obtiene de sustancias inorgánicas tales como $Fe^{+2}$ y S y compuestos de azufre.




* Son Aeróbicas:

Requieren $O_2$ para reaccionar con el catión $H^+$ y el electrón liberado por la oxidación de $Fe^{+2}$, para formar agua dentro de la célula. Adicionalmente se requiere $O_2$ para la oxidación química de los sulfuros.

* Son Acidofílicas:

Crecen y sobreviven en rangos de pH de 1.0 a 4.5 óptimos están entre 1.5 y 2.5. Normalmente estos microorganismos no soportan pH sobre 6.5 y bajo 1.0.

# OBTENCION DE ENERGIA

**Los organismos quimiolitótrofos obtienen su energía mediante la oxidación de materiales inorgánicos, los autótrofos utilizan el $CO_2$ del aire como única fuente de carbono (autótrofos obligados), y los heterótrofos lo obtienen metabolizando compuestos orgánicos. Algunos heterótrofos tienen la facultad de ser autótrofos en determinadas condiciones (autótrofos facultativos).**

# MECANISMO DE LIXIVIACION

**LIXIVIACION DIRECTA**

**LIXIVIACION INDIRECTA**

**LIXIVIACION MIXTA**

**MECANISMO DE ATAQUE INDIRECTO VIA THIOSULFATO**

**MECANISMO DE ATAQUE DIRECTO VIA POLISULFURO**

**OXIDACION DEL HIERRO Y EL AZUFRE**

**LIXIVIACION DIRECTA.** Las bacterias ferroxidantes también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente sin la participación del sulfato férrico producido biológicamente.

**LIXIVIACION INDIRECTA.** El sulfato férrico es oxidante muy fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurado. La lixiviación con $Fe_2(SO_4)_3$ recibe el nombre de lixiviación indirecta por que se realiza en ausencia del oxigeno o de las bacterias y, es responsable de la disolución de varios minerales sulfurados.

LIXIVIACIONMIXTA

## MECANISMO DE ATAQUE INDIRECTO VIA THIOSULFATO.

**El $Fe^{(III)}$ de la capa de EPS ataca de forma indirecta al sulfuro metálico produciendo $Fe^{2+}$ y $S_2O_3$. El tiosulfato reacciona con el $Fe^{(III)}$ , forma varios intermediarios hasta llegar al $SO_4^{2-}$.**

## MECANISMO DE ATAQUE DIRECTO VIA POLISULFURO.

**Los protones atacan la red cristalina de algunos sulfuros metálicos. El ataque indirecto del $H^+/Fe^{3+}$ al mineral produce $Fe^{2+}$ y polisulfuro, y finalmente $SO_4$. El papel de las bacterias es el de producir $H_2SO_4$ para abastecer de $H^+$ y $Fe^{3+}$ al medio, llevandose a cabo el ataque químico.**

# OXIDACION DE HIERRO Y AZUFRE

**Los iones ferrosos son oxidados en la superficie de la bacteria por la transferencia de su electrón a la terminal citocromooxidasa en la membrana citoplasmática.**
**La oxidación bacteriana del azufre de los minerales sulfurados se realiza a través de la acción de la enzima sulfurooxidasa.**

# VENTAJAS DE LA:

**BIOLIXIVIACION**

**TRATAMIENTO DE MINERALES QUE POR OTROS METODOS SERIA IMPOSIBLE TRATAR**

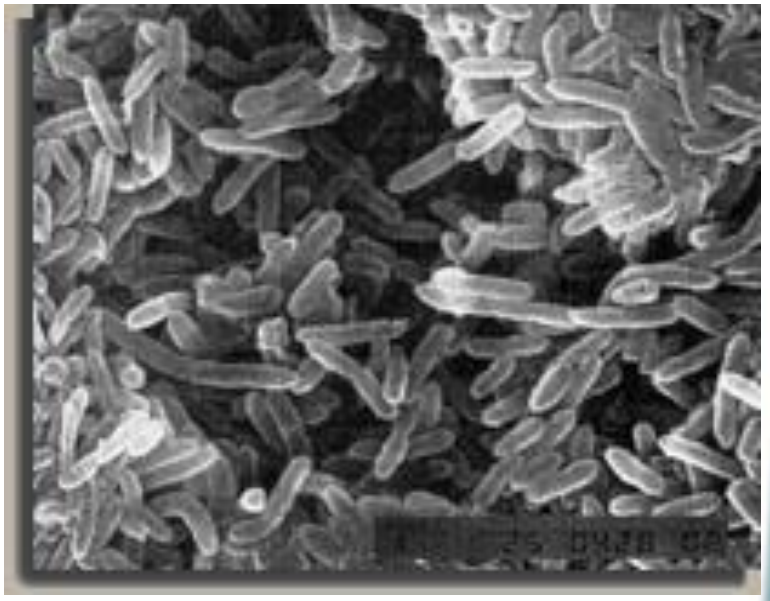
**EL CUIDADO DEL MEDIO AMBIENTE DURANTE**

**EL APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES PRESENTES EN EL MEDIO**

# LIXIVIACION BACTERIANA O BIOLIXIVIACION

La biolixiviación es un proceso biohidrometalúrgico que involucra un conjunto de reacciones químicas, metabólicas, enzimáticas y no enzimáticas, en el cuál el mineral insoluble es oxidado y otros metales de interés son liberados en solución.

- Bacterias



# Antecedentes

- A finales del siglo XIX S. Winogradsky describió un grupo de bacterias de diversos ambientes: suelo, agua y mina, que crecen por oxidación de minerales con azufre, hierro, cobre, cobalto, níquel y otros metales, lo que además asimilan el CO2 y/o carbonatos como fuente de carbono. Por este tipo de metabolismo bioquímico les definió como "bacterias **quimiolitotroficas** y postuló que la energía derivada de la oxidación del ión ferroso a férrico sirve para su crecimiento y asimilación de CO2" (Sánchez-Yáñez et al., 2000;
- Harvey y Crundwell, 1997). A finales de 1979 se les conocían como bacterias autotróficas del hierro, entonces sólo se describían dos géneros:

1. Ferrobacillus y las especies F. ferrooxidans y
2. F. sulfooxidans y Thiobacillus thiooxidans.

- Está última se aisló de un suelo pobre en materia orgánica y en agua de mina; (Lindstrom et al., 1992; Olson, 1991).

# La tecnología microbiana presenta ventajas sobre los métodos no biológicos,

- 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.

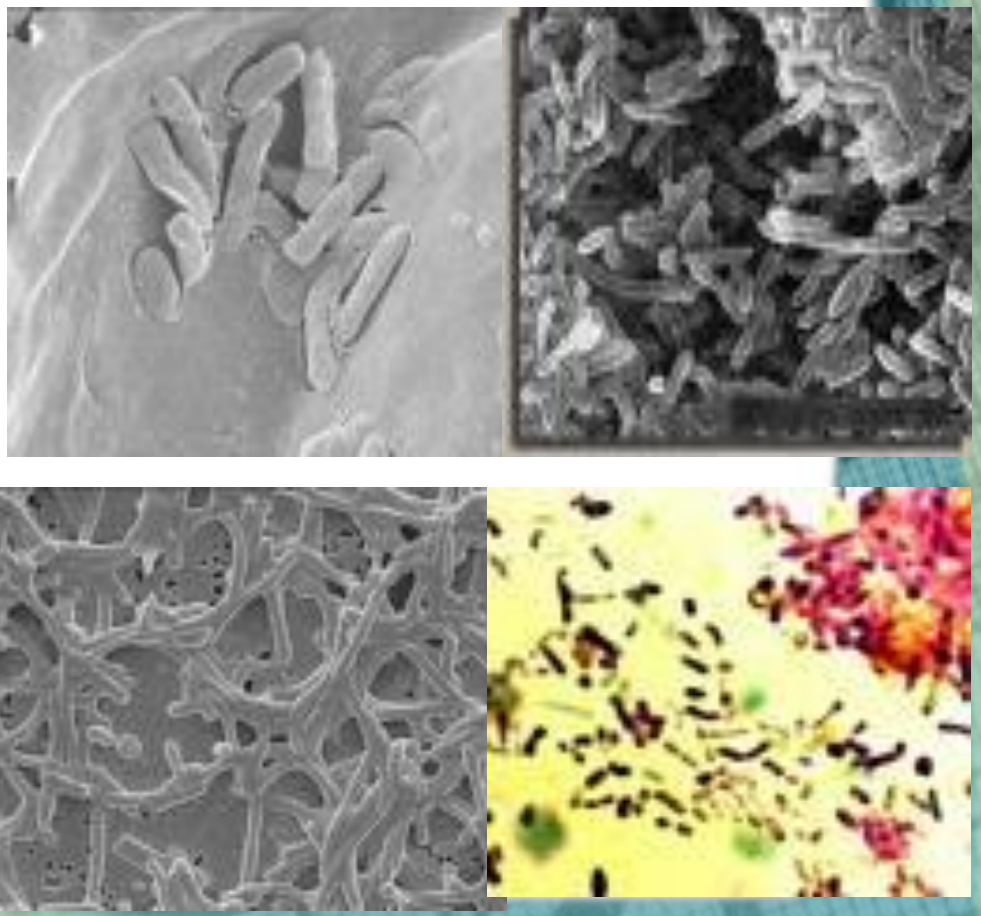
- Relativa ausencia de polución o contaminación ambiental durante el proceso.

-El tratamiento del creciente acumulo de minerales de baja ley en las minas los que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales.

# BACTERIAS DEL GENERO THIOBACILLUS

**Thiobacillus ferrooxidans**

Bacilar, de 0.5 a 1.7 µ, algunas cepas tienen flagelos, es quimioautotrófico, capaz de oxidar compuestos inorgánicos como iones ferroso (Fe(II)) y azufre, los que le sirven de fuente primaria de energía. El carbono necesario para su arquitectura celular lo obtiene por fijación de $CO_2$, de manera similar a las plantas verdes. Es aerobio, acidófilo y a temperaturas que oscilan entre 25-35ºC.



# MECANISMOS DE LIXIVIACIÓN

## a.- Lixiviación Indirecta:

La pirita en presencia de oxigeno y agua se oxida a sulfato ferroso y acido sulfúrico.

$$FeS + 3.5O_2 + H_2O \rightarrow FeSO_4 + H_2SO_4 \quad \text{..... (1)}$$

$$2FeSO_4 + 1/2O_2 + H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + H_2O \quad \text{..... (2)}$$

Las bacterias oxidan el hierro aprovechable, actuando como un catalizador
acelerando así la formación de sulfato férrico.

El sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurados.

La lixiviación con **$Fe_2(SO_4)_3$** 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:

**Chalcopirita**

**$CuFeS_2 + 2\ Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow CuSO_4 + 5\ FeSO_4 + 2\ S^o$ ..... (3)**

**Chalcocita**

**$Cu_2S + 2\ Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2\ CuSO_4 + 4\ FeSO_4 + 2\ S^o$ ..... (4)**

El mecanismo de lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2).

El azufre ($S^o$) generado en las reacciones 3 y 4 puede ser convertido en ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) por **T. ferrooxidans** según:

$$2\ S^{o} + 3\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2SO_4 \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Este ácido sulfúrico, así generado, mantiene el pH del sistema a niveles favorables para el desarrollo de la bacteria. pH optimo de 2 y T 33º.
La bacteria es capaz de oxidar el $S^{o}$ formado de la oxidacion quimica de los minerales sulfurados de Cu.

**El acido producido de esta oxidación contribuirá a la disolución de Cu y prevendrá la precipitación de Fe disuelto dentro de las áreas de lixiviación.**

## 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:

$$MS + 2\ O_2 \rightarrow MSO_4 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

* Donde M representa un metal bivalente.

Pirita

$$2FeS_2 + H_2O + 7.5\ O_2 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + H_2SO_4 \text{ ..... (7)}$$

Chalcopirita

$$2\ CuFeS_2 + 8.5\ O_2 + H_2SO_4 \rightarrow 2CuSO_4 + Fe_2(SO_4)_3 + H_2O \text{ .....(8)}$$

Dado que el fierro siempre está presente en ambientes de lixiviación natural, es posible que tanto la lixiviación indirecta como la directa ocurran de manera simultánea.

El control de la acidez es de mayor importancia, porque se necesita un medio ácido para tener el ión férrico y otros metales en solución.

La acidez es por lo tanto controlada por la oxidación del hierro y el azufre y los sulfuros de los metales.

# APLICACIÓN DE LOS PROCESOS BIOTECNOLÓGICOS

## SULFUROS DE COBRE

La oxidación biológica de sulfuros de cobre ha sido el proceso más estudiado. El cobre se disuelve transformándose en sulfato de cobre ($CuSO_4$). La chalcopirita ($CuFeS_2$) es el sulfuro de cobre más difícil de oxidar. Bajo la influencia de **T. ferrooxidans** la velocidad de oxidación de este sulfuro ase incrementa hasta en 12 veces más que el proceso netamente químico. Los sulfuros secundarios de cobre -chalcocita ($Cu_2S$), covelita, bornita-, son oxidados más fácilmente bajo el impacto de las bacterias (Reacciones 3 y 4).

## LIXIVIACIÓN BACTERIANA DE $CuFeS_2$

T. ferrooxidans oxida cobre monovalente el hierro y el azufre. La bacteria oxida directamente estos elementos que son parte de la calcopirita con valencia reducida con hierro ferroso o sulfato ferroso. Thiobacillus oxida hierro ferroso y azufre elemental, durante la fase inicial de la oxidación consume sulfato y el pH aumenta lo que provoca la precipitación del sulfato férrico y las sales de cobre como la anterita. El sulfato férrico se disocia en una reacción lenta secundaria el hierro forma compuestos como la jarosita con la regeneración del sulfato de acuerdo con la siguiente reacción:

$$2Fe_2(SO_4) + 12H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 6H_2SO_4$$

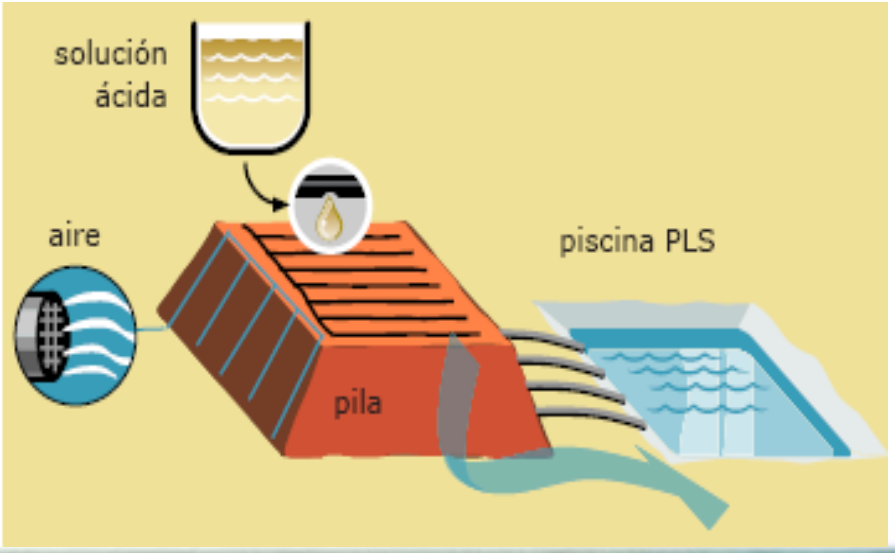
## ¿Cómo se realiza la lixiviación bacteriana del Cobre?

En las operaciones comerciales de lixiviación millones de toneladas de mineral de baja ley son acumuladas en el lugar de tratamiento ya sea camiones, trenes o fajas transportadoras.



El piso de esta acumulación ha sido previamente impermeabilizado ya sea con arcilla asfalto o membranas plásticas denominadas geomenbranas, esto sirve para recolectar el licor de lixiviación así como para impedir cualquier contaminación al subsuelo. Las impresionantes acumulaciones de mineral son regadas con cientos de galones de soluciones lixiviante ya sea por aspersión o por goteo. La aspersión introduce aire necesario en la oxidación química y la oxidación biológica.





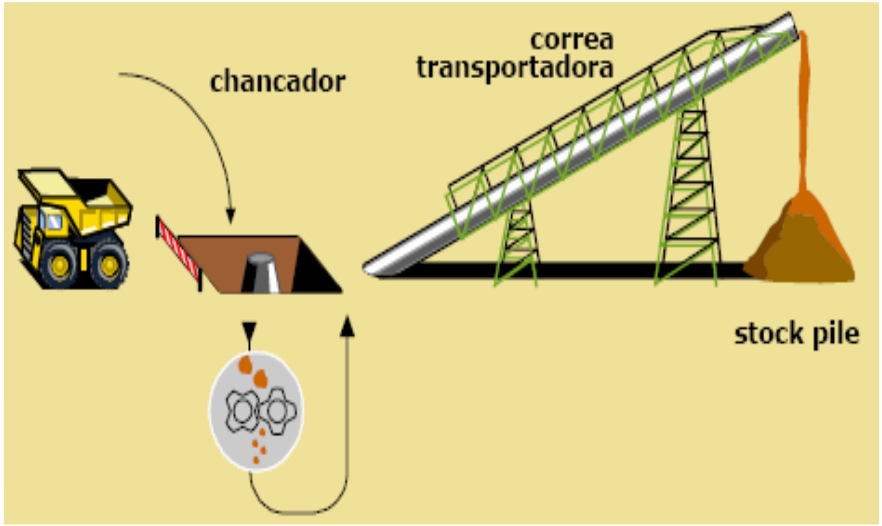

Los amontonamientos de mineral son entonces regados con las bacterias lixiviantes, estos microorganismos una vez adaptados al medio ambiente se multiplican llegándose a contar por millones de centímetros cúbico.

La solución lixiviante percola a través de la masa de mineral y la solución enriquecida es recogida en el fondo y de esta solución se recupera el metal ya sea por cementación o por los procesos de extracción por solvente. En los procesos a gran escala las operaciones pueden durar varios años.





Muchos veces lixiviación se ve limitada por el tamaño de las rocas que impiden la eficiente disolución de todo el metal presente, mientras que la presencia de yeso, $Fe(OH)_3$ y sulfato de hierro básico que dificultan la permeabilidad de la pila.




Aunque la lixiviación bacteriana es corrientemente aplicada para la recuperación del cobre y el uranio, sin embargo están ya siendo usada para la recuperación de otros materiales sulfurosos, como en el tratamiento de la esfalerita y la galena que son sulfuros de zinc y de plomo respectivamente.

Una de las mayores aplicaciones de la biolixiviación se ha encontrado en el campo de los grandes depósitos de material de muy baja ley y que han sido acumulados como desmonte en las operaciones de tajo abierto.



En este sentido la biolixiviación bacteriana acompañada de lixiviación química está siendo aplicada con éxito en Toquepala (Perú) donde los licores de lixiviación de los botaderos de Cuajone y Toquepala son tratados en la planta de extracción por solvente y electrodeposición para añadir 30000 toneladas anuales de cobre a la producción de cobre electrolítico de Southern Perú Copper Corporation.

Por lo demás el proceso de lixiviación bacteriana tiene ya algunos años de aplicación en Cerro Verde (Arequipa) con resultados halagadores. El mayor impedimento a la lixiviación bacteriana ha sido la lentitud del proceso, debido esencialmente a que las bacterias como seres vivientes están sometidos a los embates del medio ambiente y son particularmente sensibles a variaciones de humedad y temperatura extremas.

La biolixiviación será más sencilla para las especies nativas siempre presentes en los depósitos, pero estas no se reproducen en gran escala por esto es necesario preparar cepas artificiales en el laboratorio, con las características de las nativas y que son finalmente las bacterias que se regaran sobre el material.

En las posibilidades actuales de manipulación genética es de esperarse el nacimiento de bacterias con mejores características.







# RETO DE LA BIOMETALURGIA

La lixiviación bacteriana resulta en el reto más importante en el futuro de la Metalurgia, los métodos tradicionales de recuperación de metales deberán dar paso a métodos no contaminantes y la biolixiviación es uno de ellos y que debe responder a la exigencia de un mundo atribulado que clama por un ambiente que no contamine más.