

USO DE MICROORGANISMOS EN MINERÍA: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA SU APLICACION

José A. Gálvez, Sergio A. Vardaro, José A. Cantero, Cecilia López, Lucas Caride,
Fernando Lucero.

Bioprocesos, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza Argentina.

e-mail: jose.galvez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se analizan las distintas alternativas que ofrecen los microorganismos para su uso en minería. Los microorganismos poseen varias vías metabólicas que se usan ampliamente en minería. Las aplicaciones incluyen recuperación de metales desde minerales de baja ley, recuperación de materiales residuales desde los residuos sólidos urbanos y electrónicos, y tratamiento de efluentes de origen minero. En la recuperación de metales los microorganismos autóctonos en forma preferencial o alóctonos (en el menor de los casos) trabajan sobre los minerales de interés económico produciendo la liberación de los mismos al producir procesos de separación que incluyen entre otros la lixiviación ácida por la transformación de sulfuros en sulfatos, ya sea en pilas de material residual (ganga) acumuladas en los yacimientos, en minerales de baja concentración o in situ si las condiciones de la formación geológica, en particular la porosidad, lo permiten. Una ventaja del proceso es que los minerales no requieren una molienda fina. Los sistemas de tratamiento ex situ varían desde pilas de lixiviación, hasta reactores tanque agitado. En caso de la recuperación in situ se recurre al uso de pozos inyectores y extractores de la solución acuosa. El lixiviado recuperado se trata y se separan los metales de interés como Cobre, Hierro, Oro, Plata y Uranio entre otros. En la recuperación de metales desde los residuos urbanos y electrónicos se procede en forma similar a los minerales. El tratamiento de residuos se hace en las corrientes acuosas que se generan en la mina, entre otros incluyen modificación de la especiación del metal o absorción del compuesto en forma similar a un biofiltro. Se analizan las condiciones de procesos, ventajas, desventajas y precauciones para aplicar esta técnica incluida el consumo de agua y la generación de corrientes residuales.

Palabras Clave: Biominería, Microorganismos, Minerales, Procesos, Efluentes.

INTRODUCCIÓN

La biominería es el término genérico utilizado para describir tecnologías que utilizan sistemas biológicos (principalmente microorganismos procarióticos) para facilitar la extracción y recuperación de metales de minerales de baja ley y de materiales de desecho, aprovechando la gran variedad de vías metabólicas que permiten actuar sobre sustancias orgánicas e inorgánicas. Su objetivo es optimizar la recuperación de metales básicos (Cobre, Níquel, Zinc) y metales preciosos (Oro, Plata), pero también otros minerales valiosos asociados tanto por motivos económicos como medioambientales (Barrie and Johnson, Natarajan).

Es adecuada para tratar minerales donde la presencia de ciertos elementos (por ejemplo Arsénico) interfiere en la fundición provocando daños. Es alternativa para el tratamiento de residuos industriales y urbanos como polvo, escorias, tierras raras, elementos radiactivos y “productos al final de su vida útil” que contienen metales valiosos. También es adecuada para la detoxificación de corrientes de efluentes, lodos, y colas mineras (Mahmoud et al, Natarajan, Park et al, Qu et al).

Los principales inconvenientes de la biominería son el tiempo prolongado requerido para obtener niveles económicos de extracción de metales. Todavía depende de la voladura y molienda de cuerpos minerales, si bien se han ensayado biolixiviaciones in situ con cierto éxito en rocas permeables, no se puede aplicar a todos los yacimientos. Además los procesos de optimización de la tecnología se ven dificultados por el conocimiento limitado que aún se tiene de las vías metabólicas y la cinética, tanto microbiana como química y las interacciones con la roca (Barrie and Johnson).

INTERACCIÓN MICROORGANISMOS Y MINERALES

Muchos microorganismos que habitan en minas y minerales contribuyen a la formación y conversión natural de formas minerales (biogénesis y biomineralización). Estos organismos son capaces de disolver minerales para liberar iones metálicos a partir de los cuales se pueden obtener metales puros (biohidrometalurgia). También son capaces de provocar la disolución selectiva de minerales o la separación de constituyentes minerales indeseables de una matriz de minerales multimetálicos (biobeneficio de mineral). Cuando se cultivan en presencia de minerales o se exponen a ellos, estos organismos desarrollan tolerancia a metales tóxicos y secretan biorreactivos específicos que se utilizan en biobeneficio (Natarajan).

Existen ciclos microbio-metal-mineral para metales y elementos como el carbono, azufre, nitrógeno, fósforo, hierro y muchos otros. Los microorganismos facilitan la recuperación de metales a partir de desechos que contienen metales y/o metales raros, como escorias, relaves, sobrecarga de minas, desechos electrónicos, minerales de baja ley y drenaje ácido de minas (Natarajan).

Los métodos biotecnológicos se basan en procesos que bacterias y hongos son capaces de llevar a cabo sobre los metales, minerales y residuos, se pueden resumir (Natarajan):

- 1- Captación y salida de iones metálicos
- 2- Sorción a membranas
- 3- Biosorción a superficies inertes
- 4- Asimilación intracelular de metales e iones
- 5- Movilización e inmovilización
- 6- Reducción y oxidación: precipitación de metales y compuestos
- 7- Solubilización y especiación de metales
- 8- Producción de quelantes

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MICROORGANISMOS DEGRADADORES DE MINERALES

Se han informado diferentes cepas microbianas en ambientes mineros y se han aislado de lixiviados, muestras de agua de mina, muestras de minerales y drenaje ácido de mina. Las condiciones ambientales en su mayor parte tienen valores de pH tan bajos como 3,6 y altas concentraciones de metales de hasta 200 g/L, pero en estos sistemas se

encuentran altos niveles de diversidad microbiana, incluidas bacterias, hongos y algas. Debido a estas condiciones ambientales es bajo el riesgo de contaminación con otros microorganismos no deseados que interfieran o desvíen el proceso (Netarajan).

Bacterias:

Los tipos de microorganismos que se encuentran en los procesos de lixiviación en pilas son similares a los que se encuentran en los procesos de tanque agitado, sin embargo, las proporciones de la población pueden variar según el mineral y las condiciones de proceso. Se considera que los microorganismos más importantes son un consorcio de bacterias Gram-negativas. Estos son los oxidantes de hierro y azufre. Los microorganismos predominantes en la biominería incluyen bacterias oxidantes de azufre (p. *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Acidithiobacillus caldus*), bacterias oxidantes de hierro y azufre (*Acidithiobacillus ferrooxidans* o *Sulbacillus* spp.) y bacterias oxidantes de hierro (*Leptospirillum ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*). Estas son las bacterias y arqueas quimiolitotróficas oxidantes de hierro y azufre. Se requiere que los microorganismos crezcan en un medio esencialmente inorgánico, aeróbico y ambiente extremada o moderadamente ácido (Netarajan, Rawlings 2005). Cuatro de las características más importantes son (Rawlings 2005):

- 1- crecen autotróficamente fijando CO₂ de la atmósfera;
- 2- obtienen su energía usando hierro ferroso o compuestos de azufre inorgánico reducido (algunos usan ambos) como donante de electrones, y generalmente usan oxígeno como aceptor de electrones;
- 3- son acidófilos y crecen en ambientes de pH bajo (pH. 1.4 a 1.6 es típico)
- 4- son notablemente tolerantes a una amplia gama de iones metálicos.

También actúan sobre compuestos que acompañan al mineral como As (caso de las arsenopiritas) que pasa a formas más solubles y luego deben ser neutralizadas en el proceso. Los procesos operan desde temperaturas ambiente hasta alrededor de 80°C, habiendo procesos mesófilos (temperatura ambiente a 40 °C), mesotermófilos (45 a 55 °C) y termófilos (60 a 80 °C). Pueden formar biofilms que son comunidades de microorganismos incrustados en una matriz de producción propia de exopolisacáridos (EPS), que consisten principalmente en polisacáridos, proteínas, lípidos y ADN. La formación de biopelículas sobre sulfuros metálicos se considera importante para la biolixiviación ya que los microorganismos adheridos son los que inician el proceso de lixiviación al proporcionar un espacio de reacción ampliado entre la superficie de sulfuro metálico y las celdas en las que se acumulan los iones de hierro (III) (Bellenger et al, Natarajan).

Hongos:

Los hongos y mohos forman la mayor parte de la biomasa en algunos yacimientos minerales dependiendo de la profundidad de la mina y las condiciones de nutrientes son muy buenos por capacidad para formar complejos metálicos solubles en agua y generar ácidos orgánicos y enzimas. Tienen el potencial de solubilizar metales y metaloides a partir de compuestos insolubles como minerales, fosfatos, sulfuros y óxidos metálicos. Los hongos que se desarrollan en un medio neutro o alcalino son útiles cuando se trata de lixiviar metales como uranio de calizas, carbonatos, calcretas y fosfatos. Estos últimos no son adecuados para la lixiviación tradicional debido a la necesidad de acidificarlos y su alto costo. Para el resto de los minerales se pueden utilizar hongos

acidófilos que prosperan a pH 3. Los hongos más interesantes son *Aspergillus*, *Penicillium* y *Clamidiosporum*. Para desarrollarse todos los microorganismos requieren fuentes de nitrógeno, fósforo y oligoelementos para desarrollarse. Si bien estos pueden encontrarse en los minerales, también puede ser necesario incorporarlos a los sistemas de tratamiento. En el caso de hongos y mohos se requiere además una fuente de carbono. En general son procesos exotérmicos aunque pueden encontrarse procesos anaeróbicos endotérmicos (Jeremic et al, Mishra et al; Natarajan, Qu et al).

MECANISMOS FUNDAMENTALES DE LIXIVIACIÓN ASISTIDA POR BACTERIAS DE LA OXIDACIÓN DE MINERALES SULFURADOS

Originalmente, existe un modelo con dos mecanismos diferentes involucrados simultáneamente en la lixiviación asistida por bacterias de minerales de sulfuro.

Esta el mecanismo "directo" en el que la membrana bacteriana interactúa directamente con la superficie del sulfuro mediante mecanismos enzimáticos, existiendo transferencia directa de electrones del sulfuro metálico a la celda unida a la superficie del mineral.

También existen mecanismos "indirectos" está mediada por iones férricos (Fe^{3+}) generado a partir de la oxidación microbiana del ion ferroso (Fe^{2+}) compuestos presentes en el mineral. El ion férrico (Fe^{3+}) actúa como agente oxidante y puede oxidar sulfuros metálicos y se reduce químicamente a un ion ferroso. Posteriormente, los iones ferrosos pueden volver a oxidarse microbianamente a iones férricos. En este caso, el hierro tiene un papel como transportador de electrones (Mahmoud et al).

Convertir sulfuros (u óxidos) metálicos insolubles en sulfatos metálicos solubles en agua o como un proceso de pretratamiento para abrir la estructura del mineral permite que otros productos químicos penetren mejor en el mineral y solubilicen el material deseado. La lixiviación de metales ahora se reconoce como un proceso principalmente químico en el que el hierro férrico y los protones son responsables de llevar a cabo las reacciones de lixiviación. El papel de los microorganismos es generar los productos químicos de lixiviación y crear el espacio en el que tienen lugar las reacciones de lixiviación. Los microorganismos suelen formar una capa de exopolisacárido (EPS) cuando se adhieren a la superficie de un mineral. Es dentro de esta capa de EPS donde las reacciones de biooxidación tienen lugar de manera más rápida y eficiente y, por lo tanto, el mismo sirve como espacio de reacción (Rawlings 2005).

El potencial redox de la solución a granel, y específicamente la proporción de hierro ferroso a hierro férrico, también influye, al menos indirectamente, de manera selectiva en la actividad de diferentes especies microbianas aunque hay eventos electroquímicos interfaciales en los que el ambiente local podría ser más agresivo. La discusión de los mecanismos de disolución de minerales a nivel molecular es probablemente más avanzada en el campo de la electroquímica de minerales que en el área de las interacciones microorganismo-metal, particularmente para organismos distintos de *A. ferrooxidans* y *L. ferrooxidans*. Si bien existe una gran diversidad de microorganismos acidófilos, son pocas especies las que predominan en las condiciones generalmente utilizadas en los procesos industriales. Cuando es posible mantener la acidez y el hierro férrico en solución con cualquiera de una variedad de especies, la composición real de la población puede no ser importante, pero a medida que cualquier parámetro (como la temperatura, el hierro férrico o la concentración de sal) se vuelve más selectivo, se

requiere más atención en la selección y desarrollo de una cultura para la aplicación (Chaeruna et al).

VARIABLES OPERATIVAS E INTERFERENCIAS

Las variables operativas van a depender del tipo de mineral y del sistema de tratamiento (pila de suelo, relaves, recuperación in situ, biorreactor tanque agitado): Aporte de oxígeno u otro aceptor de electrones, control de temperatura, aporte de nutrientes, grado de trituración o molienda, tipo de microorganismos que van a afectar el mineral y el pH sistema de tratamiento. Puede ser necesario incluir el aporte de azufre además de nitrógeno y fósforo (Natarajan, Rawlings and Johnson).

Las proporciones relativas de cada mineral dictan varios requisitos del proceso, como enfriamiento, consumo/producción de ácido, demanda de oxígeno, grado de precipitación y neutralización. Las interferencias pueden derivar de los compuestos que acompañan al mineral que aumentan la toxicidad al liberarse como el flúor. También se producen interferencia cuando se lixivian metales combinados como Zn y Pb en presencia de As y Cl que limita la recuperación de Pb por formación Cloruro de Arseniato de Plomo, sumamente insoluble. Se ha encontrado que el potencial redox influye en la biolixiviación y en algunos casos se ha logrado mejorar la capacidad de extracción mediante la aplicación de pequeños potenciales eléctricos (voltajes), pero en otros casos la aplicación es contraproducente, por lo que el desarrollo de la tecnología va a requerir ensayos de laboratorio que después deben ser escalados y los mismos deberán repetirse cuando cambie la composición del mineral a medida que avanza el proceso, implicando si es necesario el cambio de población microbiana o en el uso de biorreactores distintas etapas de procesamiento del mineral (Natarajan, Nguyen et al).

BIOPROCESAMIENTO DE MINERALES - CARACTERÍSTICAS

El bioprocesamiento de minerales puede ser el próximo gran desarrollo en el sector minero debido a la necesidad de utilizar cuerpos minerales enterrados profundamente y al mismo tiempo minimizar los costos de energía y la huella de carbono. Esta situación podría utilizar la extracción de metales de formaciones minerales fracturadas utilizando fluidos de lixiviación generados microbiológicamente, ya sea ex situ (biorreactores) o in situ (Mahmoud et al).

Los procesos de biominería más importantes son (Natarajan, Sethurajan et al):

- 1- Biolixiviación directa por actividad metabólica de las bacterias e indirecta por acción de metabolitos secundarios que implica la oxidación bacteriana y la disolución de minerales para la extracción de metales,
- 2- Biorreducción: convierte un metal soluble en especies insolubles que son separadas de una corriente líquida. Se aplica a metales preciosos y a metales tóxicos como Cr, Co, y Se, que pasan a formas menos solubles (con menor estado de oxidación)
- 3- Biosorción: los microorganismos se usan como adsorbentes y retienen en sus paredes celulares ya sea por sus propiedades o como un mecanismo de defensa. Uno de los usos es la extracción de metales de las corrientes de efluentes.
- 4- Biobeneficio: Bioflotación. Beneficiar a los minerales extraídos con miras a eliminar las impurezas minerales indeseables, enriqueciéndolos así con la fase mineral deseada antes de la extracción del metal. La flotación y floculación de minerales inducida por microbios se puede lograr a través de interacciones

microbiominerales que hacen que las superficies minerales sean hidrofóbicas o hidrofílicas a través de alteraciones químicas superficiales. Muchos biorreactivos específicos de minerales que contienen exopolisacáridos y compuestos proteicos sirven como colectores de flotación y depresores, así como también como floculantes o dispersantes.

MECANISMO DE BIOLIXIVIACIÓN

El proceso de biolixiviación utiliza el efecto catalítico producido por las actividades metabólicas de los microorganismos oxidantes de hierro y azufre, lo que resulta en una aceleración de la degradación química de los sulfuros. La biolixiviación es una técnica económica, eficiente, simple y respetuosa con el medio ambiente para descontaminar lodos en comparación con el proceso de tratamiento ácido. Microbios como *A. ferroxidans* involucrados en la biolixiviación no requieren ninguna fuente adicional de donantes de carbono y electrones. No se requiere una esterilización en el proceso, ya que el bajo pH logrado en el proceso en sí se ocupa de otros biocontaminantes. Estas características mejoran la viabilidad económica del proceso para aplicaciones a gran escala en condiciones de campo reales. Una vez que el metal se lixivia a la solución, la recuperación del metal de la solución rica en metales mediante el uso de cal, etc. hace que el proceso de biolixiviación en general sea rentable (Natarajan, Pathak et al).

La reacción de disolución del mineral no es idéntica para todos los sulfuros metálicos y la oxidación de diferentes sulfuros metálicos se produce a través de diferentes intermediarios. Un mecanismo de tiosulfato ha sido propuesto para la oxidación de sulfuros metálicos insolubles en ácido. En este mecanismo, la solubilización se produce mediante el ataque del hierro férrico a los sulfuros metálicos insolubles en ácido, siendo el tiosulfato el principal producto intermedio y el sulfato el principal producto final. Otro mecanismo, como el de polisulfuro para soluciones ácidas. En este caso, la solubilización del sulfuro de metal soluble en ácido es a través de un ataque combinado de hierro férrico y protones, con azufre elemental como principal intermediario. Este azufre elemental es relativamente estable, pero puede ser oxidado a sulfato por microbios oxidantes de azufre (Natarajan).

APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA BIOLIXIVIACION

Biolixiviación de metales y minerales de uso industrial

Los principales usos de la biominería son la lixiviación de minerales de Cu, U, Fe, Zn, Co, Ni, Au, Ag. Además se pueden utilizar los microorganismos para disminuir el contenido de S en petróleo y carbón, extraer metales del fuel oil y combustibles derivados del petróleo (Barry and Johnson, Bellenberg et al, Mahmoud et al, Natarajan, Rawlings and Johnson, Yana et al).

La biolixiviación comercial puede llevarse a cabo ex situ utilizando lo que puede considerarse un proceso de baja tecnología: el riego de vertederos o la formación de pilas de lixiviación (figuras 1 y 2) en donde se produce la lixiviación mediante la adición de agua, microorganismos si es necesario y nutrientes, con la posterior recolección de lixiviado, recuperación del metal de interés y reciclado de los fluidos remanentes. En este proceso se establece una población microbiana en el mineral

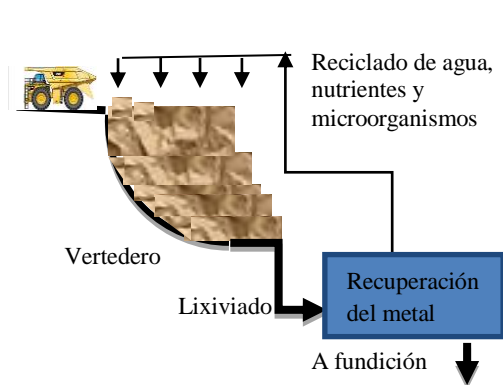


Figura 1: Lixiviación en vertederos

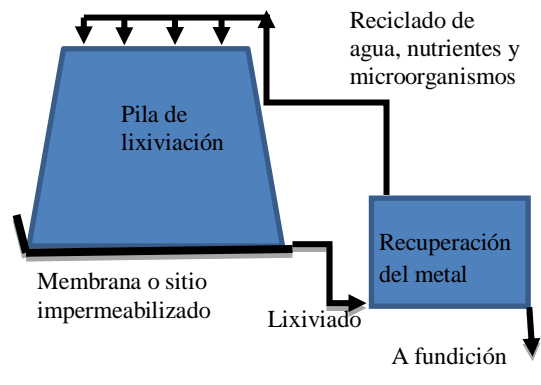


Figura 2: Pila de lixiviación

Este proceso se puede realizar en reactores biológicos en donde se pueden controlar mejor las variables operativas o realizar varias etapas en serie con diferentes microorganismos para atacar distintos componentes del mineral (figura 3) en lugar de usar las pilas de lixiviación (Natarajan).

Aparte del tratamiento ex situ si se dispone de una formación porosa que contenga el mineral de interés rodeada por formaciones impermeables se puede realizar la lixiviación in situ de acuerdo al esquema de la figura 4 (Natarajan) inyectando la solución de microorganismos desde un reactor a través de pozos inyectoras, el fluido atraviesa la formación generando una población importante de microorganismo y el lixiviado es recuperado mediante pozos extractores.

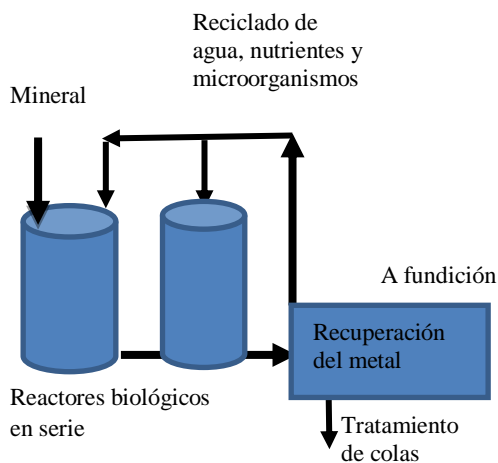


Figura 3. Lixiviación en reactores

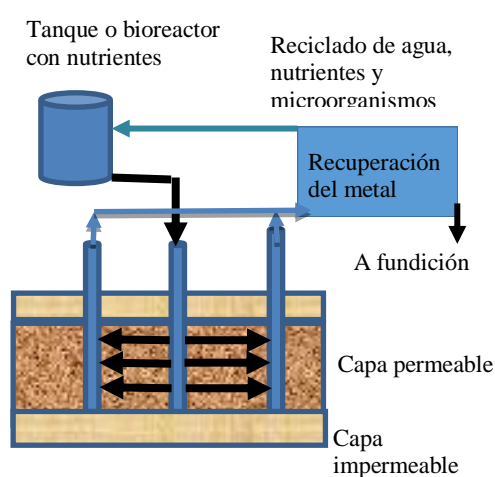


Figura 4. Biolixiviación in situ

Biolixiviación metales pesados de relaves mineros

La técnica de biolixiviación se ha aplicado cada vez más a la extracción y recuperación de minerales metálicos y sedimentos, suelos y lodos contaminados con metales pesados. Es un proceso ambientalmente más limpio en comparación con los procesos físicos y químicos, rara vez emite contaminantes atmosféricos y es más económico y fácil de operar. Se encuentra que las bacterias comúnmente empleadas en los procesos de biolixiviación son del género *Acidithiobacillus* y *thiobacillus*, como *Acidithiobacillus*

ferrooxidans, A. thiooxidans y Thiobacillus tioparus. La disolución directa de los minerales es causada por el ataque a los minerales sulfurados por el sistema enzimático de las bacterias situadas en la superficie del mineral. Para lograr una solubilización satisfactoria y eficiencias de recuperación de metales de los relaves mineros, es importante elegir las cepas bacterianas adecuadas que dependerán del tipo de metales pesados que necesitan recuperarse y proporcionar las condiciones óptimas para el crecimiento bacteriano (Nguyen et al, Zhao et al).

Lixiviación química y bacteriana de metales de una escoria de fundición

Las propiedades de los residuos de escoria de fundición son muy variables en cuanto a mineralogía y contenido de metales y son específicas del proceso metalúrgico. Existen preocupaciones ambientales sobre el almacenamiento a largo plazo en rellenos sanitarios, vertederos y lagunas debido a la solubilización potencial de elementos bajo condiciones ambientales. Los metales en las escorias también representan una pérdida de ingresos ya que no se recuperan durante el proceso de fundición. Algunos autores informaron una disolución de Cu de una escoria de fundición de cobre usando sulfato férrico-ácido sulfúrico como lixiviante. En ambos estudios, el proceso podría potencialmente emplear microorganismos moderadamente termofílicos para producir y regenerar soluciones de sulfato férrico. Los materiales de desecho de escorias metalúrgicas son insuficientes como sustratos para las bacterias y su biolixiviación requiere la adición de S externo o Fe^{2+} . La lixiviación química se consideró insignificante en comparación con los resultados del enfoque de biolixiviación (Kaksonen et al).

Biolixiviación de residuos producidos en hornos de petróleo

El fuel oil es una de las fracciones pesadas en los procesos de destilación del petróleo, es un líquido espeso y viscoso y se utiliza para la generación de energía debido a su alto valor energético. Cuando se quema produce dos clases de ceniza. Las cenizas de fondo son las cenizas pesadas que quedan en el fondo del horno y las cenizas volantes son las cenizas ligeras que se acumulan en las pilas del horno. Los hornos alimentados con petróleo producen cenizas residuales clasificadas como de alto grado con una concentración de vanadio mayor al 10% con cantidades variables de níquel. Se ha estudiado la biolixiviación de metales a partir de una muestra de cenizas quemadas con petróleo ricas en Vanadio (OFA: oil - fired ash) utilizando Acidithiobacillus ferrooxidans. El resultado mostró que la biolixiviación fue más efectiva que la lixiviación química. Los resultados indicaron que el proceso de biolixiviación detoxificó el OFA y el biolixiviado podría reutilizarse en otros procesos o eliminarse de manera segura (Lee et al).

Biolixiviación de metales pesados a partir de lodos de depuradora

El tratamiento de las aguas residuales municipales da como resultado la producción de grandes cantidades de lodos de depuradora, cuya eliminación es de gran preocupación ambiental. La aplicación al suelo es el método más utilizado en todo el mundo y se considera uno de los métodos más económicos para la eliminación de lodos ya que es una fuente de nutrientes y fácilmente disponible y, por lo tanto, puede ahorrar costos sustanciales, si se aplica al suelo como fertilizante. Se caracterizan por presentar N, P, otros micronutrientes (cobre, zinc, molibdeno, boro, hierro, magnesio y calcio) y

materia orgánica que son beneficiosos para la silvicultura, la producción de vegetación y el paisajismo. La aplicación de lodos en tierras agrícolas mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Sin embargo, la aplicación repetida de lodos contaminados puede liberar metales pesados en el suelo debido a la descomposición de la materia orgánica. Esto da como resultado la incorporación de metales pesados en la cadena alimenticia pudiendo alcanzar al ser humano y la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por los metales lixiviados. Además, el exceso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo así como bacterias y contaminantes orgánicos presentes en el lodo puede filtrarse a las aguas subterráneas, si no es consumido por la vegetación. En los últimos años se han realizado varios intentos para la descontaminación de los lodos antes de su vertido en tierra. La aplicación práctica de los procesos químicos aún es limitada debido al requerimiento de una gran cantidad de productos químicos, el alto costo, las dificultades operativas y los problemas de contaminación secundaria asociados con ellos. Por lo tanto, el interés de la investigación se desplazó hacia el proceso de biolixiviación que, es un método eficiente y económico para la eliminación de metales pesados del lodo. El proceso también se ha aplicado con éxito para la remediación de suelos, sedimentos, desechos industriales y desechos sólidos contaminados con metales (Pathak et al).

Eliminación biológica de azufre y cenizas de carbones de azufre con alto contenido de pirita de grano fino utilizando un cultivo mixto de microorganismos mesófilos.

La biolixiviación de pirita de carbón es una opción prometedora para reducir el contenido de azufre de los carbones con alto contenido de azufre desde un punto de vista económico, técnico y ambiental. Se han realizado con un cultivo mixto de microorganismos mesófilos acidófilos oxidantes de hierro y azufre, incluidos *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* para eliminar el azufre pirítico del carbón con alto contenido de azufre de Mehr Azin, Tabas, Irán. Los ensayos se llevaron a cabo con una densidad de pulpa del 5 % (p/p), un tamaño de partícula inferior a 500 μm , y una velocidad de agitación de 150 rpm a 35 °C durante 30 días. La máxima remoción de azufre (50,3% de azufre total) se obtuvo al pH inicial de 1, la adición de sulfato ferroso de 0,02 M y medio nutritivo Norris. Los valores de contenido total de azufre y cenizas se redujeron de 3,87% a 1,92% y de 25,72% a 11,6%, respectivamente (Kiania et al).

Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)

Los componentes eléctricos y electrónicos se encuentran conformados a partir de polímeros, metales y materiales cerámicos. Con el desarrollo tecnológico y la mayor utilización, la vida útil de los mismos se ha visto disminuida lo que trae como consecuencia una producción mayor de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Se considera residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) a todo objeto o sustancia que cumplida su vida útil o que se encuentra fuera de servicio es desechada o almacenada. Dentro de los RAEE se tienen en cuenta componentes, subconjuntos y consumibles que son constituyentes del aparato en el momento en que se descarta. La definición de RAEE incluye a residuos provenientes de hogares como los de uso profesional. Para el tratamiento de estos residuos se utilizan principalmente biolixiviación, biorreducción y biocianuración. En menor medida se utilizan biosorción y bioflotación (Sethurajan et al).

Los microorganismos involucrados más empleados son (Sethurajan et al 2018): Bacterias quimiolitotrofas (acidithiobacillus thiooxidans y ferrooxidans); Bacterias heterótrofas (Cromobacterium violaceum y algunas especies de pseudomonas) y Hongos (Aspergillus Níger). Estos interactúan con los metales presentes en residuos generando subproductos tales como ácidos inorgánicos (ácido sulfúrico, cianuro), ácidos orgánicos (cítrico, oxálico, acético, etc.), exopolisacáridos, sideróforos (reductores de hierro) y otros metabolitos que permiten la disolución de minerales como es en el caso de los ácidos y también dan lugar a la formación de complejos y quelatos de iones metálicos juntos con los metabolitos formados (Sethurajan et al 2018; Mirazimi et al 2015; Isildara et al). Este proceso se encuentra en fase de laboratorio aún. En los mismos se realiza la trituración del residuo y luego se trata en solución entre 2 y 8 % formando una pulpa, cuando se utilizan bacterias el pH es ácido y cuando se usan hongos es alcalino. Las temperaturas varían entre 20 y 60 °C dependiendo del microorganismo considerado. Los factores principales que afectan a estos procesos son: concentración de la biomasa aplicada, pH, Tolerancia de los microorganismos a los metales que se busca separar, Tipo y cantidad de productos metabólicos liberados, Densidad de pulpa, tamaño de grano y composición mineral. Los resultados de diferentes ensayos se muestran en la Tabla 1 (Sethurajan et al 2018; Mirazimi et al 2015; Isildara et al).

Tabla 1. Resultados de biotratamiento de RAEE

Material	organismo	Metal lixiviado	Remoción lograda	Mecanismos
placas de circuitos	<i>acidithiobacillus thiooxidans</i> y <i>Ferrooxidans</i>	Cu, Al, Zn, Pb, Sn, Cd, Au	> al 90 % de Cu, Al, Zn, Pb, Sn, Cd	Producción de ácido sulfúrico y biorreduccion
	<i>Cromobacterium Violaceum</i>			cianuro biogénico
	<i>Pseudomonas Putida</i>		15% de Au	Acidos orgánicos (acético, oxálico, cítrico)
	<i>Aspergillus Niger</i>			
Residuos LED	<i>acidithiobacillus Ferrooxidans</i>	Cu, Ni y Ga	84% Cu 96% Ni 60% Ga	Biorreduccion
convertidor LD	<i>acidithiobacillus thiooxidans</i>	V	92% de V	Ácido sulfúrico
	<i>Pseudomonas Putida</i>			ácidos orgánicos
	<i>Aspergillus Niger</i>			
lámparas fluorescentes	<i>consorcio de zygosaccharomyces lentusy</i>	Yb, Eu (tierras raras)	7,4 - 12,5 % de Yb y Eu.	ácidos Orgánicos

CONCLUSIONES

1. El uso de microorganismos es una técnica útil para procesar minerales de baja ley y residuos industriales
2. Requiere un manejo cuidadoso de los fluidos que se generan para recuperar el metal
3. Es útil para tratar corrientes residuales en donde la concentración de metales es baja y hace muy costosos los métodos químicos
4. Para llevarla a cabo se requieren ensayos de laboratorio y planta piloto para determinar las variables operativas del proceso antes de llevarla a escala industrial
5. Es prometedor su uso para tratar corrientes de residuos electrónicos. Este proceso se encuentra en su mayor parte en fase de laboratorio aún.
6. Como desventaja requiere aún la voladura y trituración del mineral en la mayoría de los procesos industriales.

REFERENCIAS

- Barrie D, Johnson D: *Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials*. Current Opinion in Biotechnology 30 (2014), 24-31.
- Bellenberg S, Diaz M, Noël N, Sand W, Poetsch A, Guiliani N, Vera M: *Biofilm formation, communication and interactions of leaching bacteria during colonization of pyrite and sulfur surfaces*. Research in Microbiology 165 (2014), 773-781
- Chaerun, Siti Khodijah; Robi Suryaning Sulistio, Wahyudin Prawira Minwala, Mohammad Zaki Mubaroka. Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger*. Hydrometallurgy 174 (2017) 29-37.
- Ghassa S, Boruomand Z, Moradian M, Abdollahi H, Akcil A: Microbial Dissolution of Zn-Pb Sulfide Minerals using mesophilic iron and sulfur-oxidizing acidophiles. Mineral Processing & Extractive Metal 36 (2015), 112-122.
- Işıldar A: ., Renea E. , van Hullebuscha E , Lensa P. “*Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies*” , Resources, Conservation & Recycling 135 (2018) 296-312.
- Jeremic,Sanja; Vladimir P. Be-skoski, Lidija Djokic, Branka Vasiljevic, Miroslav MVRivic, Jelena Avdalovic, Gordana Gojgi Cvijovic, Latinka Slavkovic Beskoski, Jasmina Nikodinovic-Runic. Interactions of the metal tolerant heterotrophic microorganisms and iron oxidizing autotrophic bacteria from sulphidic mine environment during bioleaching experiments Journal of Environmental Management 172 (2016) 151-161
- Kaksonen, Anna H.; Silja Särkijärvi, Jaakko A. Puhakka, Esa Peuraniemi, Saku Junnikkala, Olli H. Tuovinen. *Chemical and bacterial leaching of metals from smelter slag in acid solutions*.Hydrometallurgy 199 (2016) 46-53.
- Lee, Eunseong, Yosep Han, Jeonghyun Park, Jeongsik Hong, Rene A. Silva, Seungkon Kim, Hyunjung Kim. *Bioleaching of arsenic from highly contaminated mine tailings using *Acidithiobacillus thiooxidans**. Journal of Environmental Management 147 (2015) 124-131.
- Kiani, MH; A. Ahmadi., H. Zilouei *Biological removal of sulphur and ash from fine-grained high pyritic sulphur coals using a mixed culture of mesophilic microorganisms* Fuel 131 (2014) 89-95.
- Mahmoud A, Cézac P, Hoadley A, Contamine F, D’Hugues P: A review of sulfide minerals microbially assisted leaching in stirred tank reactors. International Biodeterioration & Biodegradation 2017, 119:118-146.
- Mirazimi S.M.J, Abbasalipour Z., Rashchi F. “*Vanadium removal from LD converter slag using bacteria and fungi*”. Journal of Environmental Management 153 (2015) 144-151.

- Mishra, A; N. Pradhan, RN Kar, LB Sukla, BK Mishra Microbial recovery of uranium using native fungal strains *Hydrometallurgy* 95 (2009) 175-177.
- Natarajan, K.A. *Biotechnology of Metals*. Elsevier, Amsterdam 2018.
- Nguyen; Van Khanh, Mu Hyun Lee, Hyung Jun Park, Jong-Un Lee. *Bioleaching of arsenic and heavy metals from mine tailings by pure and mixed cultures of Acidithiobacillus spp.* *Journal of industrial and Engineering Chemistry* 21 (2015) 451-458.
- Park J, Han Y, Lee E, Choi U, Yoo K, Song Y, Kim H: Bioleaching of highly concentrated arsenic mine tailing by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Separation and Purification Technology* 133 (2014), 291-296.
- Pathak, A; Dastidar, MG; Sreekrishnan, V. *Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review.* *Journal of Environmental Management* 90 (2009) 2343-2353.
- Qu, Yang; Bin Lian: Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using *Penicillium tricolor*. *Bioresource Technology* 136 (2013), 16-23.
- Rastegar, SO; Mousavi, SM; Shojaosadati, SA; Sarraf Mamoory. R. *Bioleaching of V, Ni, and Cu from residual produced in oil fired furnaced using Acidithiobacillus ferrooxidans.* *Hydrometallurgy* 157 (2015) 50-59.
- Rawlings D: Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. *Microbial Cell Factories*. 2005, 4:13.
- Rawlings D, Johnson, D. *Biomining*. Springer –Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- Sethurajan M., van Hullebusch E., Nancharaiyah Y. “*Biotechnology in the management and resource recovery from metal bearing solid wastes: Recent advances*”, *Journal of Environmental Management* 211 (2018) 138-153.
- Xia, Mingchen; Peng Bao , Ajuan Liu , Mingwei Wanga , Li Shena , Runlan Yua , Yuandong Liua , Miao Chenc , Jiaokun Lia , Xueling Wua , Guanzhou Qiu , Weimin Zenga, “*Bioleaching of low-grade waste printed circuit boards by mixed fungal culture and its community structure analysis*”, *Resources, Conservation & Recycling* 136 (2018) 267-275.
- Yan,Lei; Huixin Hu, Shuang Zhang, Peng Chen, Weidong Wang, Hongyu Li. *Arsenic tolerance and bioleaching from a realgar base on response Surface methodology by Acidithiobacillus ferrooxidans isolated from Wadalianchi volcanic lake, northeast China.* *Electronic Journal of Biotechnology* 25 (2017) 50-57.
- Zhao, Hong; Jun Wang, Xiaowen Gan, Minghao Hu, Erxing Zhang, Wenqing Qin, Guanzhou Qiu. *Cooperative bioleaching of chalcocite and silver-bearing tailing by mixed moderately thermophilic culture: An emphasis on the chalcocite dissolution with XPS and electrochemical analysis.* *Mineral Engineering* 81 (2015) 29-39.