

Situación actual y perspectivas de la Biotecnología aplicada a la minería en Colombia

Marbel Johanna González

Docente Asesor Carlos Eduardo Barragán Vidal

Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD

Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

2024

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios y a mis padres por haberme brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias a ellos, he podido alcanzar todos mis objetivos académicos y estar donde estoy hoy.

También quiero reconocer la labor de mi tutor y de mis docentes, quienes han compartido sus amplios conocimientos conmigo y me han guiado en mi camino hacia el éxito. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para mi desarrollo académico y profesional.

Cada uno de ellos ha dejado una huella imborrable en mi memoria y siempre los llevaré conmigo a lo largo de mi vida profesional. Sus enseñanzas y consejos serán mi guía en cada paso que dé en el mundo laboral.

No puedo expresar con palabras lo agradecida que me siento por haber contado con un equipo tan valioso de personas que han creído en mí y han invertido su tiempo y esfuerzo en mi formación. Sin ellos, no habría llegado hasta aquí.

Espero poder retribuir todo lo que me han dado, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos y contribuyendo de manera positiva en mi campo profesional. Estoy emocionada por lo que depara el futuro y sé que, con su apoyo y guía, podré alcanzar grandes logros.

Resumen

La biooxidación y biolixiviación, procesos microbianos que emplean bacterias acidófilas, son métodos innovadores para extraer metales de minerales sulfurados y residuos como los electrónicos. Estas biotecnologías ofrecen alternativas más ecológicas que los métodos tradicionales de extracción. Esta monografía revisa las aplicaciones biotecnológicas en minería y el estado de la biominería en Colombia, evaluando su potencial como tecnología sostenible. La investigación se centró en estudios y casos exitosos del uso de bacterias acidófilas para tratar minerales y recuperar metales. Aunque se identificaron limitaciones en los estudios actuales, los resultados muestran aplicaciones efectivas, destacando el potencial de la biominería. La biominería podría ser una opción prometedora para la minería en Colombia, reduciendo el impacto ambiental negativo. No obstante, se requiere más investigación y desarrollo para facilitar su adopción en la industria minera del país.

Palabras claves: Bacterias acidófilas, Biominería, Biooxidación, Minerales, Roca fosfórica

Abstract

Biooxidation and bioleaching, microbial processes using acidophilic bacteria, are innovative methods for extracting metals from sulfide ores and residues such as electronic waste. These biotechnologies offer more environmentally friendly alternatives compared to traditional extraction methods. This monograph reviews biotechnological applications in mining and the current state of biomining in Colombia, assessing its potential as a sustainable technology. The research focused on studies and successful cases of using acidophilic bacteria to treat ores and recover metals. While limitations in current studies were identified, the results demonstrate effective applications, highlighting biomining's potential. Biomining could be a promising option for mining in Colombia, reducing negative environmental impacts. However, further research and development are needed to facilitate its adoption in the country's mining industry.

Keywords: Acidophilic bacteria, Biomining, Biooxidation, Ores, Phosphate rock

Tabla de contenido

Introducción	9
Descripción del problema	10
Planteamiento del problema.....	11
Sistematización del problema	12
Justificación	13
Objetivos	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Marco Teórico	16
Bacterias acidófilas en el contexto de la minería.....	16
Mecanismos de adaptación de bacterias acidófilas a ambientes ácidos y ricos en metales.....	19
Biooxidación y biolixiviación de minerales	21
Extracción de metales preciosos:	22
Lixiviación de roca fosfórica empleando ácido biogénico	28
Lixiviación de metales a partir de residuos de tipo tecnológico y electrónicos.....	32
Contexto Colombiano – Proyectos vigentes	39
Perspectivas de la biominería en Colombia	43
Desafíos Ambientales Actuales.....	44
Importancia de la Recuperación de Metales	45
Papel de la Biotecnología.....	45
Ventajas de la biolixiviación	46
Desafíos.....	47

Beneficios Ambientales	48
Desafíos Económicos y Tecnológicos.....	50
Perspectivas de Futuro	51
Biolixiviación: Una Alternativa Sostenible para la Minería en Colombia	54
Recuperación de Metales Valiosos a Partir de Menas de Baja Ley	54
Recuperación de Metales Preciosos y Tierras Raras desde Residuos Electrónicos.....	54
Análisis del Marco Normativo y Regulatorio	55
Beneficios Económicos y Ambientales de la Implementación de la Biolixiviación en Colombia	55
Identificación de avances entorno a la implementación de biominería en Colombia.....	56
Conclusiones	59
Recomendaciones	61
Referencias Bibliográficas	63

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Géneros bacterianos empleados en procesos de biooxidación</i>	16
Tabla 2 <i>Ejemplos de valores de metales recuperados mediante la biolixiviación</i>	36
Tabla 3 <i>Ejemplos de valores de metales recuperados mediante “biouptake”</i>	37

Lista de figuras

Figura 1 <i>Ruta metabólica de la Oxidación de azufre en bacterias acidofilas</i>	18
Figura 2 <i>Ciclo del azufre en la tierra</i>	20
Figura 3 <i>Biorreactor para la producción de ácido biogénico utilizando cultivo de <i>A thiooxidans</i> y posterior adición de roca fosfórica para solubilización</i>	29

Introducción

En Colombia el sector de la minería representa un renglón significativo a la economía nacional y regional, con un aporte del 1,38 % del PIB colombiano, se estima que crea directamente 154.000 puestos de trabajo e indirectamente más de medio millón más a través de sus cadenas de producción. Sin embargo, los impactos ambientales derivados de la explotación minera sin controles han ocasionado una imagen negativa sobre el sector y han repercutido en las políticas públicas de cara a su futuro. En este contexto, la aplicación de tecnologías más limpias derivadas de procesos biotecnológicos como la biominería, se presentan como alternativas más amigables con el medio ambiente que permiten hacer un aprovechamiento más sostenible de los recursos mineros sin generar impactos muy negativos sobre el medio ambiente o las comunidades. Aunque estas tecnologías no son recientes, en Colombia su aplicación es muy incipiente y se limita a proyectos de investigación en laboratorio que apenas han concluido en estudios de prefactibilidad, sin llegar a etapa de prototipos o plantas piloto. Es una tendencia que los proyectos no trasciendan de investigación en laboratorio debido a restricciones de recursos y falta de inversionistas en el sector minero.

La presente monografía se desarrolla con el fin de realizar un estado de arte sobre la aplicación de tecnologías de biominería en Colombia, para finalmente dar a conocer las perspectivas prometedoras para el sector minero, el medio ambiente y la sociedad en general. Sin embargo, es necesario seguir impulsando la investigación y el desarrollo de estas tecnologías, así como fomentar su adopción en la industria minera del país. Esto requerirá la colaboración entre el sector público, el sector privado, la academia y la sociedad civil para lograr un aprovechamiento más sostenible de los recursos mineros de Colombia. Problema

Descripción del problema

El empleo de métodos tradicionales para extraer metales en Colombia se aborda desde cuestionar una de las problemáticas que se presentan actualmente en torno al tema ambiental en nuestro país. La problemática a nivel mundial es menor porque en países desarrollados la minería está regulada bajo estándares internacionales estrictos que protegen el medio ambiente y prohíben la minería ilegal, Si bien es cierto que la minería dentro de nuestros territorios ha estado presente desde la época precolombina (Santa, 2022), los daños ocasionados resultan ser cada vez más severos principalmente por la minería ilegal.

“La denominada minería ilegal, como es sabido, no solamente constituye un recto quebrantamiento de la ley, sino que, por lo demás, irradia efectos en distintos ámbitos como son el ambiental y el económico” (Restrepo et al., 2017)

Un ejemplo de ello es la contaminación de mercurio por su persistencia en todo tipo de entornos o la generación de gases efecto invernadero con altas cargas de arsénico y óxidos de azufre, tras la calcinación de minerales refractarios (Gahan et al., 2012; Johnson, 2014). Por otra parte, preocupa la liberación de metales pesados a las fuentes hídricas lo que implica una afectación sobre la vegetación, que causa la desaparición de la fauna y la flora, debido a que, según la PGN:

“(…) estas explotaciones ilegales, en algunos casos, se desarrollan en áreas de una especialísima protección ambiental, como parques naturales, páramos, zonas de reserva, las que, al hacerse sin ningún control, pueden ocasionar daños irreversibles e irreparables a ecosistemas protegidos, no solo establecidos por la normatividad local, sino por estándares internacionales.” (p.5).

Planteamiento del problema

De cuestionar el ejercicio de la minería, esto llevaría al país a disminuir el impacto ambiental que ha dejado la falta de implementación de tecnologías y recursos sostenibles, sobre todo en los departamentos más afectados por esta práctica ilegal, un ejemplo de la minería ilegal en Colombia lo encontramos en Santander de Quilichao, por esto es necesario y por factores ambientales la puesta en marcha de la biotecnología en el sector minero. A través de la implementación de tecnologías amigables con el medio ambiente, como la biohidrometalurgia, se puede reducir la liberación atmosférica de residuos químicos peligrosos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la descontaminación de entornos afectados por metales pesados, lo que garantiza que la minería cree un vínculo más estable con el tema de la sostenibilidad ambiental.

Una de las posibles alternativas se basa en el uso de microorganismos, específicamente bacterias acidófilas, para extraer metales de minerales refractarios, a partir de residuos tecnológicos o mediante la obtención de ácido biogénico necesario para la lixiviación o solubilización en algunos procesos mineros. De esta manera, la industria minera lograría perdurar dentro del mercado y mejorar su competitividad dentro del mismo.

La demanda creciente de minerales en el contexto del desarrollo de nuevos elementos tecnológicos plantea desafíos en términos de suministro y sostenibilidad. Por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre el impulso hacia la utilización de los recursos no renovables y la necesidad de gestionar adecuadamente los impactos asociados con la extracción y producción de minerales. No obstante, a pesar de que en Colombia existen algunos tipos de tecnologías limpias, su implementación no se ve reflejada en la cantidad de recursos extraídos mediante procesos biotecnológicos debido a que no hay requisitos ambientales estrictos que los obliguen a ponerlos en práctica, así como tampoco existe el conocimiento de parte del sector minero para

implementar este tipo de procesos. De ahí que sea importante observar las aplicaciones ambientales que han surgido a nivel global dentro del Sector Minero, puesto que este sector se enfrenta a desafíos relacionados con la protección del medio ambiente, los impactos en las comunidades y la necesidad de promover prácticas responsables. Por este motivo, es fundamental implementar políticas y regulaciones que fomenten la sostenibilidad y la responsabilidad social en este sector, pues dichas medidas son necesarias para asegurar un equilibrio y una gestión responsable de la actividad de explotación minera en Colombia, minimizando los impactos negativos tanto en el medio ambiente como en las comunidades locales.

Sistematización del problema

Mediante el desarrollo de la presente monografía se busca destacar la implementación de la biominería como alternativa de solución, ya que la biominería mitiga o reduce el impacto ambiental ocasionado durante la explotación de recursos a diferencia de los otros métodos de explotación ilegal o legal mediante técnicas metalúrgicas convencionales

En la monografía se encontrará información base que será de utilidad para el desarrollo de avances científicos, tecnológicos y de innovación asociados a los procesos biotecnológicos de aplicación en el sector de la minería extractiva.

Justificación

La explotación minera en Colombia, así como el aprovechamiento de recursos minerales es un tema que día a día cobra mayor relevancia debido a las cuestiones socioambientales sobre las que se están cimentando, en función del potencial económico de este sector y de la posibilidad de realizarla en forma sostenible y sin generar impactos al medio ambiente, mediante la implementación de procesos biotecnológicos. Por este motivo se hacen necesarios los procesos de investigación, innovación y desarrollo enfocados a la obtención de recursos no renovables teniendo en cuenta las alternativas más amigables con el medio ambiente y con la salud de todos los implicados en el proceso, dado que el manejo inapropiado de los recursos y sin los controles de regulación ambiental o utilizando las metodologías tradicionales sin considerar tecnologías novedosas y más amigables con el medio ambiente, ha desencadenado un alto impacto ambiental, social y de salud pública en función de sólo producir sin medir las consecuencias.

Por tal motivo, el sector minero en articulación con los sectores académicos y bajo el control estricto de los entes gubernamentales, ofrece una importante oportunidad que permita construir una perspectiva que integre la situación actual del país en torno a la minería a partir de estrategias biotecnológicas que se presentan como una alternativa amigable con el medio ambiente y que los recursos puedan ser motor de la economía para las regiones. Aunque las tecnologías que hacen uso y aprovechamiento de la biodiversidad del país para la obtención de metales como el oro, zinc, y cobre, así como la extracción de fósforo para procesos agrícolas o el reciclaje de metales a partir de residuos tecnológicos (biominería) son promisorias, no hay información relevante sobre su implementación o conocimiento de parte del sector minero o inclusive de las entidades territoriales u organismos gubernamentales. Esto genera un vacío de conocimiento en el estado actual de los procesos biotecnológicos aplicados a la minería y es

pertinente establecer la información base, de forma que dicha investigación no sólo sea prioritaria, sino que brinde las bases para aportar un pensamiento crítico y social que pueda contribuir a mejorar las condiciones materiales y sociales del país, para así poder generar, tal como se hace mención en nuestro Decálogo de valores, mejores condiciones de vida a las poblaciones vulnerables y tener un compromiso por el lugar que habitamos .

Una de las razones principales por las que este trabajo resulta de gran importancia, pues quien indaga, tiene una cercanía con las problemáticas y posibles soluciones a estos problemas y constituye un primer avance para poder dar a conocer la necesidad de estas tecnologías y de los beneficios que aportarían para todos los sectores implicados.

Con el desarrollo de la monografía mediante una recopilación de información a partir de archivos, bibliografía especializada y artículos de divulgación, así como boletines oficiales de los diferentes departamentos y de la agencia nacional de minería, se mostrará el nivel de avance en la implementación de los procesos biotecnológicos y se demostrará por qué no solo es factible, sino necesaria su aplicación en otros procesos ambientales asociados como la descontaminación de efluentes por biorremediación, la solubilización de fósforo a partir de roca fosfórica mediante el uso de ácido sulfúrico biogénico y otras tecnologías emergentes. Al finalizar se recopilará evidencia que sustenta la necesidad de una minería responsable basada en procesos biotecnológicos como alternativa para mantener activo un sector de la economía tan importante para el país, sin causar los efectos ambientales tan nefastos que dejan un imaginario negativo en toda la sociedad.

Objetivos

Objetivo General

Establecer el contexto actual de las aplicaciones biotecnológicas en el sector minero de Colombia y su nivel de desarrollo o implementación.

Objetivos Específicos

Describir los procesos biotecnológicos que se emplean mundialmente en el sector minero y que son amigables con el medio ambiente.

Identificar los títulos mineros o procesos que actualmente hacen uso o aprovechamiento de las aplicaciones biotecnológicas en Colombia.

Evaluar la viabilidad técnica y ambiental de implementar tecnologías limpias y recursos sostenibles en la industria minera de Colombia, considerando la gestión responsable de los recursos minerales.

Marco Teórico

La búsqueda de información en torno a los conceptos relevantes en el campo de la biominería tiene como objetivo explorar y analizar diversos avances en el ámbito de la biooxidación, biolixiviación y otros procesos actualmente empleados en la minería e hidrometalurgia. Esta sección se estructura en torno a cinco principales áreas de investigación que han destacado en la literatura especializada.

Bacterias acidófilas en el contexto de la minería

En esta sección, se expondrán los mecanismos bioquímicos que permiten la extracción de metales a través de la actividad de bacterias acidófilas. Se exploran procesos como el de oxidación de azufre y hierro que han revolucionado la recuperación de metales tanto base como valiosos.

Las bacterias acidófilas son organismos microscópicos que pueden sobrevivir y prosperar en ambientes altamente ácidos, en los rangos de pH establecidos en la Tabla 1, según el género.

Tabla 1

Géneros bacterianos empleados en procesos de biooxidación

Género bacteriano	Rango del pH (Crecimiento)
Acidithiobacillus sp.	1.0 - 4.5
Leptospirillum sp.	1.0 - 2.5
Ferroplasma	0.5 - 2.5
Picrophilus	0.7 - 4.0
Alicyclobacillus	3.0 - 6.0
Sulfobacillus	2.0 - 5.5

Nota: Bacterias acidófilas y sus rangos de pH para crecimiento

Estas bacterias se encuentran comúnmente en lugares como minas abandonadas, efluentes propios de minas (drenajes ácidos), fuentes termales ácidas y lagos volcánicos (Dopson & Okibe, 2022).

Una de las características más destacadas de las bacterias acidófilas es su capacidad para oxidar minerales y extraer metales en un proceso conocido como biolixiviación (Brierley, 2008). En lugar de degradar directamente el mineral (en el caso de sulfuros metálicos), estos microorganismos oxidan los compuestos de azufre reducido presentes, lo que lleva a la solubilización y liberación de los metales ocluidos en la matriz mineral, tales como cobre, zinc o níquel (Dopson et al., 2004; Kaksonen et al., 2020).

La oxidación del hierro por parte de las bacterias acidófilas es un proceso importante en el pretratamiento de minerales previo a la liberación de los metales valiosos contenidos en minerales refractarios, toda vez que la forma oxidada (Fe^{3+}) es un potente oxidante que actúa sobre los sulfuros metálicos. Esta oxidación acelera el proceso de disolución y libera nuevos iones (Fe^{2+}) que pueden ser nuevamente oxidados para continuar con un proceso cíclico. Dentro de las bacterias oxidadoras de hierro se encuentran las especies *A. ferroxidans*, *A. ferrianus*, *A. ferridurans*, *A. ferriphilus*, varias de estas identificadas en efluentes de minas colombianas (Barragán et al., 2020).

La oxidación de azufre elemental (S^0) a sulfato (SO_4^{2-}) es llevada a cabo por las bacterias acidófilas oxidadoras de compuestos reducidos de azufre, a través de la ruta metabólica del azufre. En este proceso, el azufre elemental es oxidado progresivamente a sulfuro (S^{2-}), sulfito (SO_3^{2-}) y finalmente a sulfato. Las enzimas clave involucradas en esta ruta son (Wang et al., 2019):

Sulfito:sulfito oxidorreductasa (SOR), que cataliza la oxidación de sulfito a sulfato.

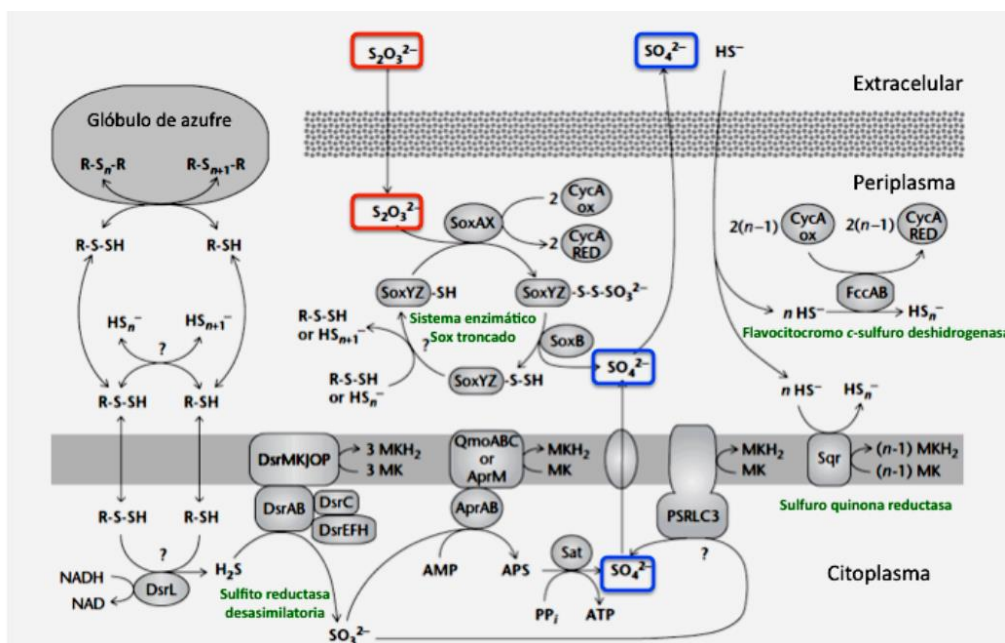
Polisulfuro reductasa (*Psr*), que oxida el azufre elemental a sulfuro.

Sulfoquinasa, que activa el sulfuro a sulfito.

En la Figura 1 se ilustra esquemáticamente la ruta metabólica de la oxidación de azufre llevada a cabo por bacterias acidófilas como *A. ferrooxidans* o *A. thiooxidans*.

Figura 1

Ruta metabólica de la Oxidación de azufre en bacterias acidófilas



Nota: Ilustración tomada y modificada de Espinoza et al., 2010.

Este proceso de oxidación de azufre es esencial en la biolixiviación de minerales sulfurados, ya que permite la generación de ácido sulfúrico, un potente agente solubilizador de las matrices de sulfuro (Wang et al. 2019). Por su parte, las bacterias acidófilas obtienen la energía necesaria para su crecimiento a partir de la oxidación de estos compuestos reducidos de azufre o del hierro (Rawlings, 2002).

Mecanismos de adaptación de bacterias acidófilas a ambientes ácidos y ricos en metales

Las bacterias acidófilas han desarrollado múltiples mecanismos de adaptación fisiológica y bioquímica que les permiten tolerar la acidez extrema y las altas concentraciones de metales pesados presentes en sus hábitats naturales (Dopson et al., 2014). Estas adaptaciones son esenciales para su supervivencia y las han convertido en organismos únicos capaces de prosperar en condiciones consideradas adversas para la mayoría de formas de vida (Baker-Austin & Dopson, 2007).

Uno de los principales mecanismos es la modificación de la permeabilidad de la membrana celular, incrementando su hidrofobicidad y reduciendo el ingreso masivo de protones al citosol (Sánchez-Andrea et al., 2011). Igualmente, cuentan con bombas de expulsión de protones muy eficientes que mantienen un gradiente de pH a través de la membrana, preservando un pH citosólico cercano a la neutralidad (Baker-Austin & Dopson, 2007).

Las enzimas de estas bacterias presentan adaptaciones conformacionales que les permiten funcionar de manera reversible en condiciones de acidez extrema. Además, sintetizan metabolitos osmoprotectores como glicina-betaína y ectoína que previenen la desnaturalización proteica (Dopson et al., 2014).

Estos microorganismos acidófilos han desarrollado enzimas especializadas que les permiten obtener energía a través de la oxidación de azufre y hierro en condiciones de alta acidez. Entre las enzimas clave se encuentran el sulfito oxidasa, la tetrionato oxidasa y el arsenito oxidasa, que desempeñan un papel fundamental en el proceso de biolixiviación (Kaksonen, et al. 2020).

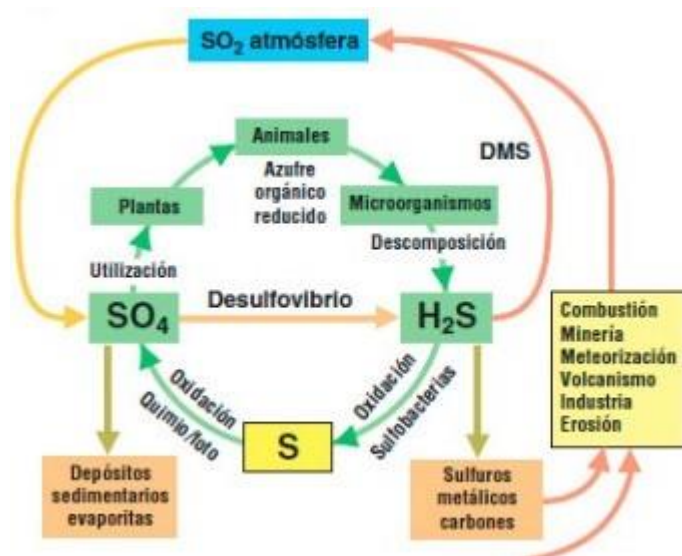
Otro mecanismo importante es la unión de metales pesados solubles a proteínas, péptidos y otros ligandos para reducir su biodisponibilidad y toxicidad. Asimismo, modificaciones en la

pared celular dificultan la adsorción de metales tóxicos (Kovacs et al., 2015). Cuentan además con mecanismos eficientes de reparación del daño al ADN causado por estrés oxidativo (Barragán et al., 2020).

En conjunto, estas adaptaciones fisiológicas y bioquímicas permiten a las bacterias acidófilas colonizar y prosperar en entornos extremos, caracterizados por una acidez y contenidos metálicos que resultarían letales para la mayoría de las formas de vida (Dopson et al., 2014).

Figura 2

Ciclo del azufre en la tierra



Fuente: Extraído por Estructplan, 2023

La Figura 2 destaca varios mecanismos clave, como la modificación de la permeabilidad de la membrana celular para evitar la entrada masiva de protones, el uso de bombas de expulsión de protones para mantener un pH citosólico cercano a la neutralidad, la adaptación conformacional de enzimas para funcionar en condiciones de acidez extrema, y la síntesis de metabolitos osmoprotectores para prevenir la desnaturalización proteica.

Para comprender mejor la eficacia de las bacterias acidófilas en la biolixiviación y la recuperación de metales, es esencial profundizar en los mecanismos subyacentes de estos microorganismos (Kaksonen et al., 2020). Las bacterias oxidantes de azufre, como *Acidithiobacillus thiooxidans*, juegan un papel central en la biolixiviación de minerales y residuos. Estos microorganismos poseen enzimas específicas que les permiten obtener energía a través de la oxidación del azufre, y aplican esta capacidad en la recuperación de metales y biorremediación (Schippers et al., 2014). Este conocimiento es fundamental para comprender cómo estas bacterias pueden aplicarse con éxito en la recuperación de metales y en la biorremediación de entornos contaminados.

Biooxidación y biolixiviación de minerales

La biolixiviación es un proceso biotecnológico que se enfoca en la solubilización de metales a partir de minerales, especialmente aquellos que contienen sulfuros metálicos. Este proceso es mediado por microorganismos que obtienen su energía a través de la oxidación de compuestos reducidos de azufre y hierro (Schippers et al., 1996, 1999; Schippers & Sand, 1999),

Existen dos mecanismos principales de biolixiviación microbiana:

Mecanismo directo: las bacterias acidófilas se adhieren a la superficie del mineral y lo oxidan mediante enzimas extracelulares altamente especializadas, como el sulfito oxidasa y la tetrionato oxidasa (Watling, 2016).

Mecanismo indirecto: las bacterias acidófilas oxidan el hierro ferroso (Fe^{2+}) o el azufre elemental (S^0) en solución, generando ácido sulfúrico que disuelve el mineral y libera los metales (Galleguillos et al., 2008)

Por lo tanto, en lugar de degradar el mineral directamente, emplean mecanismos metabólicos especializados de oxidación de azufre y hierro para extraer selectivamente los metales deseados (Brierley, 2008).

La mayoría de las células acidófilas se adhieren a la superficie del mineral. Esto facilita el contacto entre las bacterias y el mineral, lo que es necesario para el mecanismo de contacto. En este mecanismo, las bacterias oxidan los minerales directamente, liberando los metales en forma soluble.

En el proceso sin contacto, las bacterias acidófilas se encuentran en suspensión en la solución lixivante. En este caso, las bacterias oxidan compuestos orgánicos, como la materia orgánica o los sulfuros, utilizando enzimas que catalizan la reacción. Los iones metálicos liberados por la oxidación de estos compuestos luego se solubilizan en el agua.

La biolixiviación es una tecnología versátil con diversas aplicaciones en la recuperación de metales:

Lixiviación de menas de baja ley: La biolixiviación se ha utilizado exitosamente en minerales de baja ley que contienen cobre, oro, zinc y otros metales (Liu et al., 2022). Este enfoque es especialmente valioso, ya que permite extraer metales de minerales que anteriormente no eran económicamente viables para la explotación.

Extracción de metales preciosos: La biooxidación ha demostrado ser eficaz en la extracción de metales preciosos, como oro y plata, a partir de minerales refractarios (Arashiro et al., 2020). Los minerales refractarios son aquellos que son difíciles de procesar mediante métodos convencionales, y la biooxidación ofrece una alternativa sostenible para liberar el oro, que se encuentra como “oro invisible”.

Recuperación de metales base y tierras raras desde residuos electrónicos:

La biolixiviación no se limita únicamente a la recuperación de metales valiosos; también se posiciona como una alternativa prometedora en la recuperación de tierras raras a partir de residuos tecnológicos contaminados (Işildar et al., 2019). Aunque se requiere una optimización continua de parámetros como el pH y la temperatura, el empleo de bacterias acidófilas y hongos ofrece perspectivas alentadoras para mejorar la cinética y los rendimientos de extracción de elementos críticos, como las tierras raras, a partir de flujos de desechos electrónicos. Dada la importancia estratégica de las tierras raras en aplicaciones tecnológicas y su creciente demanda en la industria, esta capacidad de recuperación resulta de gran relevancia (Işildar et al., 2019).

Lixiviación de níquel contenido en lateritas: La biolixiviación también se ha aplicado con éxito en la lixiviación de níquel contenido en lateritas (Di Yorio et al., 2006) Este proceso es importante en la industria del níquel y permite la extracción eficiente de este metal a partir de minerales de lateritas, que a menudo contienen níquel en forma de óxidos y silicatos.

Extracción de metales desde minerales secundarios: La biolixiviación se ha utilizado para la extracción de metales a partir de minerales secundarios, como escorias y relaves (Arashiro et al., 2020). Estos materiales que en muchos procesos mineros son desechados sin control, causando un impacto ambiental significativo, a menudo contienen metales residuales que pueden ser recuperados de manera efectiva utilizando procesos de biolixiviación.

Aplicaciones de la biotecnología microbiana en la recuperación de metales

La biotecnología microbiana ha demostrado ser una herramienta esencial en la recuperación de metales a partir de diversas fuentes secundarias, con un enfoque particular en la recuperación de metales valiosos y tierras raras. La biolixiviación, basada en bacterias acidófilas, se ha consolidado como una técnica sostenible y eficaz para este propósito, superando a los procesos pirometalúrgicos convencionales (Brierley, 2016; Liu et al., 2022). En este contexto, la

aplicación de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, una bacteria acidófila, se destaca por su capacidad para extraer selectivamente oro y cobre de residuos electrónicos, logrando rendimientos notables de hasta un 95% para el oro y un 93% para el cobre en tan solo 7 días (Liu et al., 2022). Este enfoque no solo promueve la sostenibilidad, sino que también presenta una alternativa más eficiente para la recuperación de estos metales críticos.

Es ampliamente descrito el potencial de las bacterias acidófilas para extraer cobre de minerales de baja ley. Se ha encontrado que las bacterias son capaces de extraer hasta el 90% del cobre de los minerales, lo que representa una mejora significativa con respecto a los métodos tradicionales de extracción minera (Dopson & Johnson, 2012).

Los procesos de biooxidación aplicados para el pretratamiento de minerales refractarios a escala industrial fueron empleados por primera vez en Fairview (Sudáfrica) en 1986 para un concentrado de oro refractario (Brierley, 2016). En la actualidad, la biooxidación es exitosamente empleada, a escala comercial, en países como Brasil, Perú, Australia, Ghana, Sudáfrica, India y China y se estima que la contribución de la biolixiviación/biooxidación es de aproximadamente el 15, 13 y 5% de la producción total del mundo de cobre, uranio y oro, respectivamente (Akcil, 2004).

La diferencia entre biooxidación y la biolixiviación radica en los tipos de minerales que pueden procesar y los microorganismos involucrados en el proceso. La biooxidación se enfoca en minerales sulfurados, generalmente refractarios y utiliza consorcios de bacterias para oxidarlos en tanques agitados, mientras que la biolixiviación es más inestable y puede utilizarse en una variedad más amplia de minerales, con la producción de ácidos como mecanismo principal para disolver los minerales y liberar los metales. Ambos procesos son importantes en la

industria de la minería y la metalurgia para aprovechar recursos valiosos y reducir el impacto ambiental de la extracción de metales.

En este sentido, la biooxidación implica la oxidación de los minerales por medio del hierro (Fe^{+3}) producido por la actividad microbiana en solución de ácido sulfúrico, con la concomitante exposición del oro invisible, lo que permite que su recuperación sea más eficiente (Arroyave et al., 2010). La biolixiviación, por su parte, se basa en la generación de ácidos a partir de la oxidación de azufre y hierro, los cuales disuelven químicamente los minerales y liberan los metales.

En Colombia la Universidad Nacional de Colombia ha adelantado estudios en la evaluación de la aplicabilidad de la oxidación bacteriana en arsenopirita aprovechando cepas comerciales y nativas, para lograr una mayor eficiencia en la recuperación de oro, frente a las metodologías hidrometalúrgicas tradicionales que emplean cantidades significativas de cianuro y mercurio Ospina et al. (2012).

Utilizando un consorcio de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* en un reactor continuo de tanque agitado, Arroyave et al. (2010) evaluaron la biooxidación de minerales refractarios logrando un porcentaje de extracción de oro de 78% después de la cianuración. Este resultado es comparable a los obtenidos por otros grupos de investigación utilizando métodos hidrometalúrgicos tradicionales, pero la biolixiviación tiene la ventaja de ser una tecnología más sostenible, ya que no requiere el uso de cianuro ni mercurio.

En el trabajo realizado por Ospina et al. (2012), se evaluó el proceso con resultados satisfactorios, obteniendo un porcentaje de extracción de oro de 75%. Estos resultados demuestran que la biolixiviación puede ser una tecnología eficaz para la recuperación de oro de

arsenopirita, incluso en minerales de baja ley. Sin embargo, es importante realizar más estudios para evaluar la viabilidad de la biolixiviación a escala industrial.

A continuación, se describe en detalle una de las aplicaciones de estos procesos en biominería que podría tener aplicabilidad en Colombia y que consiste en la biolixiviación de lodos residuales, lo que representa una alternativa sostenible a la eliminación de metales pesados.

Con respecto a esta posible aplicación, hay que mencionar que la generación estimada de lodos residuales en Europa es de 2 mil millones de toneladas por año (Meulepas et al., 2015). En muchos países, una práctica común es que estos lodos residuales se eliminen mediante incineración, vertederos o eliminación en el océano o se utilicen como fertilizantes de bajo costo en la agricultura. La aplicación al suelo es la estrategia más económica para la disposición final de los lodos residuales y combina el reciclaje de nutrientes vegetales y la disposición de los lodos al mismo tiempo (Gu & Wong, 2004). La reciente prohibición de los vertidos en el océano y los nuevos y estrictos criterios europeos de vertido han abierto nuevas perspectivas para la gestión de lodos (Tyagi & Lo, 2013). Existe un acuerdo general de que el objetivo a largo plazo debe ser reciclar los nutrientes y la materia orgánica presentes en los lodos. Sin embargo, debido a los procesos fisicoquímicos involucrados en la producción de lodos, los lodos de depuradora tienden a acumular metales pesados, así como organismos potencialmente patógenos (virus, bacterias, etc.) y compuestos orgánicos traza poco biodegradables (Vardanyan & Vyrides, 2019).

La concentración de metales pesados en los lodos de depuradora oscila entre el 0,5 y el 2 % en peso seco, pero puede llegar al 6 % en algunos casos (Pathak et al., 2009). Varias plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) están influenciadas no solo por áreas residenciales sino también por áreas industriales. Los lodos producidos en estas plantas contienen concentraciones más altas de metales pesados, que pueden variar considerablemente con el tiempo y dependen

principalmente de las actividades industriales específicas (Vardanyan & Vyrides, 2019). La aplicación de lodos contaminados durante períodos prolongados puede provocar la acumulación de metales pesados a lo largo de la cadena alimentaria o en las aguas subterráneas y superficiales, lo que tiene efectos negativos en la salud humana y animal. Por lo tanto, se desea la eliminación de metales pesados antes de la aplicación al suelo de lodos y cenizas.

Numerosos estudios propusieron los procesos fisicoquímicos para la extracción del metal de los lodos antes de su aplicación al suelo. Sin embargo, según una revisión de Pathak et al. (2009) la biolixiviación de metales a partir de lodos se considera una solución prometedora y respetuosa con el medio ambiente para la disolución de metales. No obstante, y tal como se indicó anteriormente en el documento, muchos estudios identificaron que, a través de la biolixiviación de metales de lodos, la materia orgánica disuelta dificulta la actividad de los microbios quimiolitotróficos (Pathak et al., 2009). Más específicamente, Cho et al. (2002) estudiaron la biolixiviación discontinua usando *A. ferrooxidans* y encontró que la lixiviación de Cu cesaba por completo a una concentración alta de sólidos superior al 6 % (p/v) (Tabla 2) a 226 mg TOC/L. Un enriquecimiento mixto de bacterias oxidantes de azufre a partir de lodos de aguas residuales digeridos anaeróbicamente fue más efectivo en la lixiviación de metales que el *Acidithiobacilo* oxidante de hierro y no se informó inhibición significativa debida a compuestos orgánicos. En estas condiciones y con una concentración de sólidos del 9 % (p/v), las eficiencias de lixiviación de Cu y Zn fueron del 59 % (1,36 g/kg de lodo seco) y del 78 % (2,66 g/kg de lodo seco), respectivamente.

La industria de fundición no ferrosa es una de las principales contaminadoras de metales pesados. Se examinó, se analizó el contenido y estado de los metales pesados plomo, arsénico, cadmio, mercurio y cromo en las escorias, cenizas, residuos sólidos y productos de la fundición

de cobre en una fundición típica de cobre. Los resultados mostraron que el plomo y el arsénico eran los metales pesados más abundantes en el concentrado de cobre, de los cuales aproximadamente el 66,21 % del plomo y aproximadamente el 65,02 % del arsénico escaparon con los gases de combustión durante el proceso pirometalúrgico y quedaron atrapados en la ceniza blanca. Durante todo el proceso de purificación del cobre, se eliminó alrededor del 75,17 % de los metales pesados en el proceso de fundición, alrededor del 21,88 % en el proceso de conversión y alrededor del 2,92 % en el proceso de refinación. Los metales pesados finales descargados a la atmósfera fueron sólo plomo, arsénico y mercurio, lo que representa alrededor del 0,03% del contenido total de metales pesados. Cabe señalar que el 50% del mercurio en la materia prima se descargó a la atmósfera. Dado que el mercurio es persistente, fácilmente transportable, altamente bioconcentrado y tóxico, la contaminación por mercurio requiere mayor atención (Rev. Fac. ing, 2017).

Lixiviación de roca fosfórica empleando ácido biogénico

La biotecnología aplicada a la minería en Colombia es un tema de creciente interés debido a su potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la industria minera. En particular, la lixiviación de roca fosfórica empleando ácido biogénico es una técnica prometedora que combina la biotecnología con la extracción de minerales. En esta sección, se expondrá en detalle de la lixiviación de roca fosfórica utilizando ácido biogénico, examinando los avances en la extracción de fosfatos y los beneficios medioambientales asociados.

La lixiviación es un proceso utilizado para extraer minerales valiosos de minerales de baja ley. En el caso de la roca fosfórica, este mineral contiene fosfato, un nutriente esencial para la agricultura. La lixiviación de roca fosfórica empleando ácido biogénico implica el uso de

microorganismos que producen ácido orgánico para disolver el fosfato y facilitar su extracción, además de impactar al sector productivo, ya que facilita la adquisición a menores costos de fósforo para la industria de fertilizantes.

La investigación llevada a cabo por Echeverry (2018) titulada "Tratamiento de minerales de fósforo a partir de ácido biogénico producido por *A. thiooxidans*" representa un importante avance en la industria de la minería y la metalurgia. La investigadora exploró las aplicaciones de la lixiviación de roca fosfórica utilizando ácido biogénico producido por la bacteria *A. thiooxidans* (Figura 3).

Figura 3

*Biorreactor para la producción de ácido biogénico utilizando cultivo de *A. thiooxidans* y posterior adición de roca fosfórica para solubilización*



Fuente: Imagen tomada de Echeverry (2018).

Uno de los hallazgos clave de esta investigación es la viabilidad de utilizar *A. thiooxidans* para producir ácido biogénico, que puede ser empleado eficazmente en el proceso de lixiviación de roca fosfórica. Este enfoque biotecnológico ofrece ventajas significativas en términos de

sostenibilidad y costos, en comparación con los métodos tradicionales de lixiviación que dependen de ácidos químicos altamente corrosivos y costosos.

Además, el estudio demostró que la bacteria *A. thiooxidans* es capaz de tolerar y prosperar en condiciones adversas, como las que se encuentran en la industria minera. Esto amplía las posibilidades de aplicación de esta tecnología en una variedad de entornos geológicos y operacionales (Echeverry, 2018).

Los autores analizan el estado actual de la investigación y aplicación de esta tecnología en el contexto colombiano y ofrecen perspectivas sobre su futuro desarrollo y adopción en la industria minera del país. Se resalta la importancia de esta innovación en la búsqueda de métodos más amigables con el medio ambiente y menos dependientes de recursos químicos convencionales, además de que muestra porcentajes de solubilización mayores en comparación con el proceso de solubilización química convencional.

El empleo de ácido biogénico producido por *A. thiooxidans* en la lixiviación de roca fosfórica también puede contribuir a reducir los impactos ambientales negativos asociados con los métodos convencionales de extracción y procesamiento de minerales de fósforo. Esto es particularmente relevante en un contexto en el que la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental son temas de creciente importancia.

El documento titulado "Oportunidades y desafíos de la lixiviación biogénica en la industria minera de Colombia," presentado por González (2018) en el Congreso Nacional de Minería Sostenible, ofrece una valiosa perspectiva sobre la implementación de la lixiviación de roca fosfórica biogénica en el contexto minero de Colombia.

En esta presentación, los autores exploran las oportunidades y desafíos que enfrenta la industria minera colombiana al considerar la adopción de la lixiviación biogénica como una

tecnología innovadora. Se destaca cómo esta técnica biotecnológica puede contribuir a mejorar la sostenibilidad y la eficiencia de la extracción y procesamiento de minerales de fosfato en el país.

Entre las oportunidades identificadas, se mencionan los beneficios ambientales significativos, como la reducción de la emisión de gases contaminantes y la disminución de los residuos tóxicos generados en los procesos tradicionales de lixiviación. También se abordan aspectos económicos, como la potencial reducción de costos a largo plazo y la posibilidad de acceder a mercados internacionales con estándares ambientales más estrictos (Brierley, 2008)

Sin embargo, el documento también destaca los desafíos asociados con la implementación de la lixiviación biogénica, que incluyen la necesidad de una infraestructura adecuada, la formación de personal especializado y la adaptación de los procesos existentes en la industria minera colombiana. Se enfatiza la importancia de abordar estos desafíos para aprovechar plenamente las ventajas de esta tecnología.

La lixiviación de roca fosfórica empleando ácido biogénico reduce la dependencia de productos químicos tóxicos y tiene un menor impacto ambiental. El artículo titulado "Beneficios ambientales y económicos de la lixiviación biogénica en la minería de fosfato en Colombia," escrito por C. Ramírez y colaboradores en la Revista de Minería Sostenible en 2022, ofrece un análisis profundo sobre los beneficios asociados con la lixiviación de roca fosfórica empleando ácido biogénico en el contexto minero colombiano.

En esta investigación, se destacan tanto los aspectos ambientales como los económicos relacionados con la aplicación de la lixiviación biogénica en la extracción y procesamiento de minerales de fosfato en Colombia. Los autores resaltan varios beneficios clave:

Reducción de impacto ambiental: Se subraya que la lixiviación biogénica permite una reducción significativa en la emisión de gases contaminantes y la generación de residuos tóxicos

en comparación con los métodos tradicionales de lixiviación que utilizan ácidos químicos. Esto tiene un impacto positivo en la calidad del aire y del agua en las áreas de operación minera.

Eficiencia en la recuperación de minerales: La aplicación de ácido biogénico producido por bacterias como *A. thiooxidans* ha demostrado ser eficiente en la disolución del fosfato en la roca, lo que resulta en una mayor recuperación de minerales valiosos y una mejora en el rendimiento de los procesos de minería.

Reducción de costos a largo plazo: A pesar de la inversión inicial requerida para implementar la tecnología biogénica, se señala que, a largo plazo, esta puede reducir los costos operativos, especialmente en lo que respecta a la adquisición y manejo de productos químicos, así como la gestión de residuos.

Acceso a mercados con requisitos ambientales rigurosos: La adopción de prácticas de minería más sostenibles, como la lixiviación biogénica, puede mejorar la posición de las empresas mineras colombianas en los mercados internacionales al cumplir con estándares ambientales más estrictos.

Lixiviación de metales a partir de residuos de tipo tecnológico y electrónicos.

En esta sección se examinará el papel crucial de la biolixiviación en la recuperación sostenible de metales a partir de residuos tecnológicos y electrónicos, destacando alternativas ecoeficientes a los métodos convencionales de tratamiento de desechos.

La lixiviación biotecnológica de metales a partir de residuos electrónicos ofrece una alternativa prometedora para la minería, ya que permite la recuperación de metales valiosos de manera eficiente y reduce la necesidad de extraer nuevos recursos naturales (Estrada, 2020).

Además, contribuye a la gestión adecuada de los residuos electrónicos, evitando su acumulación en vertederos y minimizando los riesgos para la salud y el medio ambiente.

Esta innovación del campo de la biominería ha sido objeto de estudio en el Congreso Nacional de Biotecnología en 2019, dato que este enfoque sostenible en la minería ha despertado interés debido a sus posibles beneficios ambientales y económicos. Durante el congreso, se discutió la importancia de la biotecnología en la lixiviación de metales a partir de residuos electrónicos y se presentaron estudios y avances recientes en este campo. Se destacó el potencial de la biotecnología para extraer metales valiosos de manera eficiente y sostenible, reduciendo así la dependencia de la minería tradicional y disminuyendo el impacto ambiental asociado.

Este enfoque sostenible en la minería busca aprovechar los avances en biotecnología para desarrollar procesos de lixiviación más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. Al utilizar microorganismos o enzimas para disolver los metales presentes en los residuos tecnológicos, se pueden obtener altas tasas de recuperación de metales valiosos como oro, plata, cobre y otros (León, 2017)

La biolixiviación y la “*biouptake*” es un proceso similar a la biolixiviación, pero en lugar de utilizar microorganismos para oxidar los minerales o residuos, utiliza microorganismos para absorber los metales. Los microorganismos tienen una gran capacidad para absorber metales, y pueden acumular grandes cantidades de metales en sus células y que a partir de desechos electrónicos han emergido como alternativas prometedoras en la valorización y recuperación de metales. Diversos estudios han evaluado el potencial de estos procesos biotecnológicos, destacando avances significativos en la extracción y acumulación de metales valiosos y tierras raras (TR).

García-Balboa et al. (2022) llevaron a cabo un estudio pionero en el que utilizaron un consorcio bacteriano acidófilo para lixiviar metales de polvo de desechos electrónicos. Los resultados revelaron eficiencias de extracción impresionantes, alcanzando un asombroso 99 % para Cu, Co, Al y Zn después de tan solo 7 días de tratamiento. Además, lograron recuperar el 53 % de Cd y el 11 % de Cr y Li en el mismo período. Sin embargo, no se detuvieron aquí; en una segunda etapa del proceso, emplearon microalgas extremófilas *Chlamydomonas* sp. y *Euglena* sp. para eliminar metales del lixiviado. Estas microalgas demostraron su capacidad al absorber hasta 7,3 µg/g de Zn, 4,1 µg/g de Al, 1,3 µg/g de Cu y 0,7 µg/g de Mn en un plazo de 12 días. Cabe resaltar que también se identificó la acumulación de tierras raras como el Gd, Pr, Ce y La, añadiendo un valor adicional a este proceso de recuperación.

Işıldar et al. (2019) proporcionaron una revisión exhaustiva de estudios relacionados con la biorremoción de tierras raras y otros metales valiosos de lixiviados de residuos electrónicos. Un estudio en particular, realizado por He & Chen (2014), destacó la bioacumulación impresionante de 1000 mg/g de La y Eu, 1200 mg/g de Sc y 670 mg/g de Yb por biomasa de algas muertas. Además, se exploró la biosorción de Nd, con capacidades de adsorción que variaron entre 69 y 157 mg/g en diversas microalgas, como se informó en investigaciones realizadas por (Birungi & Chirwa, 2014; Kucuker et al., 2017).

Según Marra et al. (2018) abordaron la recuperación de metales como Ce, Eu, Nd, La e Y a partir de polvo de residuos electrónicos mediante bacterias acidófilas. Sus resultados reflejaron eficiencias notables, alcanzando entre un 80 % y un 99 % en tan solo 8 días. No obstante, en una segunda etapa del proceso, emplearon bacterias cianogénicas, y sorprendentemente, no se observó la extracción de tierras raras. Este hallazgo sugiere que la ruptura de complejos químicos

no está involucrada en la recuperación de TR en este contexto. Este hallazgo sugiere que la complejólisis no está involucrada en la recuperación de TR en este contexto.

En un estudio adicional, Hopfe et al. (2017) demostraron cómo un hongo Kombucha se puede utilizar para lixiviar tierras raras como La, Ce y Tb desde polvos fluorescentes de tubos y lámparas. Los resultados mostraron rendimientos significativos, alcanzando entre un 50% y un 70% en tan solo 9 días bajo condiciones óptimas.

La Tabla 2 proporciona ejemplos de valores de eficiencia en la recuperación de metales mediante biolixiviación de diferentes materiales, junto con el tiempo requerido para alcanzar dicha eficiencia. La información se ha recopilado de diversas fuentes, incluyendo Marra et al. (2018), García-Balboa et al. (2022), y Hopfe et al. (2017). Aquí está la explicación detallada de la tabla:

Material: Indica el tipo de material utilizado en el proceso de biolixiviación.

Metal: Especifica los metales que se están recuperando del material mediante biolixiviación.

Eficiencia (%): Indica la eficiencia de la biolixiviación, es decir, el porcentaje de recuperación del metal en cuestión. Por ejemplo, si la eficiencia es del 80%, significa que se ha recuperado el 80% del metal presente en el material.

Tiempo: Representa el período de tiempo necesario para alcanzar la eficiencia mencionada en el tercer punto. Por ejemplo, si se indica "8 días", significa que el proceso de biolixiviación tomó 8 días para alcanzar la eficiencia especificada.

Tabla 2*Ejemplos de valores de metales recuperados mediante la biolixiviación*

Material	Metal	Eficiencia (%)	Tiempo
Polvo de residuos electrónicos	Ce, Eu, Nd	80-99	8 días
Polvo de residuos electrónicos	Y, La	80-99	8 días
Polvo de desechos electrónicos	Cu	99	7 días
Polvo de desechos electrónicos	Co	99	7 días
Polvo de desechos electrónicos	Al	99	7 días
Polvo de desechos electrónicos	Zn	99	7 días
Polvo fluorescente	La, Ce, Tb	50-70	9 días

Nota. Información recopilada a partir de García-Balboa et al., 2022; Hopfe et al., 2017; Marra et al., 2018

La lixiviación de metales a partir de residuos electrónicos es un tema de creciente importancia debido a la acumulación de estos desechos y su impacto ambiental. Varios estudios recientes han enfocado sus esfuerzos en explorar el potencial de la biolixiviación como una alternativa ecológica a los procesos convencionales de fundición y refinado pirometalúrgicos para la recuperación de metales valiosos y críticos (Işildar et al., 2019). En la investigación llevada a cabo por Işildar et al. (2019), se realiza una revisión exhaustiva de las estrategias biotecnológicas para la recuperación de metales a partir de residuos electrónicos. Los autores destacan la viabilidad de la biolixiviación mediada por bacterias acidófilas, así como la bioacumulación por biomasa de hongos y algas. Se resalta la eficiencia excepcional de extracción de metales base como Cu, Zn y Ni, llegando a alcanzar hasta un 99%, así como la recuperación exitosa de tierras raras como La, Ce y Nd. Además, se mencionan las capacidades de bioadsorción que llegan hasta 1.2 g/g para metales preciosos como Au y Ag. Sin embargo, se

enfatisa la necesidad de continuar optimizando estos bioprocesos para aumentar su eficiencia y aplicabilidad.

Tabla 3

Ejemplos de valores de metales recuperados mediante “biouptake”

Microorganismo	Metal	Capacidad (g)
Algas	La, Eu	1
Algas	Sc	1,2
Algas	Yb	0,67
Microalgas	Nd	0,069-0,157
<i>Chlorella vulgaris</i>	Nd	0,157
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Zn	7,3
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Al	4,1
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Cu	1,3
Polvo fluorescente	Mn	0,7

Nota. Datos tomados de He y Chen (2014), Birungi y Chirwa (2014), Kucuker et al. (2017) y García-Balboa et al. (2022).

Por otro lado, Birungi & Chirwa (2017) llevaron a cabo un estudio centrado en la evaluación del potencial de varias cepas de microalgas para la recuperación de lantano, una tierra rara. Los resultados revelaron una variabilidad significativa en la capacidad de adsorción entre las diferentes cepas estudiadas, con valores que oscilaban entre 69 y 157 mg/g. La cepa más destacada en términos de rendimiento fue *Chlorella vulgaris*. Este estudio subraya el potencial de las microalgas como biosorbentes prometedores y económicamente atractivos para la recuperación de tierras raras. En lo que respecta a los metales preciosos, Marra et al. (2018) informaron sobre la exitosa recuperación de hasta un 95% de oro a partir de polvo electrónico en un corto período de 9 días de lixiviación mediada por *A. ferrooxidans*. La cinética de extracción fue relativamente rápida, alcanzando su eficiencia máxima en tan solo 2 días. Este estudio

demuestra el gran potencial de la biolixiviación para la valorización de flujos de residuos electrónicos y la obtención eficiente de metales de alto valor.

Contexto Colombiano – Proyectos vigentes

El propósito de esta búsqueda de información es analizar los métodos de biominería que se están implementando actualmente en proyectos mineros en Colombia y su impacto ambiental.

La minería en el país se ha realizado de forma artesanal durante mucho tiempo, generando daños considerables a los recursos hídricos por el desconocimiento de tecnologías más amigables con el medio ambiente. La biominería emerge como una alternativa prometedora. A continuación, se presenta una lista simplificada de algunos de estos proyectos:

Proyecto Anzá: Situado estratégicamente en el departamento de Antioquia, Colombia, el Proyecto Anzá destaca como una iniciativa minera de alta relevancia gestionada por Orosur Mining Inc. En colaboración con Minera Monte Águila (MMA), empresa conjunta de Newmont Corporation y Agnico Eagle Mines Limited, este proyecto se centra en la exploración y extracción de oro en la región (Orosur Mining Inc, 2021). Desde finales de 2020, el Proyecto Anzá ha experimentado un significativo avance mediante programas de perforación que han revelado intersecciones de oro de alta ley y considerable espesor. Este desempeño ha consolidado al Proyecto Anzá como uno de los proyectos auríferos más emocionantes de la región (Orosur Mining Inc, 2021). El proyecto está compuesto por siete licencias, tres de las cuales ya han sido otorgadas, y cuatro están en proceso de solicitud. Orosur Mining Inc. es dueña al 100% de Minera Anzá, la entidad encargada de operar el proyecto (Orosur Mining Inc, 2021)

En septiembre de 2018, se estableció un Acuerdo de Exploración con Opción de Riesgo entre Minera Anzá y Monte Minera Águila, permitiendo a esta última adquirir hasta el 75% de participación en el proyecto mediante inversiones a lo largo de 12 años (Orosur Mining Inc, 2021). Aunque actualmente no hay información detallada sobre la implementación de la biolixiviación en el Proyecto Anzá, esta tecnología podría considerarse para mejorar la

extracción de minerales y reducir el impacto ambiental. Si los resultados de las perforaciones indican presencia de oro de alta ley, la biolixiviación podría no ser la primera elección para la recuperación de oro, pero se vislumbra su potencial aplicación en la recuperación de otros metales, como la plata (Orosur Mining Inc, 2021).

Proyecto Gramalote: El Proyecto Gramalote, una empresa minera de extracción de oro ubicada en el municipio de San Roque, Antioquia, es una colaboración entre las compañías mineras B2Gold Corporation y AngloGold Ashanti. Designado como uno de los Proyectos de Interés Nacional Estratégico (PINE) por el Gobierno Nacional de Colombia, se estima que requerirá una inversión inicial de aproximadamente 2.3 billones de pesos colombianos, con reservas previstas de 5 millones de onzas de oro, expandibles a 7 millones (Gramalote, 2023).

Una vez en operación, se proyecta que el Proyecto Gramalote producirá entre 350 y 450 mil onzas de oro anualmente, contribuyendo con cerca de 183 millones de dólares en regalías al Estado Colombiano (Gramalote, 2023). Sin embargo, la naturaleza a cielo abierto del proyecto, que implica la remoción masiva de tierra y roca, ha suscitado inquietudes sobre posibles impactos ambientales y sociales, generando controversias y críticas en la comunidad local. Se han expresado preocupaciones sobre la adecuación de la participación y consulta con las comunidades, así como la protección de los recursos naturales en la zona.

El Proyecto Gramalote destaca por su enfoque innovador mediante la implementación de la biominería, específicamente a través del método de pilas de lixiviación. Este método implica la introducción de microorganismos en las pilas de mineral para llevar a cabo la oxidación de minerales sulfurados, liberando así el oro contenido. La opción por utilizar bacterias nativas para la biolixiviación resalta la adaptabilidad y eficacia de la biominería al emplear organismos locales, maximizando la sinergia con el entorno geológico.

La biominería, como tecnología emergente, se presenta como una alternativa prometedora para la extracción de oro, con el potencial de ofrecer mayor eficiencia y, simultáneamente, reducir el impacto ambiental en comparación con los métodos tradicionales. En el caso del Proyecto Gramalote, la implementación de la biominería puede reducir la necesidad de productos químicos tóxicos, teniendo así un impacto positivo en el medio ambiente y ofreciendo una alternativa más eficiente y rentable para la extracción de oro en ciertos tipos de depósitos (AngloGold Ashanti, 2023).

Proyecto Quebradona: es Ubicado en Jericó, Antioquia, Colombia, el Proyecto Quebradona, desarrollado por AngloGold Ashanti, busca transformar la minería en el país mediante prácticas modernas con enfoque en sostenibilidad y biodiversidad (AngloGold Ashanti, 2023). Este proyecto se centra en la extracción de cobre y oro del depósito Nuevo Chaquiro, un importante yacimiento de pórfido de cobre y oro.

El proyecto ha generado tanto apoyo como oposición, con defensores destacando el potencial para el desarrollo económico y oportunidades laborales en la región, mientras que críticos expresan preocupaciones sobre posibles impactos ambientales y sociales, incluidos efectos en los recursos hídricos y comunidades locales.

Una iniciativa notable asociada con Quebradona es la Iniciativa de Biodiversidad Quebradona, que busca integrar un parque y un centro de biodiversidad al proyecto. Sin embargo, la implementación de la biominería es otro aspecto destacado. AngloGold Ashanti planea utilizar una planta de biominería para extraer oro libre y oro asociado a minerales sulfurados presentes en el depósito de Nuevo Chaquiro.

A pesar de la importancia de la biominería en Quebradona, la falta de detalles específicos sobre su implementación, como el método de biolixiviación, los microorganismos empleados y

los posibles impactos ambientales, plantea desafíos para evaluar la viabilidad y beneficios potenciales de esta tecnología en el proyecto.

Para una evaluación más completa, AngloGold Ashanti debe proporcionar información detallada sobre la implementación de la biominería, lo que permitirá una comprensión más precisa de la estrategia y sus implicaciones ambientales. La transparencia en este aspecto es crucial para abordar las inquietudes y fomentar una evaluación informada de los aspectos sostenibles del Proyecto Quebradona

Proyecto Quinchía: Ubicado en el municipio de Quinchía, Risaralda, Colombia, el Proyecto Quinchía representa un avance significativo en la exploración minera y el licenciamiento ambiental en la región. Con una extensión de 1,407.43 hectáreas, el proyecto se centra en el depósito La Cumbre y ha llevado a cabo un proceso de consulta previa con la comunidad Emberá, demostrando un compromiso con la responsabilidad social y el respeto a los grupos étnicos locales. Este proyecto abarca el Proyecto Quinchía Gold, que incluye áreas extensas y depósitos clave como Miraflores, Chuscal, Dosquebradas y Tesorito. La fase exploratoria, con más de 40,000 metros de perforación, destaca el compromiso del proyecto con una comprensión detallada de sus recursos y posibilidades de extracción.

Además, el Proyecto Minero Quinchía ha anunciado la implementación de la biominería, una estrategia que presenta beneficios significativos para mitigar la contaminación del suelo causada por metales pesados, como el mercurio, comúnmente asociado con la minería de oro artesanal.

Aunque el compromiso con la biominería es alentador, detalles adicionales sobre la estrategia específica y los beneficios ambientales esperados serían valiosos para una evaluación completa del enfoque sostenible del Proyecto Quinchía. La transparencia en la divulgación de

información sobre la implementación de la biominería fortalecerá la confianza y permitirá una evaluación más precisa de los aspectos ambientales de este proyecto.

Perspectivas de la biominería en Colombia

La situación actual y las perspectivas de la biotecnología aplicada a la minería en Colombia son muy relevantes en el contexto de la creciente preocupación por la sostenibilidad y los desafíos ambientales en la industria minera. Aquí se presenta un análisis de estos aspectos, a partir de la consulta y análisis de fuentes bibliográficas realizada:

Tendencia hacia la Sostenibilidad y la Biotecnología

La industria minera en Colombia está experimentando una tendencia hacia la sostenibilidad, lo cual se refleja en el interés y la investigación en la aplicación de la biotecnología en la lixiviación. Esta tendencia está en línea con la creciente conciencia sobre la importancia de minimizar el impacto ambiental de la minería.

La revisión de la literatura científica y técnica recopilada permite identificar una clara tendencia en la industria minera colombiana hacia la implementación de tecnologías más sostenibles, incluyendo el uso de biotecnología en procesos como la lixiviación de metales (Hernández et al., 2022).

Esta tendencia se ve impulsada por la creciente conciencia ambiental y la necesidad del sector minero de reducir su huella ecológica, en respuesta a mayores exigencias nacionales e internacionales de sostenibilidad. Como afirman González et al. (Congreso ACM 2018), "la biolixiviación representa una alternativa viable y ecológica para avanzar hacia una minería más sostenible en Colombia" (p. 5).

El interés en la aplicación de biotecnología como la lixiviación bacteriana demuestra un compromiso inicial de la industria minera del país con la adopción de prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, aún se requiere mayor investigación y desarrollo en este campo para consolidar su implementación a escala industrial.

Desafíos Ambientales Actuales

La necesidad de abordar desafíos ambientales, como la reducción de emisiones y la gestión de residuos tóxicos, es un factor impulsor clave detrás de la exploración de enfoques más ecológicos como la lixiviación biotecnológica.

Uno de los factores impulsores en la exploración de tecnologías más ecológicas como la biolixiviación es la necesidad de abordar diversos desafíos ambientales que enfrenta actualmente la minería en Colombia (Hernández et al., 2022).

Entre estas problemáticas se encuentran la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de drenaje ácido de mina, el manejo de residuos tóxicos y la contaminación de suelos y fuentes hídricas por metales pesados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019). La búsqueda de alternativas sostenibles como la biolixiviación microbiana permite avanzar en la mitigación de estos impactos ambientales negativos.

Asimismo, la transición hacia procesos biotecnológicos más limpios también está motivada por la necesidad de cumplir con una normativa ambiental más estricta en el contexto de acuerdos internacionales sobre cambio climático y sostenibilidad a los que se ha suscrito el país (Congreso ACM 2018).

Importancia de la Recuperación de Metales

La recuperación de metales a partir de residuos tecnológicos se reconoce como una necesidad importante. Con el aumento constante de dispositivos electrónicos en desuso, la recuperación de metales valiosos se vuelve esencial tanto desde una perspectiva económica como ambiental.

Otra tendencia que se observa en la literatura es el creciente interés en la aplicación de biotecnología microbiana para la recuperación de metales a partir de residuos electrónicos, dada la naturaleza tóxica y no biodegradable de estos desechos (Işıldar et al., 2019).

La acumulación de residuos electrónicos representa un grave problema ambiental en Colombia. Se estima que en 2019 se generaron cerca de 100 mil toneladas de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y que sólo el 17% de estos se gestionaron adecuadamente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Ante esta situación, la biolixiviación mediada por bacterias acidófilas aparece como una alternativa prometedora, ya que permite recuperar metales valiosos como cobre, oro, plata y tierras raras desde estos residuos, disminuyendo así su toxicidad y aprovechando mejor sus recursos (Marra et al., 2018).

Si bien su implementación a nivel industrial aún se encuentra en etapa inicial en el país, este enfoque sostenible podría traer beneficios económicos y ambientales significativos en el mediano plazo.

Papel de la Biotecnología

La lixiviación biotecnológica destaca el papel de los microorganismos, especialmente bacterias como *A. thiooxidans*, en la disolución de metales en los residuos tecnológicos. Esto

sugiere un enfoque más sostenible basado en la biotecnología en comparación con los métodos químicos tradicionales.

La literatura resalta el papel potencial de la biotecnología microbiana, en particular el uso de bacterias acidófilas, en el desarrollo de procesos de lixiviación más sostenibles. Estudios recientes han demostrado la efectividad de microorganismos como *A. ferrooxidans* para extraer metales desde distintas fuentes primarias y secundarias (Liu et al., 2022).

En comparación con los métodos hidrometalúrgicos convencionales que utilizan reactivos químicos tóxicos o procesos altamente demandantes de energía (tostación, calcinación, etc.), la lixiviación bacteriana representa una alternativa más amigable con el entorno, que aprovecha las capacidades metabólicas de estos microorganismos para la recuperación eficiente de metales (Işıldar et al., 2019).

El creciente conocimiento de los mecanismos microbianos y enzimáticos involucrados en la biolixiviación está permitiendo perfeccionar y potenciar el uso de esta tecnología, superando limitaciones relacionadas con la velocidad de los procesos, la sensibilidad a condiciones operativas y la recuperación de metales específicos.

Ventajas de la biolixiviación

La biolixiviación presenta varias ventajas significativas en comparación con los procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos convencionales:

Menor consumo energético y emisiones de CO₂: La biolixiviación es un proceso que requiere menos energía en comparación con los métodos tradicionales, lo que resulta en menores emisiones de dióxido de carbono y en donde es importante en el método de oxidación la

presencia del dióxido de carbono como absorción..Esto contribuye a una operación más sostenible y amigable con el medio ambiente (Colmer et al., 1950; Colmer & Hinkle, 1947).

Evita el uso de productos químicos costosos y contaminantes: A diferencia de los métodos convencionales que a menudo implican el uso de reactivos químicos costosos y contaminantes, la biolixiviación utiliza microorganismos y condiciones naturales para llevar a cabo la extracción de metales (Colmer et al., 1950; Colmer & Hinkle, 1947). Esto reduce los costos y la huella ambiental.

Permite recuperar metales desde menas de bajo tenor: La biolixiviación es especialmente efectiva en la recuperación de metales a partir de minerales de baja ley, lo que amplía la gama de recursos económicamente explotables (Liu et al., 2022). Esto es fundamental para la rentabilidad de muchas operaciones mineras.

Es más selectiva en la extracción de metales de interés: La biolixiviación puede ser altamente selectiva en la extracción de metales específicos, lo que minimiza la generación de residuos y facilita la recuperación de metales de alto valor (Mishra et al., 2020).

Genera menos residuos tóxicos: En comparación con los procesos convencionales, la biolixiviación genera menos residuos tóxicos y contaminantes, lo que reduce la carga ambiental (Çopur, 2001).

Desafíos

A pesar de sus ventajas, la biolixiviación también enfrenta algunos desafíos:

Tiempos más largos de lixiviación: En comparación con los métodos químicos, la biolixiviación a veces requiere tiempos más largos para lograr una extracción completa de los metales (Mishra et al., 2023).

La implementación de la biolixiviación a escala industrial puede ser un desafío debido a la necesidad de mantener condiciones óptimas para los microorganismos y garantizar una extracción eficiente a gran escala, pero químicamente son más estables los procesos y sus desechos a nivel industrial son más amigables al medio ambiente. (Rawlings, 2002)

Los microorganismos utilizados en la biolixiviación pueden ser sensibles a las variaciones en las condiciones operativas, lo que requiere un control cuidadoso del entorno (Mishra et al., 2023).

Presencia de elementos inhibidores en algunos minerales: Algunos minerales pueden contener elementos que inhiben la acción de los microorganismos, lo que puede dificultar la biolixiviación (Lopez, 2014)

Aunque la biolixiviación puede ofrecer ahorros a largo plazo, la implementación inicial puede requerir inversiones significativas en infraestructura y tecnología (Mishra et al., 2023).

Para superar estos desafíos y aprovechar al máximo el potencial de la biolixiviación, se requiere una mayor investigación y desarrollo en esta área. La optimización de los procesos y la adaptación a diferentes tipos de minerales son áreas de interés continuo en la aplicación de la biolixiviación en la recuperación de metales

Beneficios Ambientales

La lixiviación biotecnológica ofrece beneficios significativos para el medio ambiente, como la reducción de emisiones de gases contaminantes y la minimización de residuos peligrosos. Estos beneficios pueden contribuir a una minería más sostenible y al cumplimiento de regulaciones ambientales más estrictas.

Diversos estudios coinciden en señalar los beneficios ambientales que presenta la lixiviación biotecnológica en comparación con las técnicas metalúrgicas convencionales (González et al., 2018; Liu et al., 2022). Entre estas ventajas se cuentan:

Menores emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, por el uso de condiciones ambientales naturales y baja dependencia de combustibles fósiles.

Disminución en el volumen de residuos peligrosos generados, al evitar el uso de sustancias químicas como cianuros, ácidos fuertes y solventes orgánicos.

Mitigación de la contaminación de suelos y agua por metales pesados al operar a pH muy ácidos y recuperar dichos metales.

Posibilidad de recuperación de áreas degradadas por la minería al utilizar los residuos como fuente de metales.

Contribución a la economía circular mediante la valorización de residuos como nueva fuente de recursos minerales.

Estos beneficios ambientales están alineados con la normativa y los compromisos internacionales de Colombia en materia de producción más limpia, gestión de residuos, conservación de ecosistemas y biodiversidad, y mitigación del cambio climático.

Por otro lado, la implementación de la biominería en la industria minera de Colombia puede tener impactos ambientales positivos notables en comparación con los métodos convencionales de extracción mineral. Según Liu et al. (2022), quienes evaluaron la biolixiviación de minerales de cobre, este proceso podría reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 60% en comparación con la fundición pirometalúrgica convencional. Este beneficio ambiental resulta crucial en el contexto global de la lucha contra el cambio climático.

En línea con la investigación de Mishra et al. (2020) y González et al. (Congreso ACM 2018), se destaca la disminución significativa en el uso de reactivos químicos tóxicos, como cianuros, ácidos fuertes y solventes orgánicos, al emplear procesos biotecnológicos de lixiviación y recuperación de metales. Este enfoque más sostenible no solo contribuye a la reducción de residuos peligrosos, sino que también promueve prácticas más seguras para el medio ambiente y la salud humana. Además, la biolixiviación ha demostrado reducir el consumo de recursos críticos como agua y energía, como se evidencia en los estudios (Lopez, 2014)

Desafíos Económicos y Tecnológicos

A pesar de los beneficios ambientales, la adopción generalizada de la biominería en Colombia enfrenta desafíos tecnológicos y económicos. Mishra et al. (2023) señalan la necesidad de infraestructura especializada para el cultivo y manejo de microorganismos utilizados en los procesos biotecnológicos. Esta infraestructura incluiría sistemas robustos para el monitoreo y control de variables críticas como pH, temperatura y oxigenación, lo cual demanda inversiones significativas.

La transición desde métodos metalúrgicos convencionales hacia la biolixiviación implica, según González et al. (Congreso ACM 2018), considerables inversiones de capital por parte de las empresas mineras. Aunque se espera que estas inversiones generen ahorros operativos a largo plazo, el costo inicial puede limitar la adopción generalizada de la biominería. Estrategias de financiamiento y apoyo gubernamental podrían ser clave para superar este obstáculo.

La presencia de investigaciones y trabajos relacionados indica que la investigación y el desarrollo en este campo están en marcha. Esto sugiere que la lixiviación biotecnológica es un campo activo de estudio y desarrollo en Colombia.

Si bien la literatura destaca las ventajas y el potencial de la biolixiviación, también se reconocen algunos retos económicos y tecnológicos que deben superarse para su implementación efectiva en el sector minero colombiano.

Uno de los principales desafíos mencionados es la necesidad de una mayor inversión inicial en infraestructura y adaptación de los procesos productivos (Mishra et al., 2023). Asimismo, se requiere formar personal calificado e incorporar conocimientos especializados en biotecnología y microbiología industrial a la fuerza laboral del sector (Congreso ACM 2018).

Aunque los beneficios económicos se manifiestan en el mediano y largo plazo, el cambio hacia bioprocesos implica costos iniciales que pueden limitar su adopción. Por ello se necesitan incentivos gubernamentales y opciones de financiamiento para impulsar esta transición (Liu et al., 2022).

Desde el aspecto tecnológico, aún es necesario optimizar las tasas de lixiviación y recuperación de metales para mejorar la eficiencia y viabilidad económica frente a la metalurgia convencional. También se deben desarrollar diseños de reactores y modelos cinéticos adaptados a las menas y residuos propios del país (Congreso ACM 2018).

Perspectivas de Futuro

Se espera que la lixiviación biotecnológica desempeñe un papel cada vez más importante en la industria minera de Colombia en el futuro, ya que las empresas buscan soluciones más sostenibles y eficientes para la extracción de metales a partir de residuos tecnológicos.

La revisión bibliográfica permite evidenciar que la investigación y el desarrollo en biolixiviación microbiana se encuentran activos en Colombia, lo cual se refleja en publicaciones científicas, trabajos de grado y proyectos en curso referidos a esta tecnología.

Destacan los estudios llevados a cabo en instituciones como la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Antioquia, entorno al potencial de la biolixiviación en menas auríferas y de cobre, la recuperación de metales desde residuos electrónicos, y el uso de bacterias nativas en estos procesos, entre otros temas (Hernández et al., 2022).

Asimismo, centros de investigación como CIBION están generando conocimiento en torno a la aplicación de biotecnología microbiana en la recuperación de metales, con un enfoque en el aislamiento y caracterización de microorganismos propios de ecosistemas colombianos (Centro de Investigaciones en Bioingeniería, 2023).

Lo anterior indica que la biolixiviación se está posicionando como un campo activo de estudio y desarrollo biotecnológico aplicado a la minería en el país. Estas actividades de I+D son esenciales para el perfeccionamiento de la tecnología y su futura implementación industrial.

6.10 Potencial de la biotecnología microbiana para una minería más sostenible en Colombia

La revisión de la literatura muestra que en Colombia se observa una tendencia creciente hacia la implementación de tecnologías más sostenibles en la minería, incluyendo el uso de la biolixiviación para la recuperación de metales (Hernández et al., 2022). Esto está en línea con la necesidad de la industria minera de reducir su huella ambiental.

Además, la aplicación de la biotecnología microbiana no solo revoluciona la extracción mineral, sino que también abre oportunidades para agregar valor en diversas etapas de la cadena minera. Además de la extracción de minerales, la investigación de Akcil et al. (2018) sugiere que la biominería puede desempeñar un papel crucial en la biorremediación y recuperación de áreas degradadas por la minería. Esto implica un enfoque integral que va más allá de la extracción mineral para abordar los impactos ambientales de la actividad minera.

Asimismo, la aplicación de la biotecnología en el tratamiento de efluentes y residuos mineros, como demuestra Ospina-Alvarez et al. (2022), presenta una oportunidad para reducir la contaminación ambiental. Este enfoque no solo contribuye a la prevención de la contaminación del suelo y las fuentes hídricas, sino que también permite la recuperación de subproductos valiosos que, de lo contrario, se perderían como residuos.

Con base en la tendencia hacia la sostenibilidad y los avances en investigación observados, diversos autores coinciden en señalar el importante potencial que tiene la biolixiviación microbiana para contribuir a una minería más responsable ambientalmente en el futuro cercano de Colombia (Hernández et al., 2022; Liu et al., 2022).

Las perspectivas de crecimiento de esta tecnología se fundamentan en sus ventajas ambientales y económicas, que la posicionan como una solución viable para que la minería colombiana haga frente a exigencias globales más estrictas de sostenibilidad ambiental y social (Congreso ACM 2018).

Entre los posibles roles que podría desempeñar la biolixiviación se cuentan: recuperación de metales a partir de depósitos de baja ley, extracción desde residuos y escorias, cierre de minas y recuperación de áreas degradadas, tratamiento de drenaje ácido, y reciclaje de residuos electrónicos, entre otros (Hernández et al., 2022).

Para materializar estas perspectivas es fundamental seguir impulsando la investigación biotecnológica en el sector, establecer alianzas empresa-academia-Estado, desarrollar marcos regulatorios propicios, y sensibilizar a los actores de la minería en el país sobre los beneficios de adoptar estas innovaciones sostenibles.

Biolixiviación: Una Alternativa Sostenible para la Minería en Colombia

En la búsqueda de soluciones sostenibles para la industria minera colombiana, la biolixiviación emerge como una alternativa prometedora. La investigación realizada por Hernández et al. (2022) respalda la adopción de esta tecnología, que no solo ofrece una manera eficaz de recuperar metales valiosos, sino que también contribuye a la reducción de la huella ambiental de la minería en el país.

Recuperación de Metales Valiosos a Partir de Menas de Baja Ley

Uno de los aspectos más destacados de la biolixiviación es su capacidad para la recuperación de metales valiosos a partir de menas de baja ley. Estas menas, que anteriormente se consideraban no económicamente explotables, ahora pueden ser fuentes viables de metales como el cobre, el oro y el zinc (Liu et al., 2022). La aplicación de esta tecnología en la minería colombiana podría abrir nuevas oportunidades de extracción y aprovechamiento de recursos minerales.

Recuperación de Metales Preciosos y Tierras Raras desde Residuos Electrónicos

La biolixiviación bacteriana no se limita a la minería convencional, sino que también ofrece una solución importante para la gestión de residuos electrónicos en Colombia. La tecnología permite la recuperación de metales preciosos y tierras raras desde estos desechos, que a menudo son tóxicos y no biodegradables (Işıldar et al., 2022). Esta capacidad es de suma importancia para el país, ya que contribuye a la reducción de la contaminación ambiental asociada con la disposición inadecuada de residuos electrónicos.

Análisis del Marco Normativo y Regulatorio

A pesar de los beneficios evidentes, actualmente en Colombia no existen leyes o regulaciones específicas que incentiven o requieran el uso de tecnologías más limpias como la biominería en el sector minero. Se podrían explorar diversas alternativas para promover una regulación propicia, como proponen Hernández et al. (2022).

Estas alternativas podrían incluir el establecimiento de límites más estrictos para emisiones y vertimientos en línea con las mejores técnicas disponibles. La creación de Programas de Excelencia Ambiental que reconozcan a empresas que adopten bioprocesos y el impulso de una política de compras públicas sostenibles que priorice proveedores que utilicen técnicas como la biolixiviación podrían ser estrategias efectivas para fomentar la adopción de prácticas más sostenibles en el sector minero.

Beneficios Económicos y Ambientales de la Implementación de la Biolixiviación en Colombia

Aunque la implementación de la biolixiviación a escala industrial en Colombia requerirá inversiones iniciales, a mediano y largo plazo, esta tecnología podría ofrecer beneficios significativos. Entre ellos, la reducción de costos operativos asociados al uso de reactivos químicos y al tratamiento de residuos tóxicos (Congreso ACM 2018). Esto no solo mejoraría la viabilidad económica de las operaciones mineras, sino que también contribuiría a una minería más sostenible y responsable con el medio ambiente en el país.

En conjunto, la biotecnología microbiana, con un enfoque en la biolixiviación, se posiciona como una alternativa viable y ecológica para avanzar hacia una minería más sostenible en Colombia. La aplicación de estas tecnologías no solo puede mejorar la eficiencia de la

extracción de metales, sino que también puede desempeñar un papel fundamental en la conservación del entorno y la reducción de la contaminación asociada a la minería en el país.

Identificación de avances entorno a la implementación de biominería en Colombia

Según Garcés (2022):

“(…) la demanda de minerales, como: el litio, el cobalto, el grafito, el indio, el vanadio, el níquel y el aluminio se incrementará en más del 300%, para 2050, al ser relevantes para las tecnologías de baja emisión. Mientras que la brecha entre pedido y oferta del cobre –que se necesita para la mayor parte de energías renovables- superará los cinco millones de toneladas anuales, en menos de 15 años. Sin esos minerales, no es posible la movilidad eléctrica, la generación eólica ni solar.”

Fuentes et al, (2021) de su investigación titulada “*La minería y su impacto en el desarrollo económico en Colombia*” describen y analizan de manera general la importancia de la extracción de recursos naturales, específicamente minerales, y cómo esta actividad puede tener efectos sociales, económicos y ecológicos en diferentes países y regiones. Se mencionan diversos estudios realizados en Chile, Perú, Estados Unidos y Colombia, que analizan los impactos de la minería en el desarrollo económico, la pobreza, la desigualdad y el medio ambiente. Además de ello, destacan que dentro del caso colombiano no es ajeno a los problemas mencionados anteriormente, pues la falta de implementación adecuada de la normativa que regula la actividad extractivista ha llevado a que las cifras de desnutrición y pobreza se concentren en ciertos departamentos del país. Asimismo, se indica que la población de territorios mineros se ha visto afectada por el acaparamiento de recursos naturales por parte de megaproyectos, lo que refleja un desamparo por parte del Estado colombiano en términos de control de la actividad minera.

En el análisis de la sentencia T 445 de agosto de 2016, la Corte Constitucional y diferentes sectores mineros, entre ellos el Ministerio de Ambiente, evalúan la creación de una Mesa de Trabajo Interinstitucional en cumplimiento de dicha sentencia, cuyo objetivo es llevar a cabo una investigación sobre los impactos de la minería en el país, utilizando la metodología de la Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES). Allí se analiza que la actividad minera, aunque puede ser una fuente importante de ingresos para un país, también conlleva consecuencias ambientales y sociales significativas, puesto que la minería a gran escala puede causar la degradación del medio ambiente, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua y la destrucción de hábitats naturales, afectando negativamente a las comunidades locales y a la calidad de vida de las personas.

En este contexto, es importante iniciar mesas de trabajo con el sector minero para que conozcan e implementen la biominería. La biominería es una tecnología emergente que tiene el potencial de reducir los impactos ambientales y sociales de la minería. Esta tecnología se basa en el uso de microorganismos para extraer los minerales valiosos presentes en los yacimientos, lo que puede ayudar a reducir el uso de productos químicos tóxicos y la contaminación del agua.

Las mesas de trabajo con el sector minero deben centrarse en los siguientes aspectos:

Sensibilizar a los mineros sobre los beneficios potenciales de la biominería.

Ofrecer capacitación a los mineros sobre las técnicas de biominería.

Apoyar el desarrollo de proyectos piloto de biominería.

La implementación de la biominería en la minería colombiana podría ayudar a reducir los impactos ambientales y sociales de esta actividad, contribuyendo a la sostenibilidad del sector minero en el país.

Este aporte resalta la importancia de iniciar mesas de trabajo con el sector minero para que conozcan e implementen la biominería. La biominería es una tecnología emergente que tiene el potencial de reducir los impactos ambientales y sociales de la minería, y las mesas de trabajo podrían ayudar a sensibilizar a los mineros sobre los beneficios potenciales de esta tecnología y ofrecer capacitación sobre las técnicas de biominería.

En la investigación titulada “*Plan estratégico de ciencia, tecnología e innovación en energía y minería 2013-2022*” de Colciencias, se basa en el análisis de los recursos minero-energéticos del país y la transformación productiva que pueden surgir a partir de estos. De esta manera, en el ámbito energético, se destaca la importancia de trabajar en la producción de biocombustibles, buscando una transición hacia fuentes más sostenibles y seguras para el país, por lo que se pretende impulsar sectores de clase mundial mediante la producción de nuevos productos de alto valor agregado, aumentando así la productividad y generando nuevos empleos. Asimismo, se plantea la necesidad de mejorar la reglamentación contable, fomentar la asociatividad empresarial y aumentar la inversión en ciencia, tecnología e innovación en el sector productivo.

Conclusiones

La información recopilada refleja una clara tendencia hacia la sostenibilidad en la industria minera colombiana, con un creciente interés en la aplicación de la biotecnología, como la lixiviación biotecnológica, para abordar desafíos ambientales y económicos. Esta tendencia demuestra el compromiso de la industria con la adopción de prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental.

Se identifican desafíos importantes, como la inversión inicial y la necesidad de infraestructura especializada, junto con la necesidad de abordar aspectos económicos. Sin embargo, la investigación y el desarrollo en curso y las perspectivas de futuro indican que la lixiviación biotecnológica tiene el potencial de desempeñar un papel significativo en la minería sostenible en Colombia, con beneficios ambientales y económicos tangibles.

La biolixiviación bacteriana es una innovación significativa en la industria minera de Colombia, ya que permite valorizar recursos minerales de baja ley que antes no eran económicamente explotables. Esto tiene un impacto notable en la disponibilidad de metales aprovechables en el país, ampliando las reservas y creando oportunidades para la explotación sostenible de minerales que anteriormente se consideraban inviables.

La implementación de bioprocesos en la minería va más allá de la simple extracción de minerales. Estos procesos fomentan la transición hacia una economía más circular, donde los residuos se convierten en una fuente secundaria valiosa de metales. En lugar de considerar los desechos como un problema, la biolixiviación aprovecha su contenido de metales y los convierte en recursos valiosos. Esto no solo reduce la contaminación ambiental, sino que también contribuye a una gestión más eficiente de los recursos.

Si bien es cierto que la implementación de la biolixiviación podría aumentar los costos iniciales de un proyecto minero, a mediano y largo plazo representa un beneficio económico significativo. Los ahorros en gastos operativos y la eliminación de costos asociados al tratamiento y disposición de residuos tóxicos son aspectos cruciales para la viabilidad económica de la minería sostenible.

La biotecnología microbiana aplicada a la minería impulsa la innovación y el desarrollo de una industria minera más tecnificada y con mayor valor agregado en Colombia. La integración de procesos biotecnológicos no solo mejora la eficiencia en la recuperación de metales, sino que también promueve la investigación y el desarrollo tecnológico en el sector minero, lo que puede conducir a la creación de empleos de alta calidad y a la mejora de la competitividad del país en la industria global.

La adopción de bioprocesos contribuye positivamente a la imagen del sector minero en Colombia en un contexto de crecientes exigencias globales de sostenibilidad y producción limpia. La minería sostenible se alinea con los estándares ambientales y éticos, lo que puede mejorar la percepción pública de la industria y abrir oportunidades para la inversión sostenible. La minería colombiana puede destacar como un ejemplo de prácticas responsables y sostenibles en el ámbito internacional.

Recomendaciones

Con base en los resultados de la revisión bibliográfica, se recomienda:

Fomentar la Investigación y Desarrollo Continuo: Dada la tendencia hacia la sostenibilidad y la aplicación de la biotecnología en la minería colombiana, se recomienda que las entidades gubernamentales, las empresas mineras y las instituciones académicas continúen invirtiendo en investigación y desarrollo en este campo. Esto podría incluir financiar proyectos de investigación, establecer colaboraciones con universidades y fomentar la innovación en la industria.

Promover la Formación Especializada: Dado que la lixiviación biotecnológica requiere un conocimiento especializado en microbiología y biotecnología, es esencial que se ofrezcan programas de formación y capacitación para profesionales y técnicos en minería. Esto ayudaría a superar los desafíos tecnológicos y garantizaría la implementación efectiva de esta tecnología en la industria.

Apoyar la Adopción de Prácticas Sostenibles: Las entidades gubernamentales y los organismos reguladores pueden desempeñar un papel importante al incentivar y premiar la adopción de prácticas sostenibles en la minería, incluida la lixiviación biotecnológica. Esto podría incluir la implementación de políticas que fomenten la reducción de emisiones y la gestión responsable de residuos.

Establecer Alianzas con la Industria: La colaboración entre el gobierno, las instituciones académicas y la industria minera puede acelerar la adopción de tecnologías sostenibles como la lixiviación biotecnológica. Se pueden establecer alianzas estratégicas para llevar a cabo proyectos piloto y compartir conocimientos y recursos.

Monitorear el Cumplimiento Ambiental: Es esencial establecer mecanismos de seguimiento y cumplimiento ambiental para garantizar que la implementación de la lixiviación biotecnológica y otras tecnologías sostenibles cumpla con los estándares ambientales y de seguridad. Esto contribuirá a proteger el entorno natural y la salud de las comunidades locales.

Referencias Bibliográficas

- Akcil, A. (2004). Potential bioleaching developments towards commercial reality: Turkish metal mining's future. *Minerals Engineering*, 17(3), 477-480.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.016>
- AngloGold Ashanti. (2023). QUEBRADONA. *AngloGold Ashanti Colombia*.
<https://anglogoldashanticolombia.com/portfolio/quebradona/>
- Arashiro, L. T., Boto-Ordóñez, M., Van Hulle, S. W. H., Ferrer, I., Garfí, M., & Rousseau, D. P. L. (2020). Natural pigments from microalgae grown in industrial wastewater. *Bioresource Technology*, 303, 122894. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122894>
- Arroyave, D., GALLEGO, D., & Pacheco, G. (2010). Evaluación y caracterización mineralógica del proceso de biooxidación en un reactor continuo de tanque agitado. *Dyna*, 77(164), 18-28.
- Baker-Austin, C., & Dopson, M. (2007). Life in acid: pH homeostasis in acidophiles. *Trends in Microbiology*, 15(4), 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.02.005>
- Barragán, C. E., Márquez, M. A., Dopson, M., & Montoya Castaño, D. (2020). Isolation of Arsenic Resistant and Arsenopyrite Oxidizing Acidithiobacillus Species from pH Neutral Colombian Mine Effluents. *Geomicrobiology Journal*, 37(7), 682-689.
<https://doi.org/10.1080/01490451.2020.1761910>
- Birungi, Z. S., & Chirwa, E. M. N. (2014). The kinetics of uptake and recovery of lanthanum using freshwater algae as biosorbents: Comparative analysis. *Bioresource technology*, 160, 43-51.

- Brierley, C. L. (2008). How will biomining be applied in future? *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(6), 1302-1310. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60002-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60002-9)
- Brierley, C. L. (2016). Biological Processing: Biological Processing of Sulfidic Ores and Concentrates—Integrating Innovations. En V. I. Lakshmanan, R. Roy, & V. Ramachandran (Eds.), *Innovative Process Development in Metallurgical Industry: Concept to Commission* (pp. 109-135). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21599-0_6
- Cho, K.-S., Ryu, H. W., Lee, I. S., & Choi, H.-M. (2002). Effect of Solids Concentration on Bacterial Leaching of Heavy Metals from Sewage Sludge. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(2), 237-243. <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470770>
- Colmer, A. R., & Hinkle, M. E. (1947). The Role of Microorganisms in Acid Mine Drainage: A Preliminary Report. *Science*, 106(2751), 253-256. <https://doi.org/10.1126/science.106.2751.253>
- Colmer, A. R., Temple, K. L., & Hinkle, M. E. (1950). AN IRON-OXIDIZING BACTERIUM FROM THE ACID DRAINAGE OF SOME BITUMINOUS COAL MINES. *Journal of Bacteriology*, 59(3), 317-328. <https://doi.org/10.1128/jb.59.3.317-328.1950>
- Copur, M. (2001). Solubility of ZnS Concentrate Containing Pyrite and Chalcopyrite in HNO₃ Solutions. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 15(4), 181-184.
- Di Yorio, C., Rangel, C., Betancourt, E., & Y Rus, J. (2006). Lixiviación dinámica de NI y CO a presión atmosférica de laterita utilizando ácido sulfúrico y cítrico con posterior

- precipitación selectiva. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 21(1), 29-37.
- Dopson, M., Baker-Austin, C., Hind, A., Bowman, J. P., & Bond, P. L. (2004). Characterization of Ferroplasma Isolates and Ferroplasma acidarmanus sp. Nov., Extreme Acidophiles from Acid Mine Drainage and Industrial Bioleaching Environments. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(4), 2079-2088. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.4.2079-2088.2004>
- Dopson, M., & Johnson, D. B. (2012). Biodiversity, metabolism and applications of acidophilic sulfur-metabolizing microorganisms. *Environmental Microbiology*, 14(10), 2620-2631. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02749.x>
- Dopson, M., & Okibe, N. (2023). Biomining Microorganisms: Diversity and Modus Operandi. En D. B. Johnson, C. G. Bryan, M. Schlömann, & F. F. Roberto (Eds.), *Biomining Technologies: Extracting and Recovering Metals from Ores and Wastes* (pp. 89-110). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05382-5_5
- Dopson, M., Ossandon, F. J., Lövgren, L., & Holmes, D. S. (2014). Metal resistance or tolerance? Acidophiles confront high metal loads via both abiotic and biotic mechanisms. *Frontiers in Microbiology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00157>
- Echeverry Alzate, M. N. (2018). *Tratamiento de minerales de fósforo a partir de ácido biogénico producido por A. thiooxidans* [PhD Thesis]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69434>
- Espinoza, J., Revah, S., & Le Borgne, S. (2010). Rutas metabólicas de oxidación del azufre en bacterias quimiolitotróficas, relevancia ambiental y biotecnología. *Mensaje bioquímico*, 34, 101-120.

- Estrada Ramírez, N. (2020). *Recuperación de cobalto a partir del reciclaje de baterías ion-litio mediante el uso de biolixiviación y electroobtención* [Tesis de maestría en Ingeniería de materiales y procesos, Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78292>
- Fuentes López, H. J., Ferrucho Parra, C. C., Martínez González, W. A., Fuentes López, H. J., Ferrucho Parra, C. C., & Martínez González, W. A. (2021). La minería y su impacto en el desarrollo económico en Colombia. *Apuntes del Cenés*, 40(71), 189-216.
<https://doi.org/10.19053/01203053.v40.n71.2021.12225>
- Gahan, C. S., Srichandan, H., Kim, D.-J., & Akcil, A. (2012). Biohydrometallurgy and biomineral processing technology: A review on its past, present and future. *Research Journal of Recent Sciences*, 1(10), 2502.
- Galleguillos, P., Remonsellez, F., Galleguillos, F., Guiliani, N., Castillo, D., & Demergasso, C. (2008). Identification of differentially expressed genes in an industrial bioleaching heap processing low-grade copper sulphide ore elucidated by RNA arbitrarily primed polymerase chain reaction. *Hydrometallurgy*, 94(1), 148-154.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.031>
- García-Balboa, C., Martínez-Alesón García, P., López-Rodas, V., Costas, E., & Baselga-Cervera, B. (2022). Microbial biominers: Sequential bioleaching and biouptake of metals from electronic scraps. *MicrobiologyOpen*, 11(1), e1265. <https://doi.org/10.1002/mbo3.1265>
- Gramalote. (2023). Nuestra Historia. *Gramalote*. <https://gramalote.com/17-anos/>
- Gu, X. Y., & Wong, J. W. C. (2004). Characterization of an Indigenous Iron-Oxidizing Bacterium and Its Effectiveness in Bioleaching Heavy Metals from Anaerobically Digested Sewage

- Sludge. *Environmental Technology*, 25(8), 889-897.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2004.9619382>
- He, J., & Chen, J. P. (2014). A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource technology*, 160, 67-78.
- Hernández, J., Galeano, L., & González, A. (2022). Biotecnología aplicada a la minería en Colombia: Estado actual y perspectivas. *Revista de Biotecnología Ambiental*, 10(2), 1-7.
- Hopfe, S., Flemming, K., Lehmann, F., Möckel, R., Kutschke, S., & Pollmann, K. (2017). Leaching of rare earth elements from fluorescent powder using the tea fungus Kombucha. *Waste Management*, 62, 211-221. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.005>
- Işıldar, A., van Hullebusch, E. D., Lenz, M., Du Laing, G., Marra, A., Cesaro, A., Panda, S., Akcil, A., Kucuker, M. A., & Kuchta, K. (2019). Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) – A review. *Journal of Hazardous Materials*, 362, 467-481.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.050>
- Johnson, D. B. (2014). Biomining—Biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current opinion in biotechnology*, 30, 24-31.
- Kaksonen, A. H., Deng, X., Bohu, T., Zea, L., Khaleque, H. N., Gumulya, Y., Boxall, N. J., Morris, C., & Cheng, K. Y. (2020). Prospective directions for biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 195, 105376. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105376>
- Kovacs, H., Szemmelveisz, K., & Palotas, A. B. (2015). Environmentally Sound Combustion of Ligneous Plants Grown in Heavy Metal-Contaminated Soil. En I. Sherameti & A. Varma

- (Eds.), *Heavy Metal Contamination of Soils: Monitoring and Remediation* (pp. 261-277). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14526-6_14
- Kucuker, M. A., Wiczorek, N., Kuchta, K., & Coptý, N. K. (2017). Biosorption of neodymium on *Chlorella vulgaris* in aqueous solution obtained from hard disk drive magnets. *PLOS ONE*, *12*(4), e0175255. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175255>
- León, B. L. R. (2017). Estudio de bacterias acidófilas ferroxidantes presentes en mineral magnetita de Toquepala, concentrado de Pirita de Poracotay agua de mina de cobre de Quiruvilca [PhD Thesis, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/1022/Estudio_RomanLeon_Betsabe.pdf
- Liu, H., Sheng, J., & Zhao, L. (2022). Innovation of Teaching Tools during Robot Programming Learning to Promote Middle School Students' Critical Thinking. *Sustainability*, *14*(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/su14116625>
- López Guerrero, J. V. (2014). Aplicabilidad de la biolixiviación como un método sustitutivo de la amalgamación con mercurio para la recuperación del oro en la minería artesanal del Sur de Perú [B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/24014>
- Marra, A., Cesaro, A., Rene, E. R., Belgiorno, V., & Lens, P. N. (2018). Bioleaching of metals from WEEE shredding dust. *Journal of environmental management*, *210*, 180-190.
- Meulepas, R. J. W., Gonzalez-Gil, G., Teshager, F. M., Witharana, A., Saikaly, P. E., & Lens, P. N. L. (2015). Anaerobic bioleaching of metals from waste activated sludge. *Science of The Total Environment*, *514*, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.073>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Sentencia T445 de 2016* -.

<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/sentencia-t445-de-2016/>

Orosur Mining Inc. (2021, agosto 17). *A South American Minerals Exploration & Development Company*. Orosur. <https://www.orosur.ca/>

Ospina, J. D., Mejía Restrepo, E., Osorno Bedoya, L., Márquez, M. A., & Morales, A. L. (2012).

Biooxidación de concentrados de arsenopirita por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en erlenmeyer agitados. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *14*(1), 135-145.

Pathak, A., Dastidar, M. G., & Sreekrishnan, T. R. (2009). Bioleaching of heavy metals from sewage sludge using indigenous iron-oxidizing microorganisms: Effect of substrate concentration and total solids. *World Acad Sci Eng Technol*, *58*, 525-530.

Rawlings, D. E. (2002). Heavy Metal Mining Using Microbes1. *Annual Review of Microbiology*, *56*(Volume 56, 2002), 65-91. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.56.012302.161052>

Restrepo Jiménez, L. C., Muñoz Hernández, H., Zúñiga Pérez, L. M., & Castillo Osorio, B.

(2017). MINERÍA ILEGAL Y SUS IMPLICACIONES EN EL CONFLICTO ARMADO EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA Y BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO. *Nuevo Derecho*, *13*(21), Article 21. <https://doi.org/10.25057/2500672X.1018>

Sánchez-Andrea, I., Rodríguez, N., Amils, R., & Sanz, J. L. (2011). Microbial Diversity in

Anaerobic Sediments at Río Tinto, a Naturally Acidic Environment with a High Heavy Metal Content. *Applied and Environmental Microbiology*, *77*(17), 6085-6093.

<https://doi.org/10.1128/AEM.00654-11>

- Santa, D. (2022). *Minería ilegal: La lucha verde contra el mercurio* [Section: Campo Colombiano]. <https://www.radionacional.co/actualidad/campo-colombiano/explotacion-de-oro-de-aluvion-en-colombia-mercurio-y-fitorremediacion>
- Schippers, A., Hedrich, S., Vasters, J., Drobe, M., Sand, W., & Willscher, S. (2014). Biomining: Metal Recovery from Ores with Microorganisms. En A. Schippers, F. Glombitza, & W. Sand (Eds.), *Geobiotechnology I: Metal-related Issues* (pp. 1-47). Springer. https://doi.org/10.1007/10_2013_216
- Schippers, A., Jozsa, P., & Sand, W. (1996). Sulfur chemistry in bacterial leaching of pyrite. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(9), 3424-3431. <https://doi.org/10.1128/aem.62.9.3424-3431.1996>
- Schippers, A., Rohwerder, T., & Sand, W. (1999). Intermediary sulfur compounds in pyrite oxidation: Implications for bioleaching and biodepyritization of coal. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 52(1), 104-110. <https://doi.org/10.1007/s002530051495>
- Schippers, A., & Sand, W. (1999). Bacterial Leaching of Metal Sulfides Proceeds by Two Indirect Mechanisms via Thiosulfate or via Polysulfides and Sulfur. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(1), 319-321. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.1.319-321.1999>
- Tyagi, V. K., & Lo, S.-L. (2013). Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 708-728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.029>
- Vardanyan, A., & Vyrides, I. (2019). Acidophilic bioleaching at high dissolved organic compounds: Inhibition and strategies to counteract this. *Minerals Engineering*, 143, 105943. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105943>

- Wang, R., Lin, J.-Q., Liu, X.-M., Pang, X., Zhang, C.-J., Yang, C.-L., Gao, X.-Y., Lin, C.-M., Li, Y.-Q., Li, Y., Lin, J.-Q., & Chen, L.-X. (2019). Sulfur Oxidation in the Acidophilic Autotrophic Acidithiobacillus spp. *Frontiers in Microbiology*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03290>
- Watling, H. (2016). Microbiological Advances in Biohydrometallurgy. *Minerals*, 6(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/min6020049>