

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMMAN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**PROCESO DE BIOLIXIVIACIÓN DE MINERAL
SULFURADO PARA LA RECUPERACIÓN
DE ORO EN LA REGIÓN TACNA**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA
PROFESIONAL**

Presentado por:

Bach. Jose Alberto Sanchez Pampa

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

PROCESO DE BIOLIXIVIACIÓN DE MINERAL SULFURADO PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO EN LA REGIÓN TACNA

Trabajo de Suficiencia Profesional sustentado y aprobado el día 29 de octubre del 2024 por el bachiller Jose Alberto Sanchez Pampa, estando integrado por el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE :
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO :
Ing. Julián Nieto Quispe

VOCAL :
D r. Luis Fortunato Caso Palpa

ASESOR :
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa



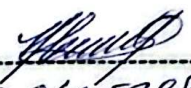
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Luis Fortunato Caso Palpa, docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y materiales como asesor designado para realizar la evaluación a través del software de similitud textual TURNITIN del trabajo de SUFICIENCIA PROFESIONAL, modalidad de titulación acreditada por Resolución de Facultad N° 9182-2024-FAIN/UNJBG, certifico que el informe titulado: **PROCESO DE BIOLIVIXIACIÓN DE MINERAL SULFURADO PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO EN LA REGIÓN TACNA**, presentado por el bachiller **JOSE ALBERTO SANCHEZ PAMPA** para optar el Título de Ingeniero Metalurgista, cumple con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la evaluación realizada a través del software de similitud textual TURNITIN con código de reporte de similitud oid: **23228:495267061** cuenta con el nivel de similitud que es permitido cuyo porcentaje es de 15% por lo que doy fe de la veracidad y queda declarado no cometer el delito de falsedad genérica del contenido del **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL** y esta de acuerdo con el **NIVEL PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su publicación.

Tacna, 11 de septiembre del 2025

Firma del Asesor



DNI: 06452883
Luis F. CASO PALPA



Huella dactilar

Firma del Titulante



DNI: 71321422
Jose Alberto Sanchez Pampa



Huella dactilar

DEDICATORIA

Dedico esta tesis al ser muy importante de mi vida, mi hijo Iker Liam Sanchez Maquera y a mi amada esposa Yoshelin Mireya Maquera.

A mis padres Gricelda Pampa Pancca y Javier Sanchez Checalla y hermanos, quiero expresarles mi más profunda gratitud por todo lo que han hecho y siguen haciendo por mí. Su amor ha sido el más grande regalo que la vida me ha dado, y mi mayor deseo es honrarlo cada día con amor y respeto.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios guiarme y bendecirme por todo el camino que me permite recorrer.

Agradezco a mis padres, que siempre han estado en las buenas y malas apoyándome para crecer profesionalmente, tomando siempre sus consejos y sabiduría.

A mis docentes, que reflejan un pilar importante en mi vida profesional.

Agradecer a mi alma mater la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann que me brindó conocimientos, fortalezas y valores.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| CONTENIDO | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | ix |
| RESUMEN | x |
| ABSTRACT | xi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I | 2 |
| ASPECTOS GENERALES | 2 |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Formulación del problema | 2 |
| 1.3. Justificación e importancia de la investigación | 3 |
| CAPITULO II | 7 |
| FUNDAMENTO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. Antecedentes | 7 |
| 2.2. Bases teóricas | 9 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.2.1. | La biolixiviación | 9 |
| 2.2.2. | Acidithiobacillus ferrooxidans | 10 |
| 2.2.3. | Acidithiobacillus thiooxidans | 11 |
| 2.2.4. | Microorganismos en la biooxidación | 13 |
| 2.2.5. | Factores que afectan el proceso de biolixiviación | 14 |
| 2.2.6. | Mecanismo de ataque bacteriano al mineral | 19 |
| 2.2.7. | Mecanismo de ataque a la arsenopirita | 20 |
| 2.2.8. | Metabolismo bacteriano. | 25 |
| 2.2.9. | Problemas que presenta el pre tratamiento de biooxidación | 27 |
| 2.2.10. | Disolución de los metales preciosos | 28 |
| 2.2.11. | Efectos de los variables importantes de la cianuración | 29 |
| 2.2.12. | Modelo cinético del núcleo sin reaccionar | 40 |
| 2.2.13. | Recuperación mediante biolixiviación | 44 |
| | CONCLUSIONES | 46 |
| | RECOMENDACIONES | 47 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 48 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Biolixiviación de menas refractarias de oro reportado | 22 |
| Tabla 2 Medio nutrientes para el cultivo de thiobacillus ferrooxidans | 25 |
| Tabla 3 Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro | 31 |
| Tabla 4 Cantidad de oro disuelto en una hora | 32 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Células de acidithiobacillus ferrooxidans | 11 |
| Figura 2 Células de acidithiobacillus thiooxidans | 12 |
| Figura 3 Mecanismos de ataque bacteriano a un sulfuro | 20 |
| Figura 4 Potencial-ph equilibrio del diagrama de Au-H ₂ O-CN | 33 |
| Figura 5 Modelo electroquímico para la cianuración del Oro | 36 |
| Figura 6 Esquema de un proceso heterogéneo sólido-fluido | 40 |
| Figura 7 Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar | 42 |

RESUMEN

Durante el desarrollo del presente trabajo se llegó a evidenciar que, el proceso de biolixiviación de mineral sulfurado para la recuperación de oro en la región de Tacna, ofrece una alternativa prometedora y sostenible en la extracción de metales preciosos. La utilización de microorganismos acidófilos para oxidar los sulfuros presentes en el mineral, liberando así el oro encapsulado, ha demostrado ser efectiva y económicamente viable. Este método, además de incrementar la recuperación de oro en comparación con métodos convencionales de lixiviación, presenta ventajas en términos de recuperación del oro y plata, además con respecto al impacto ambiental es reducido. Sin embargo, para maximizar su eficiencia, se recomienda continuar investigando y desarrollando nuevas cepas microbianas, así como optimizar las condiciones de operación.

Palabras clave: Lixiviación, recuperación, minerales, bacterias.

ABSTRACT

During the development of this report, it became evident that the bioleaching process of sulfide minerals for the recovery of gold in the Tacna region offers a promising and sustainable alternative in the extraction of precious metals. The use of acidophilic microorganisms to oxidize the sulfides present in the mineral, thus releasing the encapsulated gold, has proven to be effective and economically viable. This method, in addition to increasing the recovery of gold compared to conventional leaching methods, has advantages in terms of recovery of gold and silver, and the environmental impact is reduced. However, to maximize its efficiency, it is recommended to continue researching and developing new microbial strains, as well as optimizing operating conditions.

Keywords: *Leaching, recovery, minerals, bacteria.*

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de métodos eficaces y sostenibles para la extracción de metales preciosos ha llevado a la exploración de diversas estrategias, entre las cuales se destaca la biooxidación del mineral sulfurado.

Este proceso, que implica la oxidación bacteriana de minerales refractarios, ofrece una alternativa prometedora para la recuperación del oro y otros metales valiosos presentes en matrices mineralógicas difíciles de tratar. En este contexto, el pretratamiento de minerales sulfurados con bacterias quimiolitotrofas acidófilas emerge como una estrategia innovadora para mejorar la eficiencia y la recuperación del oro mediante la cianuración. Este enfoque integrado combina la capacidad metabólica de microorganismos especializados con las técnicas convencionales de lixiviación, abriendo nuevas posibilidades en el campo de la metalurgia extractiva.

En esta investigación, exploraremos en detalle el potencial y los desafíos asociados con la evaluación de la biooxidación del mineral sulfurado, mediante el pretratamiento con bacterias acidófilas, con el objetivo de optimizar el rendimiento de la cianuración en la extracción de oro.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

Se han realizado diversas investigaciones con el objetivo de obtener una mejor recuperación de Au, por lo tanto se ha decidido actuar y emplear este método de la biolixiviación en la región de Tacna y el mineral extraído es de origen del sitio de Pucamarca que se ubica 1050 KM al Sur Este de Lima y 55 KM al noreste de Tacna.

1.2. Formulación del problema

El presente trabajo se busca evaluar el nivel general, la mejora de recuperación mediante el método de biolixiviación, utilizando la acción de bacterias quimiolitotrofas. Referente a las cepas acidithiobacillus ferrooxidans y el consorcio acidófilo compatibles acidithiobacillus ferrooxidans y acidithiobacillus thiooxidans.

Razón por la cual si este método es favorable para este tipo de mineral sulfurado que se va tratar.

1.2.1. Problema General

¿Se podrá evaluar la biooxidación del mineral sulfurado por pre tratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas que mejore la recuperación del oro por cianuración?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Se logrará la acción biooxidante del consorcio de bacterias propuestos?
- ¿Se determinará la recuperación de oro por cianuración después de la biooxidación con los dos tipos de bacterias?

1.3. Justificación e importancia de la investigación

En comparación de otros métodos, la biolixiviación es la mejor opción para tener una óptima recuperación en donde el oro permanece en la fase sólida después de la biooxidación y es extraído mediante un proceso de cianuración posterior. Se pretende mejorar la recuperación de oro bajando los costos de operación.

Es importante esta investigación porque es un método que no requiere mucha inversión, y es beneficioso para las empresas pequeñas que tratan estos minerales.

Justificación académica: La evaluación de la biooxidación del mineral sulfurado mediante el pretratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas es relevante desde el punto de vista académico, ya que contribuirá al avance del conocimiento científico en el campo de la metalurgia y la biotecnología aplicada a la minería. Este estudio permitirá comprender mejor los procesos de oxidación de minerales sulfurados y su impacto en la recuperación de oro, lo que podría generar nuevas líneas de investigación y posibles aplicaciones tecnológicas en el futuro.

Justificación económica: La implementación de un pretratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas para mejorar la recuperación del oro por cianuración podría resultar en beneficios económicos significativos para la industria minera. Al aumentar la eficiencia en la extracción de oro, se reducirían los costos operativos y se optimizaría el rendimiento de la planta de procesamiento: lo que podría traducirse en un aumento de la rentabilidad de la operación minera.

Justificación ecológica: La utilización de bacterias quimiolitotrofas acidófilas como parte del proceso de biooxidación para

mejorar la recuperación de oro por cianuración podría tener beneficios ambientales importantes. Al reducir la cantidad de reactivos químicos tóxicos utilizados en los procesos convencionales de extracción de oro, se disminuiría el impacto ambiental negativo asociado a la minería, contribuyendo a la sostenibilidad y al cuidado del medio ambiente.

Justificación social: La implementación de tecnologías más eficientes y sostenibles en la extracción de oro, como el pretratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas, podría tener un impacto positivo en las comunidades cercanas a las operaciones mineras. Al mejorar la recuperación de oro y reducir los riesgos ambientales asociados a la minería, se podrían generar beneficios sociales, como la creación de empleo, el desarrollo de capacidades locales y una mayor aceptación por parte de la comunidad hacia la actividad minera.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la biooxidación del mineral sulfurado por pretratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas que mejore la recuperación del oro por cianuración.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar la acción biooxidante del consorcio de bacterias propuestos
- Evaluar la recuperación de oro por cianuración después de la biooxidación con los dos tipos de bacterias.

1.5. . Descripción de las características de la investigación

La presente investigación cuyo objetivo es obtener una mejor recuperación de Oro aplicando el proceso de la biolixiviación usando bacterias o microorganismos para el pretratamiento del mineral sulfurado y liberar el oro, esta investigación va dirigido a las pequeñas empresas mineras, es recomendable porque la inversión económica que se da es muy rentable.

La investigación que se presenta incluye fundamentos teóricos que ayudan a comprender el proceso y como aplicarlo. Es así como en las últimas décadas la biohidrometalurgia, se ha convertido en una tecnología comercialmente viable para la extracción de metales preciosos.

Además, es bien conocida por su utilización en la biorremediación, residuos industriales, degradación de cianuro, biodesulfuración de carbones y adecuación de concentrados para

separación por flotación espumante. En este trabajo se presenta el principal fundamento de la oxidación bacteriana de la arsenopirita.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

(Gil, 2020) Según lo expuesto en la investigación, los drenajes ácidos de mina (DAM), caracterizados por una acidez pronunciada (pH 2,5-4,0) y elevadas concentraciones de metales pesados, albergan poblaciones nativas de bacterias oxidantes que promuevan la oxidación progresiva de sulfuros. La actividad de estas bacterias puede emplearse para mitigar la contaminación ambiental y potenciar la recuperación de metales, aspectos de gran relevancia para las plantas metalúrgicas.

(Panduro & Peña, 2015) En el desarrollo y publicación de la tesis se concluye que de muestras de agua ácida es posible aislar la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, caracterizada morfológicamente como bacilo y con tinción de Gram que muestra un color rojizo. Bajo distintos niveles de concentración de sulfato ferrosos y temperatura, se confirmó que la temperatura en laboratorio entre 306,15-310,15 K (33-37 °C) influye significativamente en la actividad bacteriana en ese intervalo se

observó la fase de crecimiento exponencial. Por encima de 310,15 K (37-40 °C) se alcanzó la fase estacionaria, es decir, no hubo incremento en el número de cepas (posible canibalismo), lo que se atribuye a la inhibición de la oxidación, agotamiento de nutrientes o variaciones de pH. Finalmente, las pruebas de aislamiento y adaptación en laboratorio se realizaron en frascos agitados utilizando el medio líquido 9K modificado (M9K) con sulfato ferroso como nutriente (33,4 g/L), y se determinó que un pH de (1,7 – 2,0) mejoró en el desempeño de los microorganismos.

(Alvarez, 2017) En la investigación se constató que los ensayos de biooxidación con *acidithiobacillus ferrooxidans* y un consorcio microbiano, aplicados a concentrados de arsenopirita aurífera con porcentajes de sólidos del 8% y 12%, mostraron un desempeño superior al 8%, donde se alcanzaron mayores niveles de biooxidación y crecimiento bacteriano. Esto se atribuye a que las condiciones con 12% de sólidos, generan mayor estrés para los microorganismos. Por otra parte, la cianuración directa de arsenopirita aurífera sin previo tratamiento alcanzó una recuperación máxima de oro del 51,57 % a las 72 horas, ya que parte del oro permanece encapsulado en la matriz de arsenopirita. Al aplicar el pretratamiento mediante biooxidación se mejora la recuperación aurífera. En consecuencia, se concluye que el

procedimiento de cianuración directa actualmente utilizado en la Empresa Minera “Eminsol S.A, La Paz -Bolivia” no supera el 50% de recuperación de oro. Además, el proceso de biooxidación cumple con las exigencias ambientales vigentes a nivel mundial.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. La biolixiviación

En los procesos de biolixiviación intervienen bacterias acidófilas, cuya principal característica es la generación de ambientes ácidos (pH menor a 3) a través de la producción de ácido sulfúrico . (Alvarez, 2017).

Así mismo, estos microorganismos presentan la capacidad de oxidar compuestos inorgánicos como azufre y/o hierro, lo que constituye la principal vía para aprovechar los minerales como fuente de energía. Entre ellos, las bacterias más empleadas corresponden al género Acidithiobacillus. (Alvarez, 2017)

En términos generales, la mayoría de estas bacterias presentan un rango metabólico restringido, ya que únicamente se desarrollan en condiciones aeróbicas utilizando hierro ferroso. Sin embargo, Thiobacillus ferrooxidans destaca por su versatilidad metabólica, dado que puede obtener energía a partir de compuestos reducidos de azufre

y adicionalmente, oxidar iones metálicos como el hidrógeno molecular, el ácido fórmico y el hierro ferroso.

2.2.2. *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Entre los microorganismos de mayor relevancia en los procesos biohidrometalúrgicos se encuentra *Acidithiobacillus ferrooxidans*, una bacteria gramnegativa de morfología bacilar, cuyo diámetro oscila entre 0,4 y 0,8 μm , y cuya longitud varía de 0,9 a 2,0 μm .(Gil, 2020).

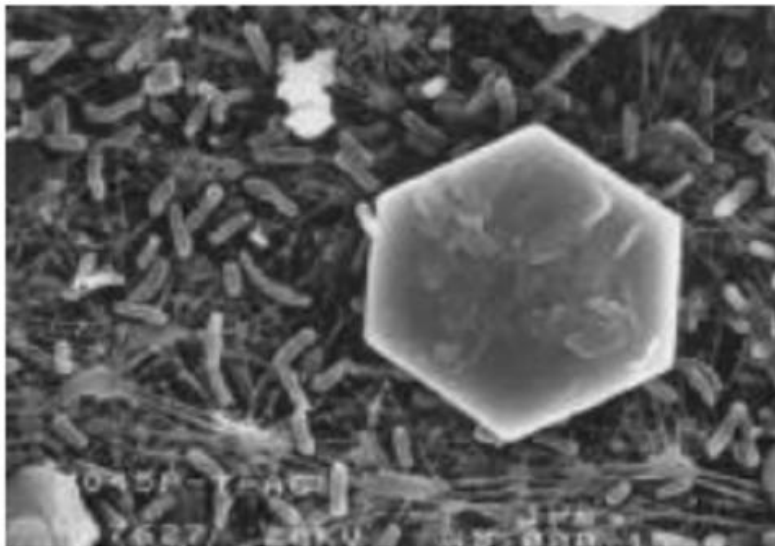
El inóculo de *Acidithiobacillus ferrooxidans* LB151 se obtuvo mediante la centrifugación de 5 mL de cultivo a 5000 rpm durante 5 minutos. Posteriormente, la suspensión celular fue lavada en tres ocasiones con agua ácida estéril (pH 3,5) y, finalmente, las bacterias fueron resuspendidas en el medio destinado a la celda anódica. (Jibaja, y otros, 2019).

Estos microorganismos son autótrofos químicos, lo que implica que utilizan el oxígeno como aceptor final de electrones para obtener la energía necesaria en su crecimiento, a partir de la oxidación del hierro ferroso y de compuestos reducidos de azufre. Se clasifican como bacterias mesófilas, con un rango de crecimiento entre 301 K y 306 K, condicionado por la concentración de hierro disuelto y el pH. Su pH óptimo de crecimiento durante la oxidación del sulfato ferroso se sitúa

entre 2,0 y 2,5; no obstante, mantienen una elevada actividad en condiciones de pH superiores a 4 al oxidar compuestos de azufre.

Figura 1

Células de acidithiobacillus ferrooxidans



Nota: Células de acidithiobacillus ferrooxidans visto con microscopio electrónico de transmisión. Escala 500 nm. (Wenbo, Feng, & Ze, 2023).

2.2.3. Acidithiobacillus thiooxidans

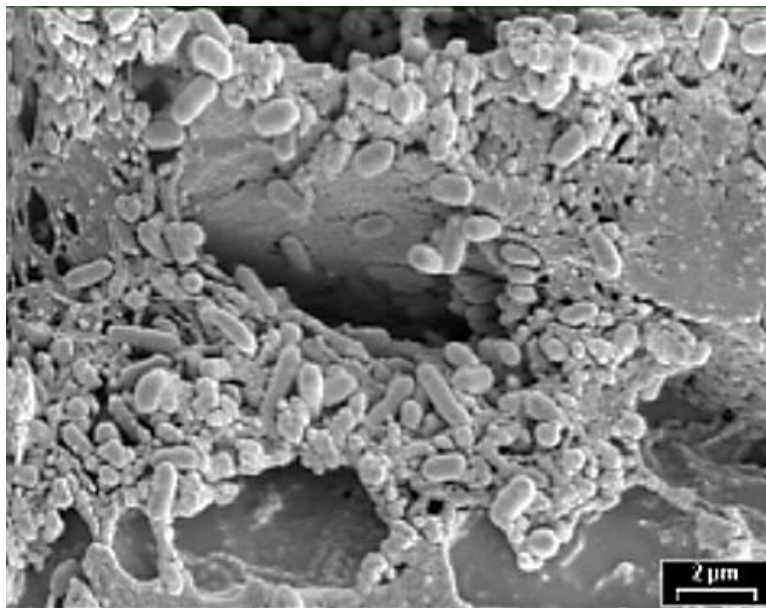
Las características morfológicas de *Thiobacillus thiooxidans* son similares a las de *Thiobacillus ferrooxidans*; no obstante, se distingue por su capacidad de oxidar azufre elemental y reducir compuestos de azufre. A diferencia de este último, carece de la habilidad para oxidar hierro ferroso, proceso considerado fundamental en la rápida disolución de

sulfuros metálicos. En consecuencia, el papel de *Thiobacillus thiooxidans* en la biolixiviación ha sido objeto de estudios parciales. (Jibaja, y otros, 2019).

Thiobacillus thiooxidans, presenta una mayor eficiencia en la oxidación del azufre elemental en comparación con *Thiobacillus ferrooxidans*. Este microorganismo se distingue por generar niveles elevados de acidez, alcanzando valores de pH cercanos a 0,5, mientras que su temperatura óptima de crecimiento resulta muy similar a la reportada para *Thiobacillus ferrooxidans*. (Wenbo, Feng, & Ze, 2023).

Figura 2

Células de acidithiobacillus thiooxidans



Nota: (Wenbo, Feng, & Ze, 2023).

2.2.4. Microorganismos en la biooxidación

Entre los principales microorganismos quimioautótrofos empleados en procesos de biooxidación se encuentran *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, especies que forman parte de la diversidad microbiana característica de los yacimientos minerales y de los efluentes ácidos presentes en ambientes naturales (Quintana, y otros, 2005).

Los microorganismos presentes en estos ambientes se clasifican principalmente como acidófilos, capaces de desarrollarse en condiciones extremas de acidez con valores de pH inferiores a 1; mesófilos, cuyo rango de crecimiento se sitúa entre 293 K y 303 K; y quimiótrofos, que obtienen la energía necesaria para sus funciones vitales a partir de reacciones químicas (Quintana, y otros, 2005).

La presencia de sulfuros metálicos en el entorno puede disminuir o incluso inhibir la actividad microbiana, debido a factores como la reducción del oxígeno disuelto y el daño estructural en la pared celular causado por la fricción con partículas sulfuradas, además de los efectos tóxicos de iones metálicos como As^{3+} , As^{5+} y Fe^{3+} . No obstante, especies como *Thiobacillus ferrooxidans* presentan mecanismos de adaptación que les permiten incrementar su tolerancia y atenuar la inhibición microbiana en dichas condiciones (Quintana, y otros, 2005).

Un factor crítico en los procesos de oxidación biológica, lo constituye la elevada concentración de arsénico liberado a partir de minerales como la arsenopirita y la pirita. Este elemento es en gran medida responsable de la disminución de la actividad bacteriana, principalmente debido a la formación de un complejo ADP-arsénico que interfiere con las funciones metabólicas e inhibe la tasa de crecimiento microbiano.

Un aspecto relevante en estos estudios es establecer el momento en que los microorganismos logran adaptarse a una concentración específica de iones metálicos pesados. En la investigación referida, el criterio de adaptación se basó en la velocidad de oxidación del hierro ferroso, considerándose alcanzada cuando los valores obtenidos fueron similares a los registrados en condiciones libres de iones metálicos pesados. (Quintana, y otros, 2005).

2.2.5. Factores que afectan el proceso de biolixiviación

El desempeño de los microorganismos en los procesos de lixiviación biológica está fuertemente influenciado por las condiciones ambientales. Entre los factores determinantes se encuentran la temperatura, el pH, el potencial redox, la disponibilidad de nutrientes, la

concentración de iones metálicos y el tamaño de partícula del mineral. (Gil, 2020).

a) Temperatura

Actualmente se reconoce que la degradación de minerales en biolixiviación corresponde a un proceso químico, en el cual los microorganismos desempeñan un papel esencial al generar hierro y protones (ácido). Diversos estudios han evidenciado que la velocidad de las reacciones químicas se incrementa al doble con un aumento de la temperatura a 283 K. Si bien la mayoría de los minerales presentan una descomposición eficiente en el rango de 308 K a 313 K, en minerales más refractarios, como la calcopirita, es necesario alcanzar temperaturas entre 318 K y 353 K para que el proceso resulte económicamente rentable.. (Gil, 2020).

No obstante, las bacterias requieren oxígeno para llevar a cabo la oxidación de hierro y azufre en sus estados reducidos. La solubilidad del oxígeno en agua a 308 K es de aproximadamente 8 g/m³, pero esta disminuye con el incremento de la concentración iónica y de la temperatura de la solución, lo que en muchos casos hace necesario un suministro externo de oxígeno para mantener niveles adecuados.

b) PH

El pH constituye un factor determinante en la tasa de crecimiento microbiano, ya que modifica el estado de ionización de los grupos funcionales presentes en las enzimas localizadas tanto en el citoplasma como en el periplasma celular. (Gil, 2020).

La magnitud de la precipitación está determinada principalmente por el pH, la composición iónica y la concentración del medio. Dado que la precipitación de Fe^3 puede producirse incluso a valores bajos de pH, en procesos de biooxidación de sulfuros realizados en reactores de tanque agitado es necesario mantener el pH dentro del intervalo de 1,6 a 1,8 para garantizar la actividad microbiana. (Gil, 2020).

c) Potencial Redox

El potencial redox constituye un parámetro indirecto del metabolismo energético y de la actividad bacteriana durante la biolixiviación, al reflejar la tendencia de una solución a experimentar procesos de oxidación o reducción. En este contexto, la relación Fe^3/Fe^2 se emplea como indicador, siendo común que en la fase exponencial de crecimiento los valores de Eh en medios ferrooxidantes oscilen entre 320 y 580 mV. Se ha observado que la extracción de iones alcanza niveles

máximos cuando el Eh de la solución ácida supera el rango de 400 a 450 mV. (Romero, 2018).

d) Concentración de iones metálicos

La existencia de compuestos tóxicos o inhibidores en el mineral representa un obstáculo significativo en los procesos de biolixiviación. En este contexto, *Acidithiobacillus ferrooxidans* muestra distintos niveles de sensibilidad frente a cationes y aniones presentes en el medio. Una estrategia para mitigar este inconveniente consiste en seleccionar cepas con resistencia natural a dichos iones, obtenidas directamente de los yacimientos donde se realiza la extracción, o en desarrollar cepas modificadas con estas capacidades. (Romero, 2018).

e) Nutrientes

La mayor parte de los microorganismos implicados en la lixiviación bacteriana de sulfuros presentan un metabolismo autotrófico, lo que significa que incorporan el carbono requerido para su crecimiento a partir del CO₂ atmosférico y obtienen energía mediante la oxidación de compuestos inorgánicos como Fe²⁺ o S²⁻. Además, el resto de nutrientes esenciales deben encontrarse en el medio de cultivo, en forma de sales,

y en proporciones acordes a la composición celular de los microorganismos (Romero, 2018).

El nitrógeno constituye el nutriente esencial para *Thiobacillus acidithiobacilli*. En los ecosistemas naturales, este requerimiento puede ser parcialmente cubierto por organismos heterótrofos coexistentes. Cuando la disponibilidad de nutrientes es limitada o su suministro resulta insuficiente, el crecimiento celular se ve afectado, reduciéndose su velocidad. Para el cultivo de *Acidithiobacillus* en laboratorio, los medios más empleados son el 9K y el T&K (Romero, 2018).

f) Actividad de los microorganismos y concentración bacteriana

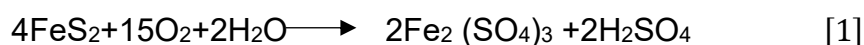
La adaptación al entorno constituye un proceso natural observado en animales, plantas y microorganismos. En el ámbito de la biohidrometalurgia, este principio se aplica mediante la adaptación de microorganismos en medios selectivos, lo cual representa una estrategia habitual para optimizar la eficiencia tanto de la lixiviación biológica como de la biooxidación (Jibaja, y otros, 2019).

g) Tamaño de partícula

Diversos estudios han evidenciado que la reducción en el tamaño de partícula puede inducir factores inhibitorios, principalmente de carácter mecánico, debido al incremento en la frecuencia de colisiones entre partículas y células. Asimismo, se produce un estrés metabólico asociado a la presencia de concentraciones elevadas de metales pesados, lo que en conjunto ocasiona un efecto global desfavorable en el proceso. (Gil, 2020).

2.2.6. Mecanismo de ataque bacteriano al mineral

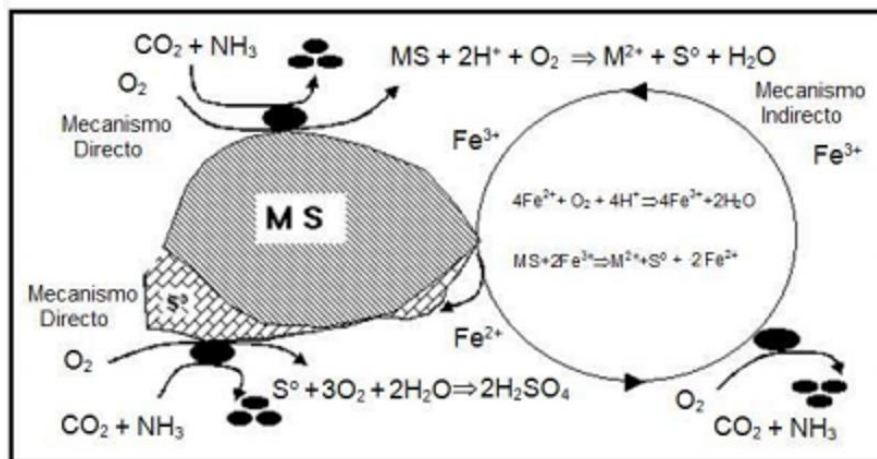
La biolixiviación puede desarrollarse a través de dos mecanismos principales: el contacto directo, que implica la interacción física inmediata entre las bacterias y el mineral, y el contacto indirecto, en el cual la oxidación de sulfuros se lleva a cabo mediante los iones férricos generados por la actividad bacteriana. Tal como se esquematiza en la Figura 3, estos mecanismos dependen de la naturaleza del sulfuro y del metal divalente asociado (M). En el caso particular de la pirita, la reacción [1] indica que el ataque ocurre predominantemente por vía de contacto directo:



El sulfato férrico resultante pierde sus propiedades oxidantes debido a su precipitación en forma coloidal, asociado a complejos con ligandos orgánicos.

Figura 3

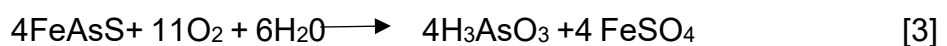
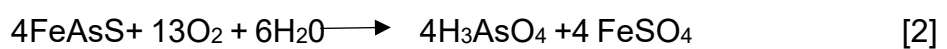
Mecanismos de ataque bacteriano a un sulfuro

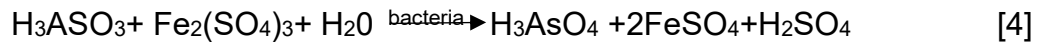


Nota: (Wenbo, Feng, & Ze, 2023).

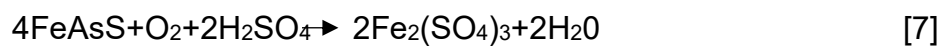
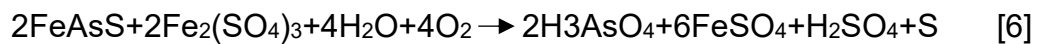
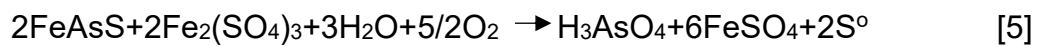
2.2.7. Mecanismo de ataque a la arsenopirita

En el caso de la arsenopirita, el mecanismo de contacto directo se describe mediante la reacción [2]; sin embargo, algunos autores plantean la posibilidad de que se forme arsenito, el cual en presencia de sulfato ferroso se transforma en ácido arsénico, tal como se observa en las reacciones [3] y [4].





Bajo el mecanismo de contacto indirecto, las reacciones más probables corresponden a [5] y [6], en las que se produce azufre elemental. Finalmente, el ciclo se completa con las reacciones [7] y [8], en las que los iones de hierro generados son oxidados bacterianamente y el azufre elemental se convierte en ácido sulfúrico.



En la tabla 1, se resumen los resultados de biolixiviación de menas refractarias de oro obtenidos en ensayos de laboratorio, en los que la interacción entre la mena, el medio de cultivo y los microorganismos ocurrió de manera simultánea.

Tabla 1*Biolixiviación de menas refractarias de oro reportado*

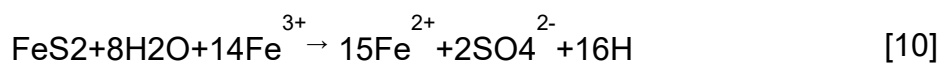
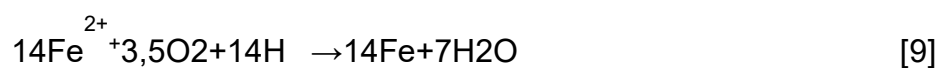
| Matriz | Bacteria | Ensayos de Biolixiviación | | | | Recuperación Au | | |
|---------------|-----------|---------------------------|-------------------|--------------------|------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| | | Temp. (°C) | Modo de Operación | % sólidos (WW%) | Tiempo (d) | Oxido. Fe (%) | Sin tratamiento (%) | Con tratamiento (%) |
| | T.f | 35 | Discontinuo | 20 | 35 | 87 | 24 | 81 |
| | T.f | 30–35 | Discontinuo | - | 30 | 60 | 25 | 90 |
| | T.f | 30–35 | Continuo | - | 12 | | | |
| Pirita | | | | 15 | 14 | 45 | 7 | 70 |
| | T.f | 35 | Discontinuo | 15 | 33 | 85 | 7 | 94 |
| | | | | 15 | 70 | 100 | 7 | 100 |
| | T.f | 30-35 | Discontinuo | 15 | 30 | 90 | 10 | 95 |
| | T.f | 30 | Continuo | 18 | 5 | 90 | 21 | 95 |
| | | | | 10 | 30 | 65 | | 90 |
| | T.f | 30 | Discontinuo | 10 | 16 | 50 | | 90 |
| | T.f | 30 | Discontinuo | 5 | 8 | 29 | 6 | 56 |
| | S161 | 50 | Discontinuo | 5 | 8 | 47 | 6 | 56 |
| | Sulfato | 60 | Discontinuo | 5 | 8 | 84 | 6 | 91 |
| Arseno-pirita | T.f | 35 | Continuo | 12 | 2 | 70(As) | 15 | 73 |
| | Termof. | 43 | Continuo | 3 | 7 | | 27 | 88 |
| | | | | 15 | 6 | 31 | 55 | 90 |
| | T.f | 35 | Continuo | 15 | 10 | 80 | 55 | 99 |
| | T.f + T.t | 35 | Continuo | 12 | 7 | 80 | 71 | 92 |
| | T.f | | Discontinuo | 20 | 7 | 80 | 54 | 85 |

Nota: Biolixiviación con *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans*.

En el mecanismo de contacto indirecto, la mayoría de los microorganismos se encuentran adheridos a la superficie del mineral. Esto implica que el proceso bioquímico de transferencia de electrones, responsable de la disolución mineral, ocurre en la interfase entre el sustrato y la pared celular bacteriana. Tanto en los mecanismos de

contacto directo como indirecto, la contribución esencial de las bacterias a la disolución del mineral radica en la regeneración de agentes oxidantes, principalmente iones Fe(III), y en la posterior oxidación de compuestos derivados de dicho proceso. (Panduro & Peña, 2015).

En ambientes con pH bajo, como los presentes en los drenajes mineros ácidos (DMAE), la velocidad de oxidación del Fe(II) resulta limitada en comparación con sistemas que incluyen bacterias como *Thiobacillus ferrooxidans*. Diversos estudios han demostrado que en presencia de este microorganismo, la oxidación de Fe(II) a Fe(III) puede incrementarse hasta 10⁶ veces respecto al entorno abiótico. El mecanismo propuesto de acción directa de las bacterias sobre los minerales se representa mediante la siguiente ecuación:



En este contexto, la oxidación del Fe(II) se ve considerablemente acelerada por la presencia de bacterias, mientras que el Fe(III) actúa como el principal agente oxidante en la superficie de la pirita. La función esencial de los microorganismos consiste en regenerar el Fe(III), proceso cuya velocidad resulta limitada en condiciones de pH cercano a 3 o en ausencia de actividad bacteriana. (Quintana, y otros, 2005).

La aceleración de la oxidación de Fe(II) a Fe(III) por parte de los microorganismos puede estar asociada con la producción de sustancias poliméricas extracelulares (EPS), que no solo favorecen la adhesión a las superficies minerales, sino que además podrían constituir el microambiente en el cual ocurre dicha conversión.

Cuantificación de bacterias: En el marco de los ensayos de biolixiviación, resulta indispensable la cuantificación de bacterias para estandarizar las pruebas, especialmente al inicio de los experimentos en suspensión, ya que esta información permite conocer la población celular por mililitro de cultivo.

Número más probable: Una de las técnicas utilizadas para este fin es el cálculo del número más probable (NMP), que combina el análisis de diluciones seriadas, la consulta de tablas estadísticas y la confirmación visual, para estimar con precisión la densidad celular en el medio (Romero, 2018).

Tabla 2*Medio nutrientes para el cultivo de thiobacillus ferrooxidans*

| Constituyente | Leadhen et al. (1951) | Medio 9K (1959) Silverman&Lundgren | Mihaylov et al. (1991) |
|---|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| (NH ₄) ₂ SO ₄ | 0,15 g | 3,0 g | ----- |
| CO(NH ₂) ₂ | ----- | ----- | 3,0 g |
| K ₂ HPO ₄ | 0,05 g | 0,5 g | 0,5 g |
| MgSO ₄ 7 H ₂ O | 0,5 g | 0,5 g | 0,5 g |
| Ca(NO ₃) ₂ | 0,01 g | 0,01 g | 0,01 g |
| KCl | 0,05 g | 0,10 g | 0,10 g |
| agua destilada | 1000 ml | 700 ml | 700 ml |
| 10 N H ₂ SO ₄ | ----- | 1,0 ml | 1,0 ml |
| FeSO ₄ 7 H ₂ O | 10 ml de solución al 10 % p/v | 300 ml de solución al 14,47 % p/v | 300 ml de solución al 14,47 % p/v |

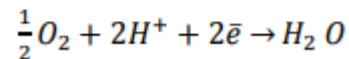
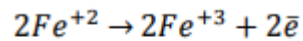
Nota: (Panduro & Peña, 2015).

2.2.8. Metabolismo bacteriano.

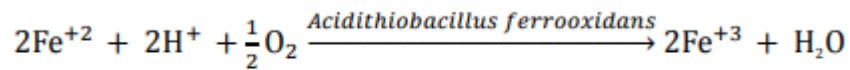
El metabolismo de *Acidithiobacillus ferrooxidans* se sustenta en rutas características de los organismos quimiolitótrofos. Esta bacteria, emplea el ciclo de Calvin para la fijación de CO₂, además de vías metabólicas específicas para la asimilación de nitrógeno y fósforo.

El ciclo de Calvin requiere de ATP y NADPH, moléculas energéticas que, en este caso, son generadas a través de la oxidación del ión ferroso en presencia de oxígeno.

Este proceso está regulado por dos semi-reacciones asociadas con la oxidación del Fe²⁺:

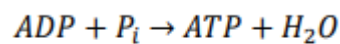


En el metabolismo de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, el ión ferroso no atraviesa directamente la pared celular; en su lugar, solo se transfiere un electrón, mientras que protones, oxígeno y moléculas de agua sí pueden atravesar la membrana. El proceso inicia en la superficie celular, donde un transportador extracelular recibe el electrón proveniente del Fe^{2+} , reduciéndose transitoriamente. Posteriormente, este transportador se oxida nuevamente y transfiere el electrón a otros componentes de la cadena, de manera secuencial, hasta alcanzar el citoplasma. Allí, el oxígeno actúa como aceptor final de electrones, combinándose con protones para generar moléculas de agua, lo que conlleva un consumo neto de protones. Entre los principales transportadores involucrados en este proceso destacan la rusticianina, el citocromo c y el citocromo a. En el caso específico de *A. ferrooxidans*, la oxidación bacteriana del Fe^{2+} se puede representar mediante la siguiente reacción: (Yamanaka,1995).



$$\Delta G = -8.1 \text{ [Kcal/mol]}.$$

En el metabolismo de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, se requieren dos moles de iones ferrosos para la síntesis de una molécula de adenosín trifosfato (ATP). Este acoplamiento entre la oxidación del Fe^{2+} y la generación de energía celular se representa mediante la siguiente ecuación: (Yamanaka,1995):



$$\Delta G = -7.8 \text{ [Kcal/mol]}.$$

2.2.9. Problemas que presenta el pre tratamiento de biooxidación

La biolixiviación presenta ventajas significativas frente a otros métodos de pretratamiento pirotécnico e hidrometalúrgico, ya que constituye una alternativa económica respecto al uso de reactivos y equipos. Este proceso se desarrolla a presión atmosférica y a temperaturas moderadas, lo que contribuye a disminuir tanto los costos operativos como el impacto ambiental. No obstante, la oxidación biológica de los minerales suele requerir varios días de operación para alcanzar recuperaciones cercanas al 90 % de oro en la etapa posterior de cianuración. Esta cinética lenta puede incrementar los costos

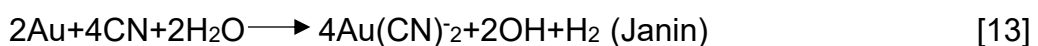
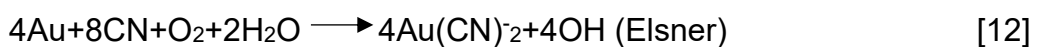
operativos, razón por la cual resulta necesario optimizar la velocidad del proceso con el fin de ampliar su aplicación a nivel industrial (Gil, 2020).

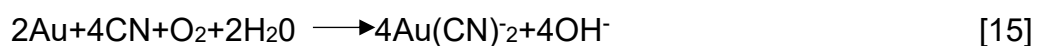
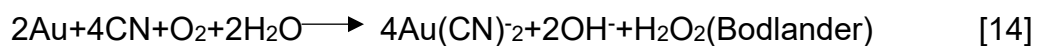
2.2.10. Disolución de los metales preciosos

El proceso de disolución del oro mediante cianuro en medio alcalino ha sido aplicado con notable éxito durante casi un siglo. Si bien se ha señalado que la tasa de recuperación metalúrgica en operaciones de cianuración no siempre es elevada, en la práctica se alcanzan valores satisfactorios. En particular, los circuitos de cianuración agitada logran recuperaciones superiores al 90 %, mientras que en plantas de cianuración con tiempos de residencia más prolongados se obtienen rendimientos similares. La reacción global más simple que describe la disolución del oro metálico en soluciones cianuradas se expresa de la siguiente manera: (Mariluz, 2018)

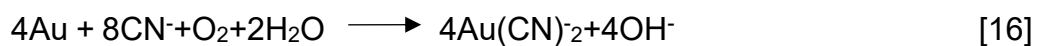


En la práctica se ha constatado que el oro no logra disolverse de manera eficiente en ausencia de una aireación intensa. Por esta razón, se han propuesto las siguientes reacciones como responsables de la disolución del oro en soluciones diluidas de cianuro.





El oxígeno desempeña un papel fundamental en el proceso de disolución del oro. Tal como se establece en la ecuación (16), los resultados evidencian que la reacción progresa hasta completarse, es decir, hasta el consumo total del cianuro disponible o la disolución completa del metal. (Mariluz, 2018).



2.2.11. Efectos de los variables importantes de la cianuración

- ✓ **Efecto del tamaño de la partícula en la velocidad de disolución del oro.**

Cuando el mineral presenta oro grueso libre, se emplean comúnmente dispositivos como plantillas o trampas para su recuperación. Sin embargo, en el proceso de cianuración, las partículas de mayor tamaño pueden no alcanzar a disolverse dentro del tiempo de lixiviación establecido. Bajo condiciones óptimas de aireación y agitación, se ha determinado que la velocidad máxima de disolución del oro es de 0,0325 kg/m² por hora. (Mariluz, 2018).

- **Efecto del oxígeno sobre la cianuración del oro.**

Si bien se han empleado oxidantes como peróxido de sodio, permanganato de potasio, bromo y cloro, una aireación adecuada puede generar resultados equivalentes, con la ventaja de implicar menores costos en comparación con los agentes químicos. La concentración de oxígeno disuelto en una solución diluida de cianuro está condicionada por cuatro factores principales. (Mariluz, 2018).

- La altitud (presión barométrica)
- La temperatura de la solución
- El tipo e intensidad de agitación
- La fuerza iónica de la solución

Cuando la concentración de cianuro es baja, la presión de oxígeno no influye en la velocidad de disolución del oro. No obstante, en concentraciones elevadas de cianuro, donde la velocidad de disolución deja de depender de la concentración del solvente, el proceso se vuelve controlado por la presión de oxígeno. (Mariluz, 2018).

Se evaluó la tasa de disolución del oro en una solución de NaCN al 0,10 %, empleando atmósferas de nitrógeno, oxígeno y combinaciones de ambos gases. Los ensayos se efectuaron en 0,1 L de solución de cianuro a 298 K, manteniendo constante el volumen de gas en cada prueba. Los valores de velocidad de disolución del oro,

registrados media hora después de iniciado cada ensayo, se presentan en la siguiente tabla.:

Tabla 3

Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro

| Oxígeno (%) | Oro disuelto en 1 hora (kg/m ²) |
|-------------|---|
| 0 | 0,0004 |
| 9,6 | 0,0103 |
| 20,9 | 0,0236 |
| 60,1 | 0,0762 |
| 99,5 | 0,1262 |

Nota: (Mariluz, 2018).

- **Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de disolución del oro.**

La cinética de disolución de los metales preciosos en soluciones de cianuro. está directamente influenciada por el área superficial del metal en contacto con la solución, lo que evidencia que se trata de un proceso heterogéneo. Asimismo, la velocidad de disolución se ve condicionada por la intensidad de agitación, lo que refleja la influencia de fenómenos de naturaleza física en el sistema. (Azañero, 2001).

Tabla 4*Cantidad de oro disuelto en una hora*

| NaCN sol. % | Au disuelto en 1 hora kg/m ² |
|-------------|--|
| 0,500 | 0,02943 |
| 0,250 | 0,03007 |
| 0,100 | 0,02986 |
| 0,050 | 0,03251 |
| 0,025 | 0,02513 |
| 0,010 | 0,00338 |

Nota: (Azañero, 2001).

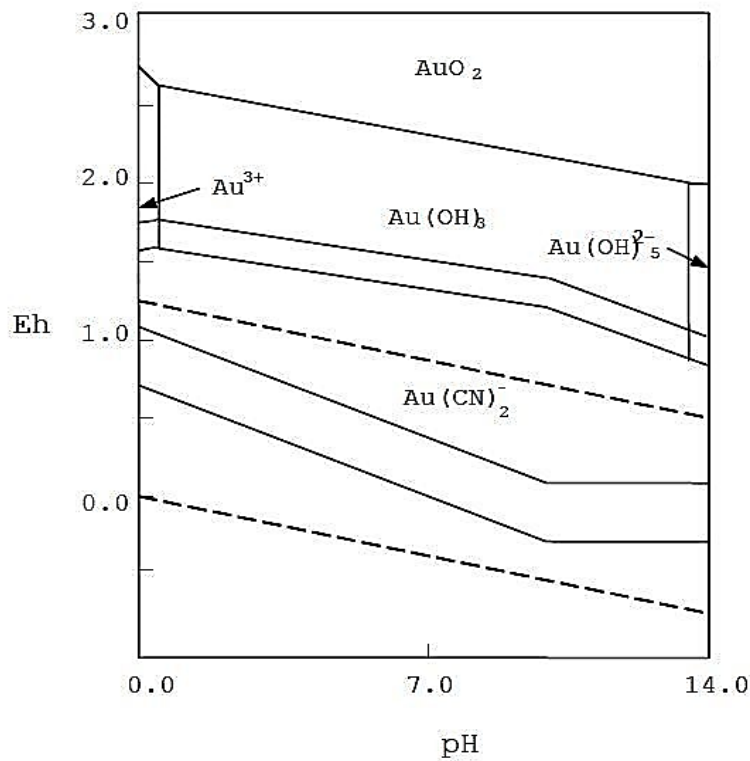
A presión atmosférica, la cianuración no depende directamente de la concentración de cianuro. A temperatura ambiente y presión atmosférica, la solubilidad del oxígeno en agua alcanza un valor de 0,0082 kg/m³, equivalente a $0,26 \times 10^{-3}$ mol/L. Bajo estas condiciones, la cantidad mínima requerida de cianuro de sodio (peso molecular 49) corresponde a $4 \times 0,26 \times 10^{-3} \times 49 = 0,051$ g/L. En consecuencia, concentraciones de NaCN superiores a 0,05 g/L no incrementan la velocidad de disolución del oro, dado que a presión atmosférica, el proceso se encuentra limitado por la concentración constante de oxígeno en la solución. (Azañero, 2001).

- **Efecto de pH**

El diagrama Eh–pH del sistema oro–cianuro (Figura 4), muestra que el potencial electroquímico de disolución, definido como la diferencia entre la línea de oxidación del oro y las reacciones de reducción del oxígeno, alcanza su valor máximo en un rango de pH comprendido entre 9 y 9,5 (Azañero, 2001).

Figura 4

Potencial-ph equilibrio del diagrama de Au-H₂O-CN a 298,15 K



Nota: (Azañero, 2001).

- **Efecto de adiciones alcalinas sobre la disolución del oro**

En la operación industrial se emplea soda cáustica o cal para neutralizar la acidez de la mena, aunque la cal es la opción más utilizada por su bajo costo. La cantidad de óxido de calcio adicionada por tonelada de mena procesada se conoce como “alcalinidad protectora”. Si bien un exceso de cal previene la hidrólisis del cianuro, su presencia en grandes proporciones puede disminuir la velocidad de disolución del oro, especialmente en menas sulfurosas. Por ello, el nivel de alcalinidad debe controlarse cuidadosamente, siendo recomendable mantenerlo en valores bajos para favorecer una recuperación eficiente. (Azañero, 2001).

La incorporación de bases como CaO , NaOH o Na_2CO_3 en el proceso de cianuración cumple diversos propósitos:

- a) Evitar pérdidas de cianuro ocasionadas por hidrólisis
- b) Reducir el consumo de cianuro debido a la acción del dióxido de carbono atmosférico.
- c) Descomponer los bicarbonatos presentes en el agua de proceso antes de su empleo en la cianuración.
- d) Neutralizar la acidez propia de los constituyentes de la mena.
- e) Contrarrestar los compuestos ácidos generados por la descomposición de minerales en la solución de cianuro.

- f) Favorecer la sedimentación de partículas finas para facilitar la separación de la solución rica.
- g) Optimizar la extracción en menas que contienen telururos, plata roja o rocicler, cuya descomposición se acelera en condiciones de mayor alcalinidad.

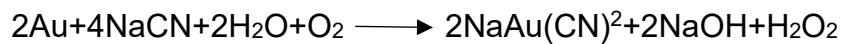
- **Efecto de la temperatura**

Cuando se aplica el proceso de cianuración a una solución que contiene oro metálico, la temperatura ejerce una influencia dual sobre la velocidad de disolución. Por un lado, el incremento de la temperatura incrementa la energía cinética de las moléculas en solución, favoreciendo la actividad química y en consecuencia, acelerando la velocidad de disolución del oro. Sin embargo, de manera opuesta, el aumento de la temperatura disminuye la solubilidad de los gases en el medio, reduciendo la concentración de oxígeno disuelto, el cual es esencial para el progreso de la reacción de disolución. En este sentido, la temperatura actúa como un factor regulador, en donde el balance entre la mayor actividad química y la menor disponibilidad de oxígeno determina la cinética global de disolución. (Azañero, 2001).

- **Cinética en la lixiviación de oro**

La disolución del oro en procesos de cianuración, se encuentra principalmente condicionada por fenómenos de transporte de masa.

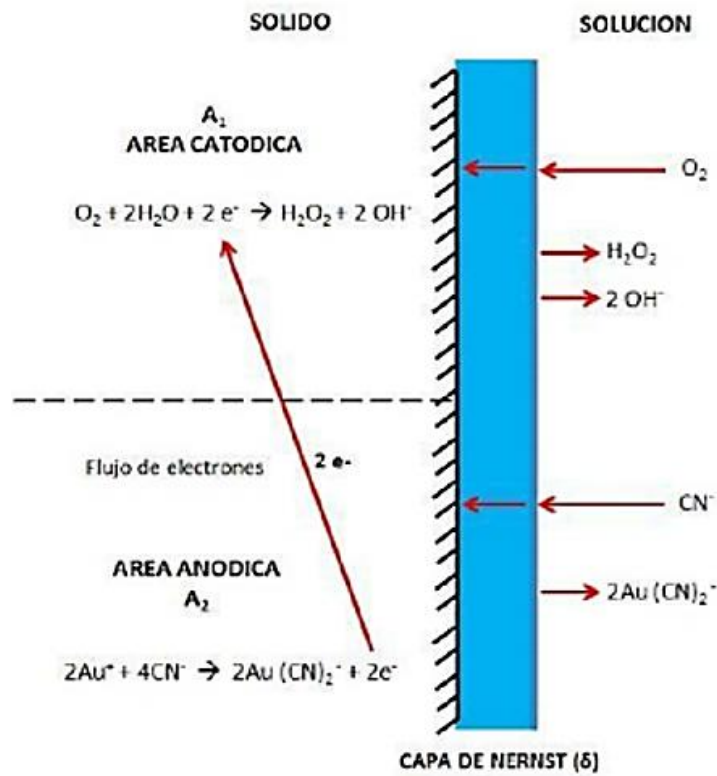
Bajo estas circunstancias, la velocidad de disolución está determinada por el espesor de la capa de difusión y por las propiedades físicas de la mezcla o pulpa en agitación. (Azañero, 2001).



Los estudios de cinética de la reacción señalan que el proceso electroquímico se desarrolla en la interfase de las zonas anódicas y catódicas. En este sistema, la corriente anódica se encuentra controlada por la difusión del cianuro hacia la superficie, mientras que la corriente catódica está limitada por la velocidad de transferencia difusiva del oxígeno. (Gil, 2020).

Figura 5

Modelo electroquímico para la cianuración del Oro



Nota: (Azañero, 2001).

La ecuación cinética general de la cianuración constituye la base fundamental de interpretación del proceso. Cuando la concentración de cianuro se encuentra en niveles muy bajos, el primer término del denominador en dicha expresión puede considerarse despreciable, lo que conduce a una forma simplificada de la ecuación de disolución:

$$Tasa\ de\ disolución = K_1 [CN^-] \rightarrow Tasa\ de\ disolución = \frac{1A D_{CN^-} [CN^-]}{2\delta}$$

La relación anterior. evidencia que a bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución está controlada únicamente por la concentración de dicho reactivo, lo cual coincide con los resultados experimentales reportados. En contraste, cuando la concentración de cianuro es elevada, el segundo término del denominador de la ecuación general puede depreciarse, obteniéndose una forma simplificada de la expresión:

$$Tasa\ de\ disolución = 2 \frac{A D_{O_2} [O_2]}{\delta} \rightarrow Tasa\ de\ disolución = K_2 [O_2]$$

De este modo, a elevadas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución pasa a depender principalmente de la concentración de oxígeno disuelto en la solución, lo cual concuerda con los resultados experimentales obtenidos. Asimismo, se puede inferir que, para alcanzar una velocidad máxima de disolución, deben cumplirse simultáneamente las condiciones de concentración adecuada tanto de cianuro como de oxígeno.

$$\frac{1 A D_{CN^-} [CN^-]}{2 \delta} = 2 \frac{A D_{O_2} [O_2]}{\delta}$$

Entonces, la velocidad limite máxima para la disolución del oro ocurre cuando:

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}}$$

Se ha establecido que la difusión del ion cianuro hacia la interfase presenta mayores dificultades en comparación con la del oxígeno. Esto se debe en primer lugar, a su naturaleza aniónica, que favorece su asociación transitoria con protones durante el transporte y en segundo lugar, a su mayor tamaño molecular respecto al oxígeno. En consecuencia, no resulta sorprendente que la molécula de oxígeno al encontrarse como gas disuelto en el medio, posea una movilidad aproximadamente 1,5 veces superior a la del cianuro. Los coeficientes de difusión medidos experimentalmente a 298 K , confirman esta diferencia, arrojando valores aproximados como los que se presentan a continuación. (Domic, 2001):

$$D_{O_2} = 2,76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad \text{y} \quad D_{CN^-} = 1,83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

se mantiene la relación:

$$D_{O_2} / D_{CN^-} = 1,5$$

Al sustituir los valores experimentales de los coeficientes de difusión en la ecuación cinética, se determina que la disolución del oro alcanza su mayor velocidad cuando la relación molar entre la concentración de cianuro y la de oxígeno disuelto, es cercana a seis:

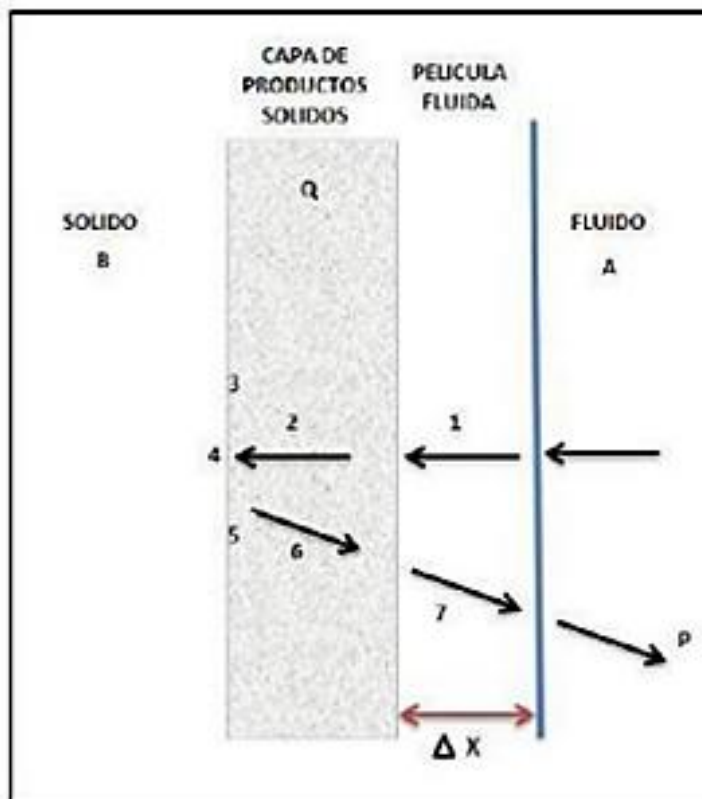
$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 6$$

2.2.12. Modelo cinético del núcleo sin reaccionar.

El carácter parabólico observado en la cinética de lixiviación se asocia directamente con las diferentes etapas que intervienen en el mecanismo de disolución de una partícula de mineral o concentrado. Dichas etapas, se ilustran en la siguiente figura correspondiente al caso de las dos reacciones previamente analizadas (Ballester et al., 2000).

Figura 6

Esquema de un proceso heterogéneo sólido-fluido



Nota: Metalurgia Extractiva de Ballester, Verdeja y Sancho

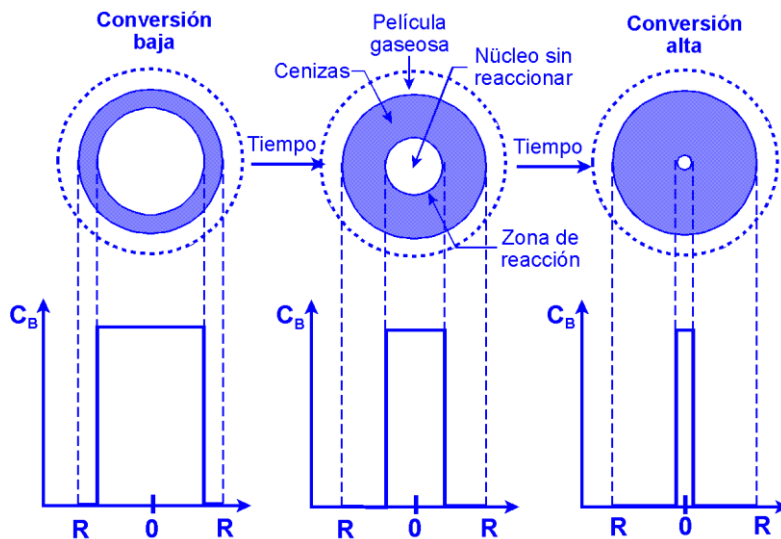
Las etapas representadas en la Figura 6, comprenden:

- a) El transporte del reactivo A, hacia la superficie del sólido (difusión a través de la película líquida de espesor X).
- b) El paso de A, a través de la capa de productos sólidos Q.
- c) La adsorción de A en el interfaz sólido-líquido.
- d) La reacción química en dicha interfaz.
- e) La desorción de los productos formados.
- f) El transporte de los productos fluidos a través de la capa de productos sólidos Q.
- g) El transporte de los productos fluidos a través de la película líquida.

Inicialmente, la velocidad de lixiviación es elevada, ya que el reactivo interactúa directamente con las especies de oro expuestas en la superficie de la partícula. Sin embargo, a medida que el proceso avanza, la tasa de reacción disminuye debido a que la interfaz activa, se encuentra progresivamente más alejada de la superficie externa; lo que obliga a los reactivos y productos a recorrer mayores distancias dentro de la partícula. Este comportamiento se ilustra en la figura siguiente:

Figura 7

Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar

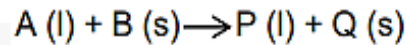


Nota: (Wenbo, Feng, & Ze, 2023).

Se puede demostrar de forma matemática que el mecanismo de reacción descrito es el responsable del comportamiento parabólico observado en procesos de lixiviación. A continuación, se presenta la deducción de la expresión de la velocidad de lixiviación de una partícula de mineral considerando dos casos límite:

- Cuando la tasa de lixiviación está gobernada por la difusión del reactivo lixivante a través del sólido (correspondiente a la etapa 2)
- Cuando la tasa viene determinada por la reacción química entre el lixivante y la fase mineral (correspondiente a la etapa 3)

La nomenclatura adoptada se fundamenta en el análisis cinético de la reacción de lixiviación general que se presenta a continuación:



Dónde:

A = Líquido (Fluido) = Solución lixiviante de Cianuro de Sodio.

B = Sólido = Mineral de oro.

P = Producto líquido o Solución lixiviada con oro.

Q = Producto sólido o Residuos lixiviados

Modelo mixto

Corresponde a casos en que hay más de una etapa controlante.

Se modela mediante la siguiente ecuación:

$$t = y * \tau_1 * \left(1 - 3(1 - x)^{2/3} + 2(1 - x)\right) + (1 - y) * \tau_2 * \left(1 - (1 - x)^{1/3}\right)$$

Donde:

t: tiempo de conversión total del sólido, días.

x: conversión, disolución de cobre.

R: radio inicial de partícula, cm.

ρ_B : densidad de partícula, mg/cm³

b: coeficiente estequiométrico de la fase sólida.

C_{Ag}: concentración del reactivo en la fase líquida, mg/mL.

D_e: coeficiente de difusión efectivo.

k_s: coeficiente cinético de reacción, mL/cm² * días.

τ_1 : τ de difusión en la ceniza, días.

Estas técnicas presentan restricciones asociadas a los elevados costos operativos, los cuales no pueden ser compensados por la rentabilidad del proceso. A ello se suma una limitación igualmente relevante relacionada con los problemas medioambientales que generan durante su aplicación.

2.2.13. Recuperación mediante biolixiviación.

Yacimientos con leyes medias o bajas de metal, la aplicación de la biolixiviación permite alcanzar rendimientos de extracción cercanos al 95% o incluso superiores, resultados que serían inalcanzables mediante técnicas tradicionales como la pirometalurgia o la hidrometalurgia. En el caso más difundido, la biolixiviación de cobre se obtiene un producto metálico con una pureza del 99,99%, significativamente mayor a la del cobre electrolítico (99,1%) o catódico (90%). Adicionalmente, este método reduce de manera considerable los costos de producción, dado que los reactores o pilas de mineral requieren un control mínimo, no se necesita la gran cantidad de energía utilizada en el tueste y/o la reducción de la mena, ni la adquisición de reductores como coque, aluminio o monóxido de carbono. A ello, se suma que el proceso puede realizarse directamente en el sitio de explotación, evitando así costos de transporte, e incluso en algunos casos es factible la recuperación de metales a partir de silicatos.

Como ventaja adicional, los productos obtenidos antes del proceso de purificación suelen presentar una pureza superior, siendo en ciertas ocasiones aptos para su utilización directa. (Vázquez, x 2007).

CONCLUSIONES

La efectividad del pretratamiento con bacterias acidófilas se ha demostrado que el pretratamiento del mineral sulfurado con microorganismos acidófilas, es una estrategia efectiva para mejorar la recuperación de oro mediante la oxidación de los sulfuros y la liberación del oro encapsulado.

El consorcio de bacterias tiene la capacidad de llevar a cabo una acción biooxidante, es decir, de descomponer compuestos orgánicos mediante la oxidación. Este proceso es fundamental en la descomposición de materia orgánica y minerales sulfurados, ya que las bacterias pueden utilizar estos compuestos como fuente de energía para su metabolismo.

En el caso de yacimientos con una riqueza de metal media-baja, con la biolixiviación se consigue incrementar el rendimiento de la extracción hasta valores cercanos al 95% o incluso mayores, algo impensable por métodos tradicionales como la pirometalurgia o la hidrometalurgia.

RECOMENDACIONES

Investigación continua sobre microorganismos y condiciones de operación:

Se podría incluir la exploración de cepas microbianas más resistentes o la modificación de factores como pH, temperatura y concentración de nutrientes para maximizar la actividad bacteriana y la oxidación de los sulfuros.

Implementación de tecnologías de monitoreo y control avanzadas, esto permitirá una respuesta rápida y eficaz para minimizar pérdidas de oro y optimizar la eficiencia del proceso.

Se recomienda implementar programas de capacitación y concientización para el personal involucrado en el proceso de biolixiviación, enfocados en buenas prácticas operativas, manejo seguro de productos químicos y cuidado del medio ambiente. Además, es importante promover una cultura de responsabilidad ambiental y sostenibilidad en toda la organización minera, involucrando a empleados, contratistas y comunidades locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, J. (2017). Evaluación de la biooxidación de concentrado arsenopiritico aurífero por pretratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas que mejoren la recuperación del oro por cianuración en la empresa minera Eminsol S.A. Bolivia. *para optar el Título de Ingeniero Metalurgista*. Universidad Nacional, Tacna. Obtenido de <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/3995/JUAN%20JHONNY%20GIL%20ROBLES.pdf?sequence=1>
- Apari, N. (2021). Evaluación sisicoquímica del fruto de carica candicans gray (acara) provenientes del distrito de ticrapo de la provincia de Castrovirreyña - Huancavelica. *Tesis de grado*. Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú. Obtenido de <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/12d45115-41e7-410e-abeb-6c652b45f97f/content>
- Azañero, A. (2001). Recuperación de oro y plata de minerales por Heap Leaching. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalúrgia y Ciencias Geograficas*. Obtenido de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v04_n7/recup_oro_plata.htm#:~:text=%2D%20La%20solubilidad%20del

%20oro%20en,m%C3%A1ximo%20cuando%20contiene%200.25%
25%20NaCN.

Cerpa, M., Lazo, M., & Sánchez, G. (2016). Valoración de la Compañía Minera Milpo S.A.A. *Tesis de grado*. Universidad del Pacífico, Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11354/1153>

Gil, J. (2020). Aislamiento y aplicación de la bacteria acidithiobacillus ferrioxidans en la biooxidación de minerales auríferos refractarios. *Tesis para optar el título profesional*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Lima, Perú. Obtenido de <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/3995/JUAN%20JHONNY%20GIL%20ROBLES.pdf?sequence=1>

Jibaja, S., Oyola, V., Berastain, A., Ramos, D., Roncal, E., Medina, J., . . . Hurtado, J. (2019). Producción de electricidad empleando Acidithiobacillus ferrooxidans a partir de iones tiosulfato y férrico. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(1). Obtenido de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v85n1/a02v85n1.pdf>

Mariluz, N. (2018). Cianuración de minerales auríferos por agitación en presencia de cobre para la extracción de oro a nivel laboratorio. *Tesis de grado*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Lima, Lima. Obtenido de

<https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/3334/MARILUZ%20BENITES%2C%20NOIMI%20OLINDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Minam. (2022). *Guia para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/80291961/Guia-Para-Evaluar-EIAs-de-Proyectos-Mineros>

Panduro, I., & Peña, M. (2015). Aislamiento de cepas de acidithiobacillus ferrooxidans para la recuperacion de metales de minerales sulfurados. *para optar el Título de Ingeniero Químico*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3745/Panduro%20Trinidad-Pe%c3%b1a%20Quispealaya.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Quintana, M., Ly, M., Bauer, J., Espinoza, M., Montoya, Y., & Espinoza, J. (2005). Avances en la caracterización molecular de los microorganismos biooxidantes en tanques industriales de biooxidación de arsenopirita para la recuperación de oro y en drenajes ácidos de minas: Reporte preliminar. *Revista especializada IPEN*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.13054/443>

Romero, F. (2018). Recuperación de oro a partir de relaves de piritas auríferas. *Tesis de grado*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú. Obtenido de <https://1library.co/document/yr39em7y-recuperacion-oro-partir-relaves-piritas-auriferas.html>

Tiindero. (2023). *Definición de Biolixiviación*. Obtenido de <https://conceptodefinicion.de/biolixiviacion/>

Wenbo, L., Feng, Q., & Ze, L. (2023). Isolation and Characterization of A Novel Iron–Sulfur Oxidizing Bacterium *Acidithiobacillus Ferrooxidans* YQ-N3 and its Applicability in Coal Biotransformation. *Minerals*, 13(1), 95. doi:<https://doi.org/10.3390/min13010095>

Vazquez, x (2007). Lixiviación microbiana. *rebigo* 2, 47-54

Yamanaka, T, (1995). "Molecular aspects of the electron transfer system which participates in the oxidation of ferrous ion by *Thiobacillus ferrooxidans*". *FEMS Microbiology Reviews* 17. 401-413