

Trabajo Fin de Grado

Grado en Bioquímica

Facultad de Biología

Universidad de Sevilla



Aplicaciones biotecnológicas en la producción de oro

Autor:

Jesús Luque Fernández

Tutor:

Alfonso Mazuelos Rojas

Junio 2023

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Objetivo..... | 3 |
| 2. Contexto actual de la minería del oro..... | 3 |
| 3. Metalurgia extractiva del oro | 6 |
| 3.1. Mineralogía del oro | 6 |
| 3.2. Refratariedad de menas auríferas | 7 |
| 3.3. Pre-tratamiento de menas de oro refractarias | 7 |
| 3.4. Proceso integrado de la obtención de oro a partir de menas refractarias con pre-tratamiento biológico | 8 |
| 4. Biohidrometalurgia del oro | 10 |
| 4.1. Biohidrometalurgia..... | 10 |
| 4.2. Interés de la biohidrometalurgia en la extracción de oro | 11 |
| 4.3. Microorganismos en biolixiviación..... | 12 |
| 4.4. Mecanismos de biolixiviación..... | 13 |
| 4.5. Vías de biolixiviación..... | 16 |
| 5. Factores que afectan a la biolixiviación | 17 |
| 5.1. pH..... | 17 |
| 5.2. Temperatura | 18 |
| 5.3. Nutrientes | 18 |
| 5.4. Oxígeno (O ₂) | 19 |
| 5.5. Dióxido de carbono (CO ₂)..... | 19 |
| 5.6. Sustancias tóxicas..... | 19 |
| 5.7. Características del sustrato | 20 |
| 6. Procedimientos actuales de producción de oro | 20 |
| 7. Conclusiones | 26 |
| 8. Referencias..... | 28 |

1. Objetivo

La producción de oro por vía biotecnológica, aunque sólo supone un 5% de la producción mundial, mueve aproximadamente 1000 millones € al año. Esta revisión bibliográfica pretende poner en valor el papel de la biotecnología como disciplina con las herramientas necesarias para suplir la gran demanda de metales preciosos como el oro en un contexto de continuo desarrollo tecnológico. La calidad de las minas de oro sigue una tendencia decreciente y los bioprocesos permiten valorizar estos recursos de forma sostenible y económica.

2. Contexto actual de la minería del oro

El oro es un metal de transición de color amarillo, brillante, blando, muy maleable y dúctil. Tiene una alta densidad ($19\,300\text{ kg/m}^3$) y un alto punto de fusión (1064°C). Es resistente a la corrosión y buen conductor de la electricidad y del calor. Además, es un metal que se caracteriza por ser poco reactivo y por la facilidad para formar aleaciones con otros metales, lo que permite desarrollar nuevas propiedades de interés, como el aumento de su dureza (Yannopoulos, 1991).

Desde el Antiguo Egipto y a lo largo de toda historia de la humanidad, el oro ha sido un recurso muy importante para la civilización. Se ha usado sobre todo en ornamentación y joyería, como símbolo de poder y divinidad, y también para la fabricación de monedas y lingotes. En la actualidad, su principal uso sigue siendo la joyería, pero sus propiedades únicas han hecho que sea de vital importancia en numerosos campos de aplicación. El oro es un componente fundamental de dispositivos electrónicos gracias a su alta conductividad eléctrica. Además, se emplea en aeronáutica para el recubrimiento de naves espaciales gracias a su capacidad de reflejar la radiación infrarroja y en medicina como agente de contraste para técnicas de diagnóstico (Kunter & Mridha, 2016).

Gran parte del oro extraído hasta la fecha se ha reciclado y sigue existiendo de una forma u otra. Se estima que, en 2022, se han reciclado unas 90 t, lo que supone un 3% de la demanda mundial (*Mineral Commodity Summaries 2023*, 2023). No obstante, mientras sea tan valorado y siga creciendo dicha demanda, se seguirán explotando los recursos auríferos, actividad económica fundamental en muchos países (*World Gold Council*,

2023). La distribución geográfica de las reservas mundiales de oro descubiertas hasta la fecha se muestra en la **Figura 1**.

La extracción de oro se lleva a cabo en todos los continentes excepto la Antártida, concentrándose sobre todo en América, Asia y Oceanía. En 2022, se produjeron aproximadamente 3000 t de oro en el mundo. Entre los principales productores se encuentran China, Australia, Rusia, Canadá, Estados Unidos, México, Kazajistán, Sudáfrica, Uzbekistán, Perú y Ghana (*Mineral Commodity Summaries 2023*, 2023).

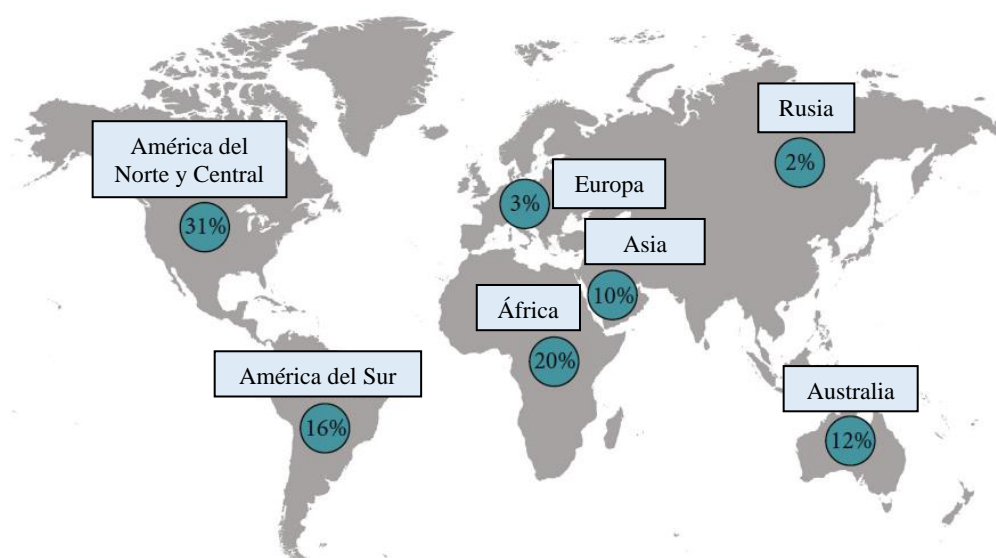


Figura 1. Reservas mundiales de oro. Adaptado de Adams (2016).

El crecimiento de la población mundial y el desarrollo tecnológico ha incrementado en gran medida la demanda de metales, entre ellos el oro. Por ejemplo, la producción de dispositivos electrónicos tales como *smartphones* requiere del uso de más de 60 metales diferentes (Kaksonen et al., 2018). Sin embargo, la explotación de los recursos minerales está provocando la disminución de la concentración de metales en las minas, por lo que su extracción es cada vez de mayor complejidad (Prior et al., 2012). Como ejemplo representativo se muestra una gráfica de la disminución de la concentración de oro en las minas de Australia desde la década de los 50 (**Figura 2**). Según un estudio de Sverdrup et al. (2013), las reservas mundiales de oro de fácil extracción podrían haberse consumido para 2030 si se sigue con la tendencia actual de extracción.

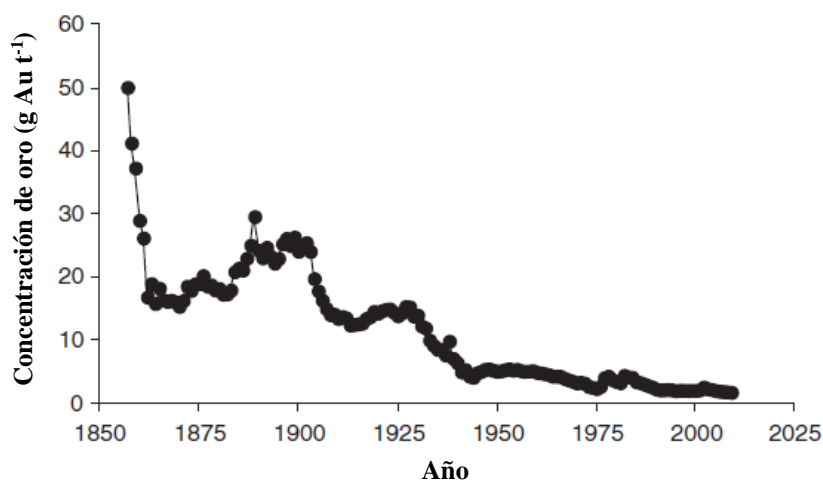


Figura 2. Evolución de la concentración de oro de minas auríferas en Australia. *Adaptado de Mudd et al. (2007).*

El agotamiento de las reservas y la creciente demanda están contribuyendo al continuo aumento del precio del oro, cuyo valor ha incrementado por más de 6 en los últimos 20 años (**Figura 3**). En el año 2000, el precio del oro rondaba los 9000 €/kg mientras que, en mayo de 2023, ha ascendido a unos 58000 €/kg (*World Gold Council, 2023*).



Figura 3. Evolución del precio del oro (€/kg). *Fuente: World Gold Council (2023).*

El agotamiento de los depósitos de minerales de alta concentración en metales ha creado la necesidad de explotar otros recursos mineros de menor calidad. Sin embargo, los altos costes de operación de los métodos tradicionales hace que no sean rentables para la explotación de este tipo de menas metálicas (Parga & Carrillo, 1996). De esta manera, se están buscando alternativas más económicas y sostenibles para la extracción de oro de depósitos de minerales más complejos.

3. Metalurgia extractiva del oro

3.1. Mineralogía del oro

El oro es un metal inerte a presión y temperatura ambiente, por lo que no existen muchos compuestos de oro en la naturaleza. La concentración de oro promedio en la corteza terrestre es de 0,005 ppm, mucho más baja que la de metales similares como la plata (0,07 ppm) o el cobre (50 ppm) (Marsden & House, 2006).

La forma predominante en la que se encuentra el oro en la corteza terrestre es como metal nativo. Con frecuencia, puede encontrarse formando aleaciones con plata y, minoritariamente, formando teluros. Una de las formas más habituales en las que se encuentra el oro en estado nativo es en forma de inclusiones microscópicas en minerales sulfurados como la pirita (FeS_2) y la arsenopirita (AsFeS_2). Tanto es así, que la pirita, mineral sulfurado más común y que contiene cantidades considerables de oro en su estructura (entre 0,2 y 132 ppm), es la fuente principal de obtención de este metal precioso (Marsden & House, 2006). En la **Figura 4** se ilustran los tipos de asociaciones entre el oro y los minerales sulfurados.



Figura 4. Tipos de asociaciones del oro con minerales sulfurados. *Adaptado de Del Barrio Martín et al. (2019).*

La baja concentración de oro en rocas primarias implica la necesidad de concentrarlo mediante operaciones de lixiviación para alcanzar concentraciones aptas

para el mercado. Durante siglos, la recuperación del oro se ha llevado a cabo por métodos gravimétricos, aprovechando su elevada densidad. A finales del siglo XIX se comenzaron a emplear métodos hidrometalúrgicos como la cianuración para su obtención a partir de menas más complejas y con menor concentración de metales preciosos (Del Barrio Martín et al., 2019).

3.2. Refractariedad de menas auríferas

La oclusión de las partículas de oro en minerales sulfurados es la causa más común de refractariedad, ya que estas matrices son insolubles y difíciles de penetrar con disoluciones de cianuro, método tradicional para la solubilización del oro. Los depósitos de oro se consideran refractarios cuando la recuperación por cianuración es menor al 80%, incluso después de una molienda muy fina. Mientras que las extracciones deben estar por encima del 90%, de algunos materiales solamente se consigue extraer entre el 5-60% de su contenido en oro (Iglesias & Carranza, 1994).

Atendiendo a la **Figura 4**, sólo la asociación 1 permite la obtención directa del oro ya que está liberado de la matriz de sulfuro. Por el contrario, los demás tipos de asociaciones provocan refractariedad. Dentro de ellas, el oro tiene más posibilidades de ser liberado en las asociaciones 2 y 3, donde la mineralogía no es tan compleja como en las asociaciones 4, 5 y 6. La mineralogía de la asociación 6 es de suma complejidad debido a que los granos de oro son muy pequeños, del orden de 1 μm (Del Barrio Martín et al., 2019).

En la naturaleza, las reservas mundiales de mineral refractario son mucho mayores que las reservas minerales fáciles de tratar (Iglesias et al., 1998). La obtención de oro a partir de menas refractarias está tomando cada vez más importancia debido al agotamiento de las reservas de obtención directa, que se refleja con la disminución de la concentración de oro en las minas (**Figura 2**).

3.3. Pre-tratamiento de menas de oro refractarias

Para la obtención de oro de menas refractarias es necesario realizar un tratamiento oxidativo previo a la cianuración que rompa la matriz de sulfuros y libere el oro haciéndolo accesible para el cianuro. Existen tres procedimientos principales para llevar a cabo este pre-tratamiento (Iglesias & Carranza, 1994):

- **Tostación**

La tostación es el método tradicional más empleado para el tratamiento de minerales refractarios de oro. Este procedimiento pirometalúrgico se lleva a cabo a 800-900°C y se basa en la conversión de los sulfuros metálicos en óxidos, liberándose el azufre en forma gaseosa como SO₂ (compuesto muy contaminante) (Iglesias & Carranza, 1994). Aunque es posible la fabricación de H₂SO₄ con estos gases, el mercado de sulfúrico no es muy atractivo para este tipo de producción ya que estos procesos son bastante caros (Parga & Carrillo, 1996).

- **Oxidación a presión**

La oxidación a presión es un procedimiento hidrometalúrgico en el que los sulfuros, en presencia de oxígeno, son completamente oxidados a sulfatos. Estos procesos se llevan a cabo a temperaturas de 170-225°C y a muy altas presiones (1100-3200 kPa) (Parga & Carrillo, 1996).

- **Biooxidación**

La biooxidación u oxidación biológica es un procedimiento biohidrometalúrgico basado en el uso de microorganismos. Se introdujo en la década de los 90 como alternativa a los métodos tradicionales de pre-tratamiento de menas de oro en matriz de sulfuros (Schippers et al., 2014). Este procedimiento se tratará en mayor detalle a partir del **apartado 4**.

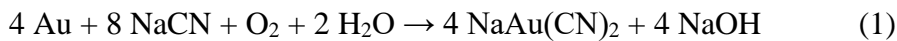
3.4. Proceso integrado de la obtención de oro a partir de menas refractarias con pre-tratamiento biológico

En general, las plantas industriales que emplean pre-tratamientos biológicos para la extracción de oro a partir de menas piríticas refractarias siguen el mismo flujo de operación (Sajjad et al., 2019). En la **Figura 5** se muestra un esquema generalista del recorrido que hace el mineral desde que se extrae de la mina hasta que se obtiene el oro.

En primer lugar, el mineral extraído de la mina se rompe en fragmentos más pequeños (del orden de mm) mediante una operación conocida como trituración. Posteriormente, el tamaño del mineral se reduce a micras mediante una operación conocida como molienda. La siguiente etapa (opcional) consiste en la concentración gravimétrica del mineral, con el objetivo de eliminar otros minerales más ligeros como el

cuarzo, de una densidad de aproximadamente 2600 kg/m³, obteniendo así mayores concentraciones de pirita aurífera, de densidad superior a 4000 kg/m³. El concentrado obtenido se acondiciona y se mezcla con un medio acuoso hasta obtener una densidad de pulpa (masa de sólido mineral/volumen de líquido · 100) adecuada para los microorganismos. En ese momento se somete al pre-tratamiento biológico, en el que se solubiliza la pirita y se libera el oro (Lunt & Weeks, 2016).

Una vez liberado de la matriz de sulfuros, el oro se disuelve mediante el método de cianuración, en el que se usa NaCN como agente acomplejante. El cianuro de sodio, al disolverse en agua, se ioniza, y el ion cianuro se coordina con el oro formando un complejo llamado aurocianuro. La ecuación (1) muestra la reacción de disolución del oro y formación del aurocianuro (Deschênes, 2016):



El oro disuelto como complejo cianurado se recupera mediante adsorción con carbón activo o a partir del método de extracción sólido-líquido Merrill-Crowe, en el que se usa una suspensión de polvo de cinc que cementa al oro desde el complejo, haciendo que éste precipite (Iglesias et al., 1998). Posteriormente, se filtra el cemento que está depositado sobre las partículas de cinc y se funde, dando un producto conocido como *bullion*, que también contiene otros metales como plata, platino y cadmio. Finalmente, los lingotes de *bullion* se llevan a refinería para obtener el oro puro (Lunt & Weeks, 2016).

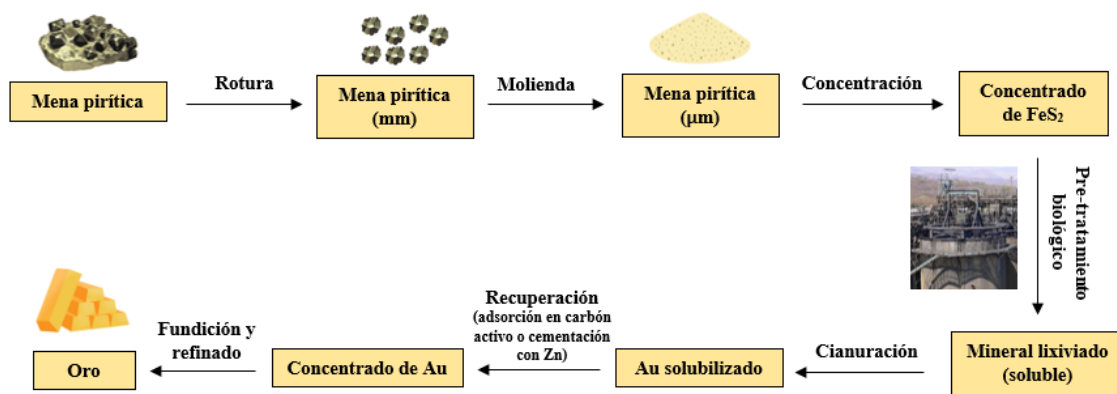


Figura 5. Esquema integrado de la obtención de oro a partir de menas piríticas refractarias con etapa de pre-tratamiento biológico.

4. Biohidrometalurgia del oro

4.1. Biohidrometalurgia

La biohidrometalurgia es una rama de la hidrometalurgia que se basa en la actividad de los microorganismos para la recuperación de metales a partir de menas, concentrados y materiales reciclados (Kaksonen et al., 2018).

La aplicación industrial de la biohidrometalurgia se divide en dos tipos de procesos: biolixiviación y biooxidación de minerales. La biolixiviación consiste en la solubilización, a partir de microorganismos, de metales de base como cobre, cinc y níquel desde la fuente mineral. La biooxidación es un procedimiento de biolixiviación, pero que se caracteriza por la liberación de metales preciosos como oro y plata a partir de la acción de microorganismos que oxidan la matriz de sulfuros en la que están atrapados. Los procedimientos de biolixiviación y biooxidación a escala industrial se han dirigido sobre todo a la recuperación de cobre, oro, plata y níquel (C. L. Brierley & Brierley, 2013). Según Gahan et al. (2012) y Roberto (2017), aproximadamente el 10-15% del cobre y el 5% del oro en el mundo son recuperados mediante biolixiviación y biooxidación, respectivamente.

La biolixiviación ocurre de forma natural ocasionando el drenaje ácido de minas (AMD, *Acid Mine Drainage*). El AMD se origina cuando la pirita y otros sulfuros metálicos se oxidan en presencia de aire, agua y microorganismos ferrooxidantes y sulfooxidantes. La oxidación de los sulfuros tiene un gran impacto en el suelo y las aguas de la zona en la que se produce, ya que genera ambientes ácidos con grandes concentraciones de metales disueltos, crítico para muchos seres vivos (Chen et al., 2021). Un ejemplo de AMD se encuentra en la Faja Pirítica Ibérica en ríos como el Tinto y el Odiel (Del Barrio Martín et al., 2019).

En la industria, la biolixiviación y biooxidación se llevan a cabo en reactores de tipo tanque agitado y en pilas. Ambas tecnologías se han usado durante años en la industria minera para el procesamiento químico de metales, pero en la década de los 80 se comenzaron a usar como reactores biológicos (C. L. Brierley & Brierley, 2013).

4.2. Interés de la biohidrometalurgia en la extracción de oro

La extracción de oro a partir de reservas de baja calidad está tomando cada vez más importancia en el sector minero debido a la tendencia decreciente de su concentración en las reservas mundiales (**Figura 2**) y a la creciente demanda. En 2011, la producción de oro de 8 de las 20 empresas más potentes del sector fue a partir de menas metálicas refractarias (Adams, 2016).

Los bioprocesos permiten poner en valor las reservas con una baja concentración de oro, cuyo procesamiento a partir de la metalurgia convencional no es rentable, y las menas refractarias, en las que se requiere la liberación del oro de la matriz insoluble de sulfuros en la que se encuentra (Kaksonen, Perrot, et al., 2014).

Como se muestra en el **apartado 3.3.**, la biohidrometalurgia se aplica en la minería de oro como un tratamiento oxidativo en el que el metal se libera de la matriz de sulfuros para ser accesible al cianuro en su posterior extracción. Diversos estudios demuestran el aumento de la extracción de oro tras un pre-tratamiento biológico. Desde la investigación básica desarrollada en la década de los 90 se han obtenido resultados muy satisfactorios. Según un estudio de Iglesias et al. (1998), la extracción de oro por cianuración a partir de pirita aumentó desde un 30% (sin procesamiento previo) hasta un 95% empleando una etapa de biooxidación previa a la extracción. Gracias a este tipo de experiencias se han podido desarrollar plantas industriales en las que se emplean bioprocesos para la solubilización de oro. Por ejemplo, en la planta industrial de la mina Wiluna (Australia), la recuperación de oro mejora desde un 27% hasta un 98% con el empleo de la tecnología BIOXTM (se tratará en el **apartado 6**) (van Aswegen et al., 2007). La operación de este tipo de plantas industriales a lo largo de los años reafirma y consolida la utilidad de los bioprocesos en la minería.

El coste de capital asociado con la instalación y operación de algunos tratamientos de biolixiviación en pilas es sobre un 50% menor que los asociados a los métodos de tostación convencionales (Pradhan et al., 2008). Estos bioprocesos no sólo son operaciones más económicas, sino que tienen un impacto ambiental mucho menor. Operan a presión atmosférica y a temperaturas relativamente bajas, por lo que no necesitan grandes suministros de energía. Además, son procesos que no requieren la adición de compuestos tóxicos y no producen emisiones de polvos y gases contaminantes (Karthikeyan et al., 2015).

Los microorganismos operan en un entorno delimitado y controlado, por lo que no se generan problemas ambientales relacionados con el AMD. Además, el uso de extremófilos tiene la ventaja adicional de que no es necesaria la operación en condiciones asépticas, lo que encarecería el proceso.

4.3. Microorganismos en biolixiviación

Durante la biolixiviación se solubilizan sulfuros metálicos insolubles en ambientes muy ácidos y con altas concentraciones de hierro soluble. Estos ambientes, bien provocados por fenómenos naturales o por actividad antropogénica, son inhóspitos para la mayoría de los microorganismos. Sin embargo, existe una gran biodiversidad de microorganismos acidófilos que poseen los mecanismos de adaptación necesarios para ser capaces de sobrevivir en este tipo de ambientes extremos, principalmente bacterias (Zhao et al., 2021).

Los microorganismos acidófilos abarcan un rango amplio de temperaturas, existiendo mesófilos y termófilos. Los organismos mesófilos son los pioneros en biominería, llevan años usándose a escala industrial para la biooxidación de menas piríticas auríferas y para la biolixiviación de menas refractarias de cobre (Clark et al., 2006a). Algunos microorganismos termófilos presentan altas tasas de oxidación de sulfuros, incluso superiores a la de organismos mesófilos (Clark et al., 2006b). Sin embargo, su empleo a escala industrial en tanques agitados se encuentra aún en desarrollo, dado que existen factores que dificultan el proceso como la sensibilidad de la pared celular a altas densidades de pulpa y una menor tolerancia a las concentraciones de metales en comparación con mesófilos (Sajjad et al., 2019).

Los microorganismos más usados en operaciones industriales de biolixiviación son las bacterias ferrooxidantes del género *Leptospirillum* *L. ferriphilum* y *L. ferrooxidans* y las bacterias del género *Acidithiobacillus* *A. thiooxidans* (sulfooxidante) y *A. ferrooxidans* (ferro- y sulfooxidante) (Sajjad et al., 2019).

A. ferrooxidans es la bacteria mejor caracterizada y más usada comercialmente en bioprocesos industriales. Es una bacteria gram negativa, acidófila, mesófila y aerobia. Vive a temperaturas entre 10-47°C, y se encuentra en numerosos hábitats como suelos, agua marina, ceniza volcánica, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y drenajes ácidos de minas. Su capacidad para tolerar compuestos orgánicos e iones

metálicos en una cierta concentración es una de las principales razones para su supervivencia en ambientes extremos (Zhang et al., 2018).

A. ferrooxidans fija CO₂ a través del Ciclo de Calvin y lo usan como única fuente de carbono. Es una bacteria quimiolitotrofa que usa Fe²⁺, S⁰, ácido fórmico y sulfuros inorgánicos reducidos como donadores de electrones y O₂, S⁰ y Fe³⁺ como aceptores de electrones en los procesos de obtención de energía (Osorio et al., 2013).

Un aspecto interesante de esta bacteria es que regula su crecimiento, adaptación al medio y colonización de sustratos a través de quimiotaxis y *quorum sensing*, que toman un papel importante en la biolixiviación. Muestra quimiotaxis positiva ante sustancias beneficiosas como la pirita y evita sustancias peligrosas mediante quimiotaxis negativa. Paralelamente, presenta sistemas de *quorum sensing* que conducen a la síntesis de polímeros extracelulares que median su adhesión al mineral (Zhang et al., 2018).

4.4. Mecanismos de biolixiviación

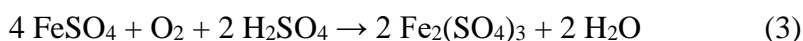
La biolixiviación de sulfuros metálicos se basa en la capacidad de los microorganismos ferro- y sulfooxidantes de oxidar el ion ferroso y sulfuros inorgánicos reducidos, respectivamente, en ambientes ácidos, con el objetivo de obtener energía. La oxidación se produce a partir del transporte de electrones del sulfuro y/o de la porción ferrosa del mineral al oxígeno (aceptor final de electrones) (Sajjad et al., 2019).

Existen tres modelos de mecanismos de biolixiviación: directo, indirecto y cooperativo. En la **Figura 6** se representan esquemáticamente los tres mecanismos propuestos.

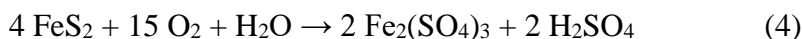
- **Biolixiviación directa**

La biolixiviación directa se basa en una transferencia electrónica directa desde el sulfuro metálico a la célula. Para ello, las células han de estar en contacto físico con el mineral. Los microorganismos se adhieren a la superficie del mineral formando una biopelícula con la ayuda de exopolisacáridos que excretan para ello (Sajjad et al., 2019).

Siguiendo este mecanismo, la pirita se oxida y se forma sulfato férrico a partir de las siguientes reacciones (Sajjad et al., 2019):



La reacción neta de oxidación directa de la pirita por vía biológica, obtenida a partir de las ecuaciones (3) y (4), es la siguiente:



La transferencia directa de electrones entre los sulfuros metálicos y las células adheridas no ha sido demostrada empíricamente, por lo que este mecanismo se encuentra aún en discusión (Schippers et al., 2014).

- **Biolixiviación indirecta**

La biolixiviación indirecta está mediada por la generación de ion férrico (Fe^{3+}) por parte de bacterias ferrooxidantes, que oxidan el ion ferroso (Fe^{2+}) presente en los sulfuros metálicos. El Fe^{3+} generado se excreta y oxida a los sulfuros metálicos, reduciéndose a Fe^{2+} . La reacción (5) muestra la oxidación de la pirita a partir del mecanismo indirecto de biolixiviación (Iglesias et al., 1998; Mishra et al., 2005):



En este mecanismo de biolixiviación, el hierro actúa como transportador de electrones y las células plantónicas no tienen por qué estar en contacto con la superficie de los minerales. El Fe^{2+} y el azufre elemental producidos son simultáneamente oxidados por las bacterias a Fe^{3+} y ácido sulfúrico según las reacciones (6) y (7), respectivamente (Iglesias et al., 1998; Mishra et al., 2005):



- **Biolixiviación cooperativa**

La existencia de los modelos de biolixiviación directa e indirecta sigue en discusión por la comunidad científica. El modelo más aceptado en la actualidad es el mecanismo de biolixiviación cooperativa, que integra los aspectos fundamentales de los dos anteriores. La biolixiviación cooperativa se postula como un proceso químico integrado en el que los microorganismos establecen relaciones sinérgicas. Las células plantónicas producen el Fe^{3+} , agente químico esencial para la lixiviación de la pirita, y las bacterias adheridas a la superficie del mineral proporcionan el compartimento de reacción de la capa de exopolisacáridos (Mahmoud et al., 2017; Mishra et al., 2005).

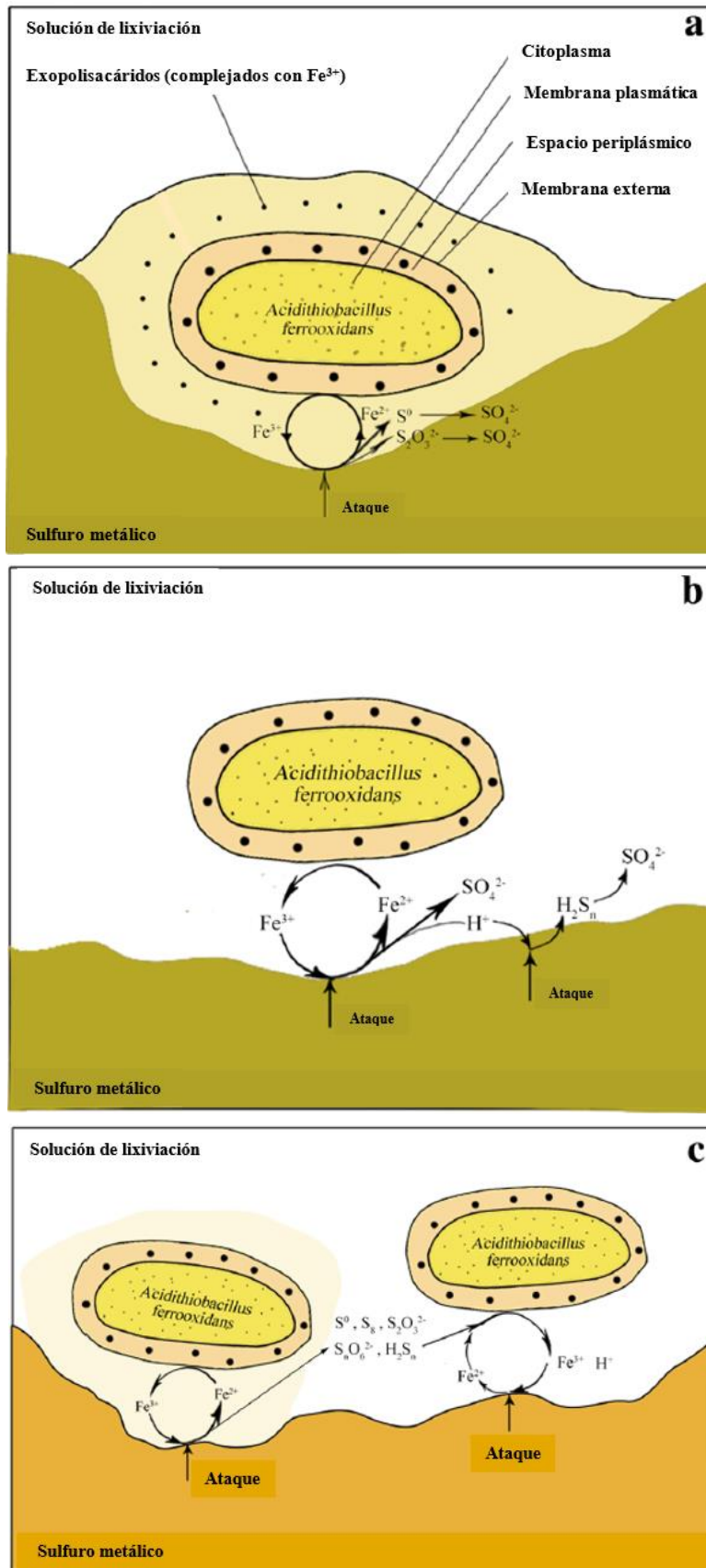


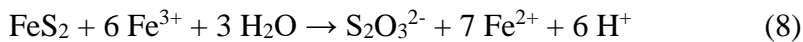
Figura 6. Mecanismos de biolixiviación. a: biolixiviación directa; **b:** biolixiviación indirecta; **c:** biolixiviación cooperativa. *Adaptado de Zhang et al. (2018).*

4.5. Vías de biolixiviación

Los mecanismos de biolixiviación describen las interacciones entre las células y los sulfuros metálicos. Sin embargo, no proporcionan información sobre los mecanismos químicos a través de los que se produce la solubilización del mineral (Schippers et al., 2014).

La oxidación de los sulfuros metálicos se produce a través de dos vías distintas: la vía del tiosulfato y la vía de los polisulfuros. Su nombre se debe a los intermediarios de azufre formados durante el proceso, que dependen de la mineralogía y de las condiciones del medio, sobre todo del pH y la presencia de diferentes oxidantes. Estos mecanismos explican la presencia de sulfuros inorgánicos en los ambientes de biolixiviación (Schippers et al., 2014).

Los sulfuros metálicos resistentes al ataque de protones como la pirita siguen la vía oxidativa del tiosulfato (**Figura 7**). El ion férrico, en presencia de agua, oxida a la parte sulfúrica de la pirita, dando un grupo ácido sulfónico. Esta transformación provoca la rotura de los enlaces entre el hierro y los dos átomos de azufre, formándose Fe^{2+} e iones de tiosulfato, primer intermediario sulfúrico soluble (8). Finalmente, tras varias reacciones de transferencia de electrones, el tiosulfato se oxida dando lugar a sulfato (9) (Vera et al., 2022).



Los sulfuros metálicos ácido-solubles como la blenda, ZnS , siguen la vía de oxidativa de los polisulfuros. Sin embargo, estos compuestos no toman lugar en los procedimientos de obtención de oro (Schippers et al., 2014).

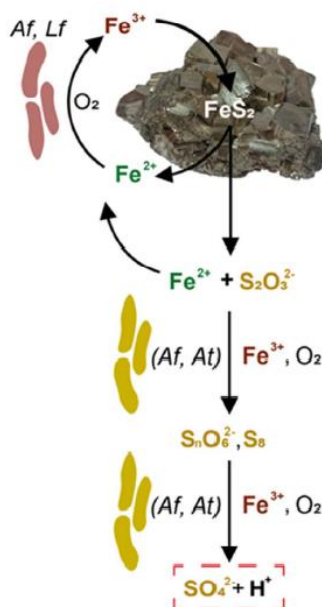


Figura 7. Solubilización de pirita por la vía del tiosulfato. Af: *A. ferrooxidans*; Lf: *L. ferrooxidans*; At: *A. thiooxidans*. Fuente: Vera et al. (2022).

5. Factores que afectan a la biolixiviación

La biolixiviación se basa en el uso de microorganismos, por lo que se ve afectada por factores fisicoquímicos, ambientales y biológicos. Así, deben existir unas condiciones óptimas para el metabolismo bacteriano de forma que se puedan lograr altos rendimientos en los bioprocesos industriales.

Los factores que afectan en mayor medida a la biolixiviación son: pH, temperatura, nutrientes, oxígeno, dióxido de carbono, sustancias tóxicas y características del sustrato (Sajjad et al., 2019).

5.1. pH

El pH es uno de los factores que más afecta en los procesos de biolixiviación, ya que tiene una gran influencia en el metabolismo bacteriano. Las bacterias necesitan vivir a un pH óptimo para su crecimiento, que varía según la especie y el sistema. Además, el pH es importante para la solubilización de los metales, que son mayoritariamente solubles en medio ácidos (Sajjad et al., 2019).

En los procesos de biooxidación de sulfuros participan organismos acidófilos. Generalmente, estos microorganismos son incapaces de crecer a valores de pH por encima

de 3, mientras que valores de pH menores a 1 empiezan a ser dañinos, peligrando su supervivencia (Sajjad et al., 2019).

Las bacterias del género *Leptospirillum* se ven favorecidas a pH más bajos, mientras que el crecimiento de *A. thiooxidans* es muy bajo a pH 0,5-1 y la actividad oxidativa de *A. ferrooxidans* se inhibe a valores de pH superiores a 2 (van Aswegen et al., 2007). Así, es necesario controlar exhaustivamente el pH y mantenerlo en un rango que permita un balance de bacterias óptimo para la tasa de oxidación. El rango de pH óptimo para lograrlo comprende valores de 1,2-1,8 (Kaksonen, Mudunuru, et al., 2014).

5.2. Temperatura

La diversidad microbiana se ve alterada con cambios en la temperatura del medio, ya que el rango óptimo de crecimiento depende de los microorganismos. Conforme va disminuyendo la temperatura y se va alejando de los rangos óptimos de crecimiento, las células se van inactivando. Por su parte, cuando se producen grandes aumentos que superan los límites de tolerancia, se produce la muerte celular (Sajjad et al., 2019).

Las bacterias usadas en las operaciones de biooxidación de sulfuros son mesófilas, y suelen a temperaturas entre 30 – 45°C (C. L. Brierley & Brierley, 2013). A mayores temperaturas, la cinética de la reacción mejora, pero si se sobrepasan los límites de tolerancia la actividad mesófila disminuye. Así, en los procedimientos industriales ha de ajustarse la temperatura de manera que las condiciones para el crecimiento microbiano y la cinética de la reacción sean constantes y óptimas. Hay que tener en cuenta que la oxidación de los sulfuros metálicos es un proceso exotérmico, por lo que es esencial mantener el control de la temperatura mediante intercambiadores de calor integrados en los biorreactores (Sajjad et al., 2019).

5.3. Nutrientes

Los nutrientes son necesarios para el metabolismo celular y la síntesis de biomoléculas. En biolixiviación, la mayoría de los microorganismos son quimiolitotrofos, obtienen energía de la oxidación del ion ferroso y de los sulfuros inorgánicos reducidos presentes en los minerales (Sajjad et al., 2019). Para un crecimiento óptimo, además del mineral se suelen añadir algunas sales inorgánicas al medio de cultivo con nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos (van Aswegen et al., 2007).

El medio de cultivo usado tradicionalmente para el crecimiento de *A.ferrooxidans* es el medio 9k, desarrollado por Silverman y Lundgreen, cuya composición es la siguiente: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 3,0 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ 0.5 g/L, K_2HPO_4 0.5 g/L, KCl 0.1g/L, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0.01 g/L y $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ 44.78 g/L (Silverman & Lundgren, 1959).

5.4. Oxígeno (O_2)

Los microorganismos usados en la biooxidación de la pirita son aerobios, por lo que necesitan un suministro adecuado de O_2 para que exista un crecimiento óptimo. Además, la oxidación del ferroso y del sulfuro requiere de la presencia de O_2 (Sajjad et al., 2019). Debido a su baja solubilidad en agua, el licor no contiene *per se* la cantidad de O_2 necesaria para llevar a cabo el proceso, por lo que debe existir un suministro continuo en los biorreactores, normalmente una corriente de aire inyectada en forma de burbujas (van Aswegen et al., 2007).

5.5. Dióxido de carbono (CO_2)

La mayoría de los microorganismos usados comercialmente en biohidrometalurgia son autótrofos, usan CO_2 como fuente de carbono, por lo que un suministro deficiente podría ser un aspecto crítico para la operación (Sajjad et al., 2019).

Para asegurar que existe una concentración de CO_2 suficiente para promover el crecimiento bacteriano, la pulpa requiere un contenido mínimo de carbonato del 2% (Kaksonen et al., 2014). Normalmente la aireación y los carbonatos presentes en el mineral proporcionan suficiente fuente de carbono para cumplir con los requerimientos de los microorganismos. Si no es así, se puede suplementar el medio con CaCO_3 (van Aswegen et al., 2007).

Desde el punto de vista medioambiental, esto es una ventaja adicional, ya que los biorreactores de biolixiviación son sumideros de CO_2 , principal gas de efecto invernadero.

5.6. Sustancias tóxicas

Las bacterias ferro y sulfooxidantes son resistentes a altas concentraciones de metales tales como Al, Zn, Cu, Co y Cr; sin embargo, algunos iones metálicos como U, Ag, Cd, As, Hg, Pb, son más tóxicos para ellas, por lo que altas concentraciones pueden inhibir el crecimiento celular. Sin embargo, el rango de concentraciones suele estar por

debajo de los umbrales máximos. Por ejemplo, la máxima concentración de As tolerable por estos microorganismos es de 15-20 g/L, que es muy alta en comparación con las usuales en los licores fértiles obtenidos en biolixiviación (van Aswegen et al., 2007).

Además, algunos agentes químicos empleados en las plantas industriales pueden resultar tóxicos para las bacterias. Los microorganismos son muy sensibles a cianuro y a ciertas grasas, detergentes y floculantes (van Aswegen et al., 2007).

5.7. Características del sustrato

El tamaño del sustrato es un parámetro que influye en los procesos de biolixiviación. A menores tamaños de partícula, aumenta la superficie de contacto del mineral con los agentes oxidantes, lo que deriva en un mayor rendimiento en la tasa de oxidación de los sulfuros. Una alta densidad de pulpa también conlleva un aumento de la superficie de contacto entre el mineral y el agente oxidante. Sin embargo, la densidad del licor en los procesos industriales no es muy alta porque complicaría la aireación del biorreactor (Sajjad et al., 2019).

La composición mineralógica del sustrato también es de suma importancia para la tasa de biolixiviación, que se ve favorecida cuando las menas presentan formas ácido-solubles de los metales y cuando el material presenta una alta porosidad, favoreciendo la entrada de la disolución lixivante al seno de éste (Pradhan et al., 2008).

6. Procedimientos actuales de producción de oro

La primera planta industrial de pre-tratamiento biológico de menas de oro refractarias fue construida en 1986 en la mina Fairview, Sudáfrica (**Figura 8**). El desarrollo satisfactorio de esta planta, en la que se emplea tecnología BIOXTM, ha conducido a la expansión de las operaciones de biolixiviación por muchos países del mundo (Kaksonen, Mudunuru, et al., 2014). La simplicidad de operación, bajo impacto y rentabilidad de BIOXTM se refleja en el número de plantas industriales que continúan empleando esta exitosa tecnología basada en el uso de reactores de tanque agitado para la biooxidación de sulfuros metálicos. Además, la capacidad de procesamiento de estas plantas industriales está en continuo crecimiento (C. L. Brierley & Brierley, 2013).



Figura 8. Planta industrial de pre-tratamiento biológico en Fairview, Sudáfrica. Fuente: Kaksonen, Mudunuru, et al. (2014).

Una típica planta industrial en la que se emplea la tecnología BIOXTM consta de 6 biorreactores de tipo tanque agitado de iguales dimensiones que operan en continuo, configurados como 3 tanques primarios operando en paralelo seguidos de otros 3 secundarios que operan en serie con los anteriores (van Aswegen et al., 2007). El tiempo de residencia de la pulpa en los biorreactores suele ser de unos 4-6 días, dependiendo de la tasa de oxidación alcanzada, la cantidad de sulfuros presente y la composición de minerales del concentrado (Kaksonen, Mudunuru, et al., 2014).

Antes de dirigirse al interior de los tanques primarios, la corriente de alimentación se diluye hasta tener un 15-20% de concentración de sólidos (C. L. Brierley & Brierley, 2013). En estos biorreactores se emplea una parte considerable del tiempo de residencia, ya que al principio la velocidad de crecimiento de los microorganismos es baja y podría producirse el fenómeno de lavado. La población microbiana se consolida en esta parte del proceso. En los tanques secundarios se completa la biooxidación de los sulfuros, siendo menor el tiempo de residencia (van Aswegen et al., 2007).

Se utilizan cultivos mixtos de *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans* y *L. ferrooxidans*. La composición de la población está influenciada principalmente por la temperatura y el pH del medio de cultivo (van Aswegen et al., 2007).

La oxidación de la pirita produce ácidos, mientras que la disolución de minerales carbonatados genera alcalinidad. Para contrarrestar las fluctuaciones de pH y mantenerlo en el rango óptimo se usan CaCO_3 y H_2SO_4 para alcalinizar y acidificar el caldo de cultivo, respectivamente (van Aswegen et al., 2007).

La operación se realiza a temperaturas entre 40-45°C, a las que se alcanzan las mayores tasas de oxidación de sulfuros. La oxidación es un proceso exotérmico por lo que, para mantener la temperatura en el interior del biorreactor, se usan intercambiadores de calor de tipo serpentín por los que circula agua fría. El fluido refrigerante pasa posteriormente por columnas de refrigeración para retirar el calor absorbido mediante evaporación (van Aswegen et al., 2007).

El CO₂ se obtiene principalmente del aire suministrado al biorreactor y de los carbonatos presentes en las minerales. Si no se cubren estos requerimientos, es necesario suplementar los tanques primarios con caliza (CaCO₃) o con aire enriquecido en CO₂ (van Aswegen et al., 2007).

La aireación supone uno de los mayores costes de operación en una planta comercial ya que el suministro de O₂ es muy importante para la población microbiana. Es necesario mantener en todo momento una concentración de oxígeno disuelto superior a 2 mg/L en el interior de los tanques. Para ello, se inyecta aire a baja presión por la parte inferior de los tanques (van Aswegen et al., 2007).

El siguiente paso en el proceso de la obtención de oro es la cianuración del efluente líquido que sale de los tanques secundarios (**Figura 5**). Normalmente, antes de la cianuración, el concentrado se somete a un circuito de decantación en tres etapas. En este circuito se aplican una serie de lavados para retirar el hierro disuelto y así promover la recuperación de oro y disminuir el consumo de NaCN (Kaksonen, Mudunuru, et al., 2014).

En la **Figura 9** se representa de forma esquemática y simplificada la tecnología BIOXTM empleada en la etapa de pre-tratamiento biológico del concentrado de mineral refractario de la mina de Fairview. En esta planta industrial, se ha modificado la configuración estándar de los biorreactores con la implementación de tanques terciarios que aumentan el tiempo de residencia y con ello las tasas de biooxidación (van Aswegen et al., 2007).

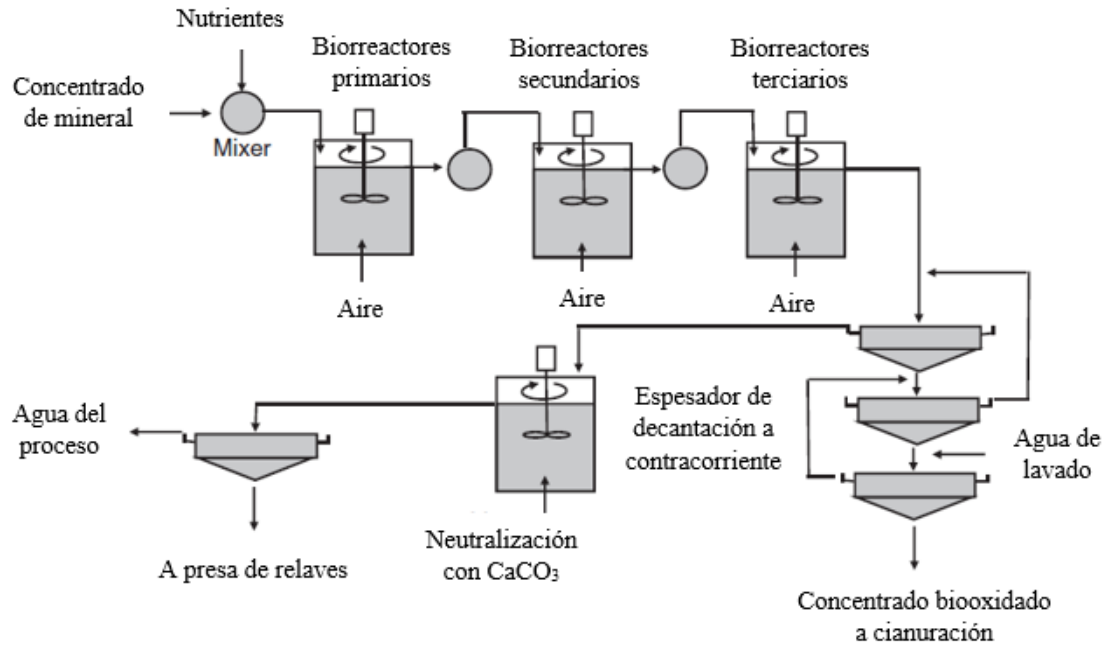


Figura 9. Tecnología BIOX™ en la planta industrial de Fairview, Sudáfrica. *Adaptado de Kaksonen, Mudunuru, et al. (2014).*

La biolixiviación en tanques agitados permite alcanzar grandes tasas de recuperación de oro a partir de menas refractarias ya que se controlan exhaustivamente los parámetros fundamentales que afectan a la biolixiviación (van Aswegen et al., 2007). Sin embargo, cuando la concentración de oro en el mineral es demasiado baja, la mineralogía es muy compleja o el proyecto cuenta con recursos económicos limitados, los altos costes de operación de los biorreactores de tipo tanque agitado generan la necesidad de aplicar diferentes tecnologías para llevar a cabo los bioprocesos. En estas situaciones toma protagonismo la biolixiviación en pilas, con la que se consiguen extracciones más pobres pero que son compensadas con los bajos costes de capital y operación (J. A. Brierley & Brierley, 2001).

En la mina Agnes, en Sudáfrica, se aplica la tecnología GEOCOAT™ para la oxidación biológica de menas refractarias (**Figura 10**). Se emplean cultivos mixtos de los microorganismos implicados típicamente en biolixiviación, al igual que en la tecnología BIOX™ (Harvey & Bath, 2007).

En la tecnología GEOCOAT™, también usada para la biolixiviación de metales primarios como el cobre, el concentrado se recubre con un material de soporte (rocas inertes trituradas) y se apila en una lona impermeable. El tamaño del material de soporte suele ser de 6-25 mm de diámetro, permitiendo que el concentrado forme una capa de

menos de 0,5 mm de espesor en las superficies rocosas. La uniformidad en el tamaño del soporte permite la existencia de grandes espacios dentro de la pila, ofreciendo muy baja resistencia al flujo (Harvey & Bath, 2007).



Figura 10. Pila de pre-tratamiento biológico en Agnes, Sudáfrica. Fuente: Kaksonen, Mudunuru, et al. (2014).

Los grandes espacios existentes combinados con la fina capa de concentrado que se forma alrededor de las rocas de soporte crean unas condiciones adecuadas para la acción de los microorganismos. El aire se introduce a baja presión por la parte inferior de la estructura para suplir la demanda de O_2 y CO_2 y para controlar la liberación del calor producido por las reacciones biológicas. Por la parte superior se rocía una disolución acuosa con los nutrientes necesarios para un óptimo crecimiento de los microorganismos (Harvey & Bath, 2007).

La oxidación finaliza en un período de 60-120 días, a diferencia de los 4-5 días que reside la pulpa en los tanques agitados. Una vez concluida, el concentrado se separa de las rocas portadoras, se lava y se somete a cianuración para la solubilización del oro (Kaksonen, Mudunuru, et al., 2014). En la **Figura 11** se muestra un esquema de la tecnología GEOCOAT™ empleada en Agnes.

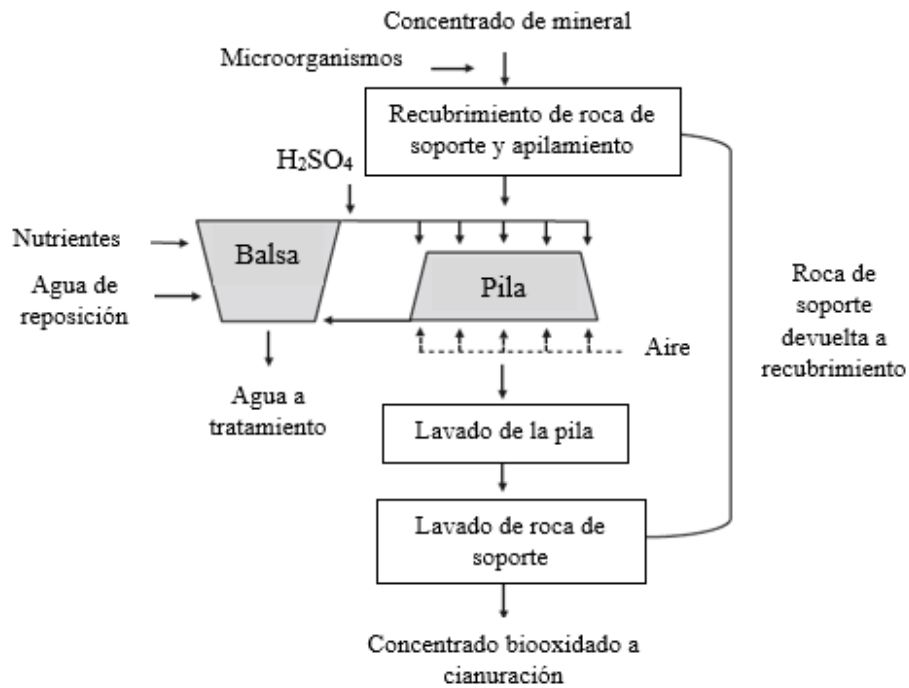


Figura 11. Tecnología GEOCOAT™ en la planta industrial de Agnes, Sudáfrica. *Adaptado de Kaksonen, Mudunuru, et al. (2014).*

En Gold Quarry Mine, Nevada, se emplea otra tecnología de pre-tratamiento biológico en pilas, denominada BIOPRO™. En esta tecnología, empleada para el tratamiento de minerales de muy baja calidad, los minerales no pasan por una etapa de concentración, sino que se rompen hasta llevarlos a tamaños de unos 12 mm de diámetro y directamente se depositan en la pila para que los microorganismos catalicen el proceso oxidativo. En estos procesos las tasas de oxidación son bajas; tras ciclos de 100-150 días, se logra la oxidación del 30-50% de los sulfuros (Logan et al., 2007).

En la **Tabla 1** se muestran las principales plantas industriales en las que se emplean pre-tratamientos biológicos para la obtención de oro.

| Planta | Localización | Tecnología | Capacidad de tratamiento (t/día) |
|------------------|--------------|-----------------|----------------------------------|
| Fairview | Sudáfrica | Reactor (BIOX™) | 55 |
| São Bento | Brasil | Reactor (BIOX™) | 380 |
| Wiluna | Australia | Reactor (BIOX™) | 158 |
| Ashanti-Shansu | Ghana | Reactor (BIOX™) | 960 |
| Coricancha | Perú | Reactor (BIOX™) | 60 |
| Suzdal | Kazajistán | Reactor (BIOX™) | 196 |
| Fosterville | Australia | Reactor (BIOX™) | 211 |
| Bogoso | Ghana | Reactor (BIOX™) | 750 |
| Jinfeng | China | Reactor (BIOX™) | 790 |
| Kokpatas | Uzbekistán | Reactor (BIOX™) | 1069 |
| Gold Quarry Mine | USA | Pila (BIOPRO™) | 10400 |
| Agnes | Sudáfrica | Pila (GEOCOAT™) | 50 |

Tabla 1. Principales plantas industriales de obtención de oro por vía biotecnológica. Fuente: Harvey & Bath (2007); Logan et al. (2007); van Aswegen et al. (2007).

7. Conclusiones

El aumento del uso de metales, provocado en gran parte por el desarrollo tecnológico, ha desencadenado un panorama en el que existen altas demandas que en un futuro cercano no podrán ser cubiertas si continúa la aplicación de las tecnologías mineras convencionales. La disminución de la calidad de las minas genera la necesidad de buscar alternativas. La biohidrometalurgia ha supuesto una revolución en el sector, aunque aún queda mucho camino por recorrer.

Los procedimientos biohidrometalúrgicos son tecnologías limpias que permiten valorizar residuos y minerales de baja calidad mediante el uso de los mecanismos que ofrece la propia naturaleza, en los que los protagonistas son los microorganismos. A diferencia de los métodos tradicionales, los bioprocesos se dan a bajas temperaturas y presiones y no generan emisiones contaminantes, por lo que son ventajosos en un contexto de sostenibilidad, circularidad y disminución de la emisión de gases de efecto invernadero.

El exitoso desarrollo de plantas industriales en las que se emplean pre-tratamientos biológicos de oxidación de sulfuros para la obtención de oro y biolixiviación de cobre y otros metales primarios demuestra la viabilidad de las técnicas biohidrometalúrgicas en el procesamiento de minerales refractarios. Además, la biotecnología tiene otros frentes abiertos que están en fase de desarrollo. En los procedimientos de obtención de metales, se están probando sustancias lixiviantes de origen biológico alternativas a las sales de cianuro como ácidos orgánicos o cianuro producido por microorganismos heterótrofos (Kaksonen et al., 2018). También se están ensayando procedimientos biológicos de valorización de residuos como la extracción de metales de escorias y desechos electrónicos (Kaksonen, Perrot, et al., 2014). Así, la biotecnología está ofreciendo a la minería la posibilidad de acercarse a una actividad industrial sostenible.

8. Referencias

- Adams, M. D. (2016). Overview of the Gold Mining Industry and Major Gold Deposits. En *Gold Ore Processing* (pp. 25-30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00002-5>
- Brierley, C. L., & Brierley, J. A. (2013). Progress in bioleaching: Part B: Applications of microbial processes by the minerals industries. En *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 97, Número 17, pp. 7543-7552). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5095-3>
- Brierley, J. A., & Brierley, C. L. (2001). Present and future commercial applications of biohydrometallurgy. En *Hydrometallurgy* (Vol. 59). www.elsevier.nl/locate/hydromet
- Chen, G., Ye, Y., Yao, N., Hu, N., Zhang, J., & Huang, Y. (2021). A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 329). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129666>
- Clark, M. E., Batty, J. D., van Buuren, C. B., Dew, D. W., & Eamon, M. A. (2006a). Biotechnology in minerals processing: Technological breakthroughs creating value. *Hydrometallurgy*, 83(1-4), 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.046>
- Clark, M. E., Batty, J. D., van Buuren, C. B., Dew, D. W., & Eamon, M. A. (2006b). Biotechnology in minerals processing: Technological breakthroughs creating value. *Hydrometallurgy*, 83(1-4), 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.046>
- Del Barrio Martín, S., Orió, R. M., & Sánchez, A. (2019). Gold production from refractory minerals in the pyritic belt. *Boletín Geológico y Minero*, 130(2), 341-359. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.2.007>
- Deschênes, G. (2016). Advances in the Cyanidation of Gold. En *Gold Ore Processing* (pp. 429-445). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63658-4.00026-8>
- Gahan, C. S., & Kim, D. J. (2012). *Biohydrometallurgy and Biomineral Processing Technology: A Review on its Past, Present and Future Removal and Recovery of Mercury from Waste Fluorescent Lamps View project Innovative Biohydrometallurgical approach to recover metal values from petroleum refinery spent catalyst View project*. www.isca.in
- Harvey, T. J., & Bath, M. (2007). The GeoBiotics GEOCOAT® Technology – Progress and Challenges. En *Biomining* (pp. 97-112). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34911-2_5
- Iglesias, N., Carranza, F., & Palencia, I. (1998). *La biolixiviación como pretratamiento de menas auríferas refractarias en matriz de sulfuros*. <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>
- Iglesias, N., & Carranza, F. (1994). Refractory gold-bearing ores: a review of treatment methods and recent advances in biotechnological techniques. En *Hydrometallurgy* (Vol. 34).
- Kaksonen, A. H., Boxall, N. J., Gumulya, Y., Khaleque, H. N., Morris, C., Bohu, T., Cheng, K. Y., Usher, K. M., & Lakaniemi, A. M. (2018). Recent progress in biohydrometallurgy and microbial characterisation. *Hydrometallurgy*, 180, 7-25. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.06.018>

- Kaksonen, A. H., Mudunuru, B. M., & Hackl, R. (2014). The role of microorganisms in gold processing and recovery - A review. *Hydrometallurgy*, *142*, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.008>
- Kaksonen, A. H., Perrot, F., Morris, C., Rea, S., Benvie, B., Austin, P., & Hackl, R. (2014). Evaluation of submerged bio-oxidation concept for refractory gold ores. *Hydrometallurgy*, *141*, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.10.012>
- Karthikeyan, O. P., Rajasekar, A., & Balasubramanian, R. (2015). Bio-oxidation and biocyanidation of refractory mineral ores for gold extraction: A review. En *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 45, Número 15, pp. 1611-1643). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.966423>
- Kunter, R., & Mridha, S. (2016). Gold: Alloying, Properties, and Applications. En *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02581-9>
- Logan, T. C., Seal, T., & Brierley, J. A. (2007). Whole-Ore Heap Biooxidation of Sulfidic Gold-Bearing Ores. En *Biomining* (pp. 113-138). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34911-2_6
- Lunt, D., & Weeks, T. (2016). Process Flowsheet Selection. En *Gold Ore Processing* (pp. 113-129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63658-4.00007-4>
- Mahmoud, A., Cézac, P., Hoadley, A. F. A., Contamine, F., & D'Hugues, P. (2017). A review of sulfide minerals microbially assisted leaching in stirred tank reactors. En *International Biodeterioration and Biodegradation* (Vol. 119, pp. 118-146). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.015>
- Marsden, J. O., & House, C. I. (2006). Ore Deposits and Process Mineralogy. En *The Chemistry of Gold Extraction, Second Edition*.
- Mineral Commodity Summaries 2023*. (2023). <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
- Mishra, D., Kim, D.-J., Ahn, J.-G., & Rhee, Y.-H. (2005). Bioleaching: A microbial process of metal recovery; A review. *Metals and Materials International*, *11*(3), 249-256. <https://doi.org/10.1007/BF03027450>
- Mudd, G. M., Monash University. Department of Civil Engineering., & Mineral Policy Institute. (2007). *The sustainability of mining in Australia : key production trends and their environmental implications for the future : research report*. Department of Civil Engineering, Monash University.
- Osorio, H., Mangold, S., Denis, Y., Yáñez, I., Esparza, M., Johnson, D. B., Bonnefoy, V., Dopson, M., & Holmes, D. S. (2013). Anaerobic Sulfur Metabolism Coupled to Dissimilatory Iron Reduction in the Extremophile Acidithiobacillus ferrooxidans. *Applied and Environmental Microbiology*, *79*(7), 2172-2181. <https://doi.org/10.1128/AEM.03057-12>
- Parga, J. R., & Carrillo, F. R. (1996a). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. *Revista de Metalurgia*, *32*(4), 254-261. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1996.v32.i4.907>
- Parga, J. R., & Carrillo, F. R. (1996b). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. *Revista de Metalurgia*, *32*(4), 254-261. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1996.v32.i4.907>

- Pradhan, N., Nathsarma, K. C., Srinivasa Rao, K., Sukla, L. B., & Mishra, B. K. (2008). Heap bioleaching of chalcopyrite: A review. *Minerals Engineering*, 21(5), 355-365. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.10.018>
- Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., & Behrisch, J. (2012). Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change*, 22(3), 577-587. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009>
- Roberto, F. F. (2017). Copper Heap Bioleach Microbiology - Progress and Challenges. *Solid State Phenomena*, 262, 250-254. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.262.250>
- Sajjad, W., Zheng, G., Din, G., Ma, X., Rafiq, M., & Xu, W. (2019). Metals Extraction from Sulfide Ores with Microorganisms: The Bioleaching Technology and Recent Developments. En *Transactions of the Indian Institute of Metals* (Vol. 72, Número 3, pp. 559-579). Springer. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1516-4>
- Schippers, A., Glombitza, F., & Sand, W. (2014). *Geobiotechnology I Metal-related Issues*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54710-2>
- Silverman, M. P., & Lundgren, D. G. (1959). STUDIES ON THE CHEMOAUTOTROPHIC IRON BACTERIUM *FERROBACILLUS FERROOXIDANS*. *Journal of Bacteriology*, 77(5), 642-647. <https://doi.org/10.1128/jb.77.5.642-647.1959>
- Sverdrup, H., Koca, D., & Granath, C. (2013). *Modelling the gold market, explaining the past and assessing the physical and economical sustainability of future scenarios I*. www.guldcentralen.se
- van Aswegen, P. C., van Niekerk, J., & Olivier, W. (2007). The BIOX™ Process for the Treatment of Refractory Gold Concentrates. En *Biomining* (pp. 1-33). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34911-2_1
- Vera, M., Schippers, A., Hedrich, S., & Sand, W. (2022). Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation – part A. En *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 106, Número 21, pp. 6933-6952). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12168-7>
- World Gold Council. (2023, Mayo). <https://www.gold.org/goldhub/data/gold-prices>
- Yannopoulos, J. C. (1991). Physical and Chemical Properties of Gold. En *The Extractive Metallurgy of Gold* (pp. 11-23). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0_2
- Zhang, S., Yan, L., Xing, W., Chen, P., Zhang, Y., & Wang, W. (2018). Acidithiobacillus ferrooxidans and its potential application. En *Extremophiles* (Vol. 22, Número 4, pp. 563-579). Springer Tokyo. <https://doi.org/10.1007/s00792-018-1024-9>
- Zhao, H., Yang, C., Zhang, X., Zhang, Y., & Qiu, G. (2021). Microorganisms used in chalcopyrite bioleaching. En *Biohydrometallurgy of Chalcopyrite* (pp. 1-49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821880-8.00001-4>