

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN BACTERIANA A PARTIR DE CEPAS MESÓFILAS Y TERMÓFILAS PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO EN MINERALES REFRACTARIOS DE ALGAMARCA, 2020.

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera de Minas

Autoras:

Vania Malca Neyra

Violeta Elizabeth Arrelusea Osorio

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo, Alvarez León

Cajamarca - Perú

2021



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

DEDICATORIA

A mis padres Mercedes y Alberto, así también a mis hermanas menores Janeth y Katheryn, por su incondicional apoyo y confianza, y por ser esa fuerza que me impulsaba para hacerlo realidad.

Vania.

A mis amados padres María y Valerio, pues sin ellos no lo habría logrado, me inculcaron la responsabilidad, deseo de superación, para poder alcanzar de esta manera mis sueños, a mis hermanos quienes nunca me negaron su apoyo a lo largo de mi formación profesional y sobre todo a mi hija Mia Guadalupe quien es el motivo más grande que me mueve y por la cual lucho cada día por un mejor futuro para ambas. Y agradecer a Dios por concederme lo mejor que tengo en la vida, mi amada familia.

Violeta

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por permitirme llegar hasta este punto de mi carrera y poder realizar este trabajo, también debo agradecer a mis profesores por todos los conocimientos transmitidos los cuales fueron de gran ayuda en la realización de este trabajo y de forma muy especial al Ingeniero Víctor Álvarez León, por su incondicional preocupación y apoyo durante la realización de esta tesis y por ultimo agradezco a mi familia y a mi compañera Violeta por el apoyo incondicional.

Vania

Agradezco infinitamente a mis padres por su apoyo incondicional y por nunca dejarme sola, agradecer sobre todo y de manera muy especial a mi asesor el Ing. Víctor Alvarez León que con sus conocimientos supo guiarme en todo el proceso de tesis concluyendo con éxito, gracias infinitas. Y finalmente agradecer a Dios por darme sabiduría, bendición y la fuerza para seguir luchando por mis sueños.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	7
RESUMEN.....	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	56
CAPÍTULO III. RESULTADOS	63
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS.....	85
ANEXOS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los drenajes ácidos de mina	23
Tabla 2. Bacterias acidófilas de Interés en la Biolixiviación de Metales	27
Tabla 3. Temperaturas para el crecimiento de las cepas	33
Tabla 4. Bacterias asociadas a la oxidación de Minerales.....	34
Tabla 5. Bacterias asociadas la la Lixiviación de Minerales.....	35
Tabla 6. Componentes del medio 9K	36
Tabla 7. Componentes del medio MKM	39
Tabla 8. Tipos de menas de oro y su tratamiento	47
Tabla 9. Factores y Niveles para el Diseño Experimental.....	57
Tabla 10. Análisis químico de la muestra del mineral aurífero refractario	64
Tabla 11. Temperatura de las muestras de las muestras del mineral con bacterias en columnas..	66
Tabla 12. Conentración de Hierro soluble.....	68
Tabla 13. Valores del Potencial de Oxidación-Reducción (Eh).....	70
Tabla 14. Valores del pH en las muestras	72
Tabla 15. Recuperación de oro mediante biooxidación	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de la oxidación, catalizada por la bacteria.	19
Figura 2. Mecanismos directo e indirecto para la solubilización del metal.	22
Figura 3. Formación de aguas acidas de mina.....	25
Figura 4. Ciclo de Existencia de una Colonia de Bacterias.....	26
Figura 5. Micrografía Electrónica de bacterias <i>Sulfobacillus Acidophilus</i> donde se observan Endosporas.	31
Figura 6. Diagrama de flujo de recuperación incorporando la pre - oxidación biológica.....	42
Figura 7. Columna de Lixiviación.....	45
Figura 8. Clasificación de Refratariedad de Menas de Oro.....	49
Figura 9. Esquema que representa la liberación de la Plata y el Oro	50
Figura 10. Localización de la Minera Algamarca.	63
Figura 11. Recuperación de oro vs. oxidación de sulfuros.....	65
Figura 12. Temperaturas de las muestras del mineral con bacterias en las columnas.....	67
Figura 13. Concentración de hierro.....	69
Figura 14. Valores del Eh en las muestras.	71
Figura 15. Valores del pH.	73
Figura 16. Recuperación de oro por biooxidación.	75

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1.</i> Reacción de la T, Ferroxidans para la pirita.....	20
<i>Ecuación 2.</i> Solución de Reacción	20
<i>Ecuación 3.</i> Reacción de la T. Ferroxidans para la calcopirita	20
<i>Ecuación 4.</i> Solución de la ecuación de la Calcopirita.....	20
<i>Ecuación 5.</i> Cambio de azufre en ácido sulfúrico por la acción de la cepa Ferroxidans ..	21
<i>Ecuación 6.</i> Reacción de la lixiviación directa para minerales sulfurados.	21
<i>Ecuación 7.</i> Bacteria Cu	21
<i>Ecuación 8.</i> Bacteria CuFeS	22

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la lixiviación bacteriana a partir de cepas mesófilas y termófilas para la recuperación de oro en minerales refractarios de Algamarca. La investigación fue aplicada, experimental a nivel laboratorio y se trabajó con una muestra consistente en cepas de bacterias mesófilas y termófilas, las cuales están asociadas a la oxidación de minerales auríferos refractarios de la mina Algamarca; el cultivo de estas cepas se utilizaron los medios enriquecedores como el 9k y MKM, siendo estos vitales para la solubilización de los sulfuros presentes en la muestra (pirita). La biooxidación del mineral de oro se realizó mediante lixiviación por columnas, las cuales fueron sometidas a diferentes temperaturas durante un periodo de 100 días que duró el tratamiento. De los resultados obtenidos nos permiten concluir que, a mayor oxidación de los sulfuros, la recuperación del oro será mayor, ya que durante el monitoreo de la biooxidación se obtuvo que, en la prueba de recuperación de oro sin el uso de bacterias, este valor fue muy bajo con un 43%, y conforme vaya aumentando el porcentaje de la biooxidación, la recuperación de oro será incrementada, por lo que a un 60% de la oxidación de sulfuros se obtuvo una recuperación de oro de un 93%. También se concluye que la temperatura, Eh, pH y Fe^{+2} , son parámetros muy importantes en el crecimiento de la población bacteriana y de la oxidación de los sulfuros.

Palabras clave: Biooxidación, cepas, mesófilas, termófilas, Eh, pH, Fe^{+2} , Fe^{+3}

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La minería actual que desarrollan las empresas mineras en el Perú, se basan específicamente en la extracción de minerales sulfurados y oxidados, uno de los minerales es el oro, el cual, al estar íntimamente asociado con sulfuros y arseniuros, son llamados minerales refractarios. Por ello para su recuperación metalúrgica son sometidos a tratamientos piroquímicos de tostación, calcinación y fusión, para lograr la oxidación y reducción de sus componentes; lo que conlleva a problemas de baja recuperación, prolongados periodos de tratamiento, un alto índice de contaminación ambiental, consumo masivo de reactivos químicos, así como altos costos de operación, entre otros. En nuestro caso de estudio, tenemos la minería que se desarrolla en Algamarca, que es un caserío en el cual se viene realizando minería de forma artesanal, con técnicas convencionales de lixiviación con cianuro, recuperándose hasta el 60% del oro, obteniéndose mensualmente un promedio de 120 kilogramos de oro (Idrogo, Mego, Monzón, & Sanchez, 2017).

La baja recuperación se debe a que el oro se encuentra en tamaños gruesos y en otros casos es refractario. Los mineros en la zona tienen un desconocimiento de otras tecnologías que se utilizan como pretratamiento precedente a la cianuración y fundición, como es el caso de la Biolixiviación, la cual facilita la conversión de los compuestos que acompañan al oro en las especies refractarias, de manera que facilitan la liberación de las partículas metálicas de oro, para luego entrar en contacto íntimo con la solución cianurada y ser colectado en un lecho de fusión. (Arias, Coronado, Puente, & Lovera, 2015). Es importante hacer mención que esta tecnología es poco desarrollada en el Perú, por falta del conocimiento que requiere, especialistas e

iniciativa por parte de las empresas, dejando así la posta para venideras investigaciones del tema.

(Rivera, Camejo, Moya, López, & Munguía, 2011) en su investigación Estudio de Biolixiviación de un Mineral de Sulfuros de Cobre de baja ley con Bacterias Tio- y Ferro-oxidantes en Condiciones Termófilas, de la Universidad Nacional Autónoma de México, buscan encontrar cepas bacterianas termófilas capaces de oxidar especies reducidas de hierro y azufre para su aplicación en la lixiviación de minerales de sulfuros de cobre de baja ley, por lo cual para realizar dicho estudio se obtuvieron cultivos a partir de cepas termófilas tio- y ferro-oxidantes nativas de la mina La Caridad (México). El mineral utilizado fue de 0,405 % Cu y 3,669 % Fe., por lo que se prepararon 2 muestras representativas, una con tamaño de partícula menor a 100 micras y otra entre 5/6 y 1/2 pulgada. Para la obtención de las bacterias se consiguieron tres muestras ambientales (una muestra mineral de terrero de lixiviación, una muestra de solución PLS (RGpe), y una muestra de solución de colas (P11)), mediante eutrofización de éstas en medio nutriente Kelly modificado (MKM) enriquecido con Fe(II), de lo cual se obtuvo un mayor crecimiento bacteriano a 70°C que a 50°C, a 50°C, crecieron aproximadamente 10 veces más las bacterias cultivadas con S° como sustrato que las cultivadas con Fe²⁺; y con respecto a la recuperación del mineral con microorganismos termófilos moderados tiooxidantes la extracción alcanzada fue de 8,50% para Cu y 2,85% para Fe y con los microorganismos ferrooxidantes fue de 7,40% para Cu y 15,34% para Fe. Por lo que se concluye que la alta concentración de iones férricos, es de vital importancia para que la lixiviación por medio del mecanismo indirecto se vea favorecido.

(Jaque, 2012) en su investigación de Estudio de la Biolixiviación de Pirita por un Cultivo de *Sulfobacillus acidophilus* a 45°C de la Universidad de Chile, nos menciona que para el estudio de la biolixiviación de pirita se realizaron cultivos puros con la bacteria termófila moderada *Sulfobacillus acidophilus* y experimentos de control sin microorganismos, ambos en matraces agitados a 100 rpm y una temperatura de 45°C, siendo monitoreados periódicamente el pH y Eh. Así mismo, se midieron las concentraciones de ion ferroso y hierro total en solución, se determinó la concentración del ion férrico precipitado como hidróxidos o jarositas y se estimó el azufre disuelto por medio de la medición de sulfato en la solución de lixiviación. En el desarrollo utilizaron cultivos en matraces agitados a 45°C, con una cepa pura de *Sulfobacillus acidophilus* DSMZ 10332, en pirita pura extraída por medio de flotación de relaves de Minera Escondida, con una concentración inicial de ion ferroso de 1 g/L y extracto de levadura como fuente de carbono para su desarrollo. Se monitorearon periódicamente el pH y Eh de los cultivos, se midieron las concentraciones de ion ferroso, hierro total y sulfato en solución, junto con el hierro total y precipitado, tanto en la solución como en la superficie del mineral por medio de digestión con ácido clorhídrico. Junto con lo anterior, se realizó conteo de células planctónicas y células adheridas al mineral por medio de tinción con DAPI y observación en microscopio de Epifluorescencia. En los resultados indicaron que el proceso de biolixiviación de pirita por *Sulfobacillus acidophilus* a 45°C estuvo controlado principalmente por la reacción de lixiviación del mineral, el mecanismo de biolixiviación fue el cooperativo y se requerirían unos 283 días para la completa disolución del mineral. Así mismo, mostraron que esta bacteria termófila moderada posee una alta capacidad hierro-oxidante y de adherencia a la superficie de la pirita, la cual llegó al 72%. Lográndose obtener una recuperación de

hierro del 18,4%, mientras que en un estudio anterior con las bacterias mesófilas *Acidithiobacillus ferrooxidans* y a una temperatura de 30°C, se alcanzó un 23% de recuperación. De esta forma, pese al aumento de la temperatura, en el proceso de biolixiviación por *S. acidophilus* no se obtuvo una mayor disolución del mineral, debido principalmente al alto grado de formación de precipitados de hierro como hidróxidos y/o jarositas, ocasionado por la alta temperatura utilizada y los valores de pH alcanzados durante el proceso. Por lo anterior, se considera que dicha bacteria contribuye a lograr mayores tasas de disolución de pirita, y se recomienda llevar a cabo el proceso a menores valores de pH (entre 1,0 y 1,4), para disminuir la formación de precipitados del ión férrico y lograr una mayor disolución del mineral.

(Santos, 2015) en su investigación de Evaluación de Cuatro Métodos para Recuperación de Oro a Partir de un Mineral Refractario del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Posgrado, nos menciona que la biolixiviación de mineral refractario de oro, lo realiza por diferentes métodos y uno de ellos es integrando al proceso las bacterias ferroxidans, las cuales son microorganismos autótrofos que utilizan al ion ferroso como única fuente de energía. Realizó la adaptación con el medio 9k de la bacteria *Leptospirillum ferrooxidans* con el mineral refractario ajustando el pH entre 1.5-2 determinando mediante titulación con permanganato de potasio la conversión total del ion ferroso a ion férrico, a 30°C y con una agitación a 200rpm. Al haber oxidado todo el ion Fe^{+2} de la solución anterior, adicionalmente se prepara solamente solución de sulfato ferroso (33.3g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) ajustando pH a 1.5-2 para formar una relación 4:1 con la solución del cultivo anterior, y se agrega 1% en peso del mineral de Velardeña para adaptar esta

nueva solución, con los mismos parámetros de temperatura constante a 30 °C con agitación de 200 rpm durante 21 días. Durante este periodo de tiempo se realizan conteos bacterianos para verificar el crecimiento de la población y comprobar así que este aceptando el mineral como fuente de alimento, se realizan nuevamente titulaciones con permanganato de potasio para medición de ion ferroso. Los resultados muestran que el cambio de pH con respecto al tiempo, se mantiene constante y que el pH del 5% de sólidos es el que tiene un pH con valor más bajo que los otros porcentajes del 10, 15 y 20%, esto se debe a una mayor actividad bacteriana con respecto a la pirita y el arsénico ya que hay desprendimiento de azufre y formación de ácido sulfúrico. El control se mantiene constante. Se demuestra como las bacterias que actúan sobre el mineral con el 5% de sólidos tienen un ORP más elevado con respecto a los otros porcentajes y presenta un comportamiento inversamente proporcional al pH. Y finalmente se pudo concluir que la bacteria responde mejor al experimento con menor cantidad de sólidos, es decir para el porcentaje de recuperación de hierro y arsénico superior al 5% en la biolixiviación la bacteria *Leptospirillum ferrooxidaris* trabaja mejor con menor cantidad de pulpa.

(Gamboa, 2015) en su trabajo de investigación de “Evaluación del efecto de la biooxidación como pretratamiento a la cianuración de un mineral refractario del distrito minero Vetas California Santander” de la Universidad Industrial de Santander, en Colombia, explica Los pretratamientos que se han desarrollado para procesar minerales sulfurados, buscan disolver los encapsulamientos presentes alrededor del metal precioso para su exposición a una posterior lixiviación. La tostación, la molienda de alta energía, la oxidación a presión, la oxidación química y la biooxidación se

destacan como pretratamientos que bajo ciertas condiciones pueden ser rentables y por tanto desarrollarse a escala industrial. El procedimiento fue a través de metodologías las cuales se dividen en 4 etapas: la primera es Selección y caracterización del mineral de trabajo, se realizaron los siguientes trabajos: conminución, concentración, Homogeneización y ensayos al fuego del mineral, Pruebas de cianuración en botella, Clasificación, refractariedad, Lixiviación diagnóstica FRX, DRX, FTIR, SEM-EDS, Experimentos de Biooxidación. La segunda es Determinación de las condiciones para la biooxidación realizada: Tamizado de cepas bacterianas, Adaptación de los cultivos sucesivos con 10 g L⁻¹; 50 g L⁻¹; 100 g L⁻¹ de mineral, Influencia de la combinación de cepas bacterianas y pH inicial en la biooxidación, Influencia del tamaño de partícula y concentración del mineral en la biooxidación, Selección condiciones de operación biorreactor 5 L. La tercera es Biooxidación en biorreactor de 5 L y la cuarta Comparación de la disolución de oro y plata con los pretratamientos de biooxidación y oxidación química antes de la cianuración. Se concluyó, que la comparación entre los valores del ensayo final de adaptación y el tamizado bacteriano permitió identificar que la cepa *A. thiooxidans* aumentó su capacidad oxidativa al generar valores de pH final más bajos (1,20 para el tamizado bacteriano) y 0,89 para el cultivo final de adaptación, Eh levemente superiores (458,5 mV para el tamizado bacteriano y 491,3 mV para el cultivo final de adaptación y densidades celulares mayores (1,5*10⁷ células mL⁻¹ para el tamizado bacteriano y 6,8*10⁷ células mL⁻¹ para el cultivo final de adaptación. El resultado de las tres cepas es posible afirmar que la metodología de adaptación permitió la mejora en la actividad biooxidativa de cada una de las bacterias de referencia, representada en los altos valores de Eh alcanzados, los ratios Fe⁺³/Fe cercanos a 1, la presencia de sulfato en solución, la disminución del pH y el aumento

de la densidad celular. También se concluyó que el efecto del pH inicial no tuvo una tendencia general para todas las combinaciones bacterianas probadas. Para las combinaciones TL y FT tuvo un efecto positivo teniendo en cuenta que el pH inicial 2,0 favoreció la disolución-oxidación de hierro y formación de sulfato. Finalmente, si bien el proceso de oxidación química muestra ventajas importantes en términos cinéticos sobre la biooxidación, esta última mostró potencial de ser un proceso eficaz en el pretratamiento al mineral aurífero refractario de estudio, teniendo como resultados la posibilidad de usar cepas de referencia con la capacidad de adaptarse al mineral en un proceso eficaz y ambientalmente favorable. Las desventajas asociadas a los largos tiempos de residencia pueden compensarse a partir de diferentes estrategias ingenieriles a gran escala, como lo pueden ser circuitos de arreglos en serie o en paralelo como se ha demostrado en aplicaciones reales que ha mostrado tiempos de residencia inferiores a los 7 días.

(Alvarez, 2017) en su investigación de tesis Evaluación de la biooxidación de concentrado arsenopirítico aurífero por pretratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas que mejoren la recuperación del oro por cianuración en la empresa minera Eminsol s.a. Bolivia, de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, evalúa la biolixiviación de un concentrado arsenopirítico aurífero por pre tratamiento con una cepa quimiolitotrofa, para de alguna forma mejorar las condiciones de recuperación del mineral, usando un consorcio de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, así mismo se tomó como muestra de estudio a la arsenopirita aurífera, la cual fue obtenida de la Empresa Minera Solitario S. A. El trabajo consistió en realizar pruebas experimentales, primeramente, se hizo un pre

tratamiento al concentrado de arsenopirita aurífera ricos en metales preciosos antes del proceso de lixiviación con cianuro y luego evaluar la cianuración directa. De lo cual se obtuvo que las pruebas de biooxidación de las bacterias *A. ferrooxidans* y el consorcio, aplicado a las muestras del concentrado de arsenopirita aurífera, si se varía en el porcentaje de sólidos de 8 y 12%, esto favorece en un 8%, lográndose así una mayor biooxidación y crecimiento bacteriano, debido a que los microorganismos presentan menor estrés de las bacterias al 12 %. Así mismo la cianuración directa sin tratamiento de la arsenopirita aurífera presenta una máxima recuperación del 51,57 % a las 72 horas del proceso, debido a que un porcentaje del oro sigue encapsulado dentro de la matriz de la arsenopirita, y al realizar el pretratamiento de biooxidación se logra beneficiar la recuperación del oro.

(Reyes, López, Alvarado, & Valencia, 2016) en su investigación *Bioliixiviación de Minerales Auríferos Refractarios de la Compañía Minera Sayapullo S.A. de la Universidad Nacional de Trujillo*, el presente trabajo de investigación utilizó el diseño experimental en el cual presenta dos mecanismos de bioliixiviación o lixiviación bacteriana: directa, donde las bacterias *ferrooxidans* pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente sin participación del sulfato férrico producido biológicamente y la indirecta, donde el sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de degradar y disolver una amplia variedad de minerales sulfurados, es decir depende de la regeneración biológica del sulfato férrico, es por ello que se aplica el método indirecto. En el desarrollo del experimento presenta las siguientes etapas: cianuración y/o thioureación directa; y Biooxidación-lixiviación férrica seguido de cianuración y/o thioureación. En la parte Bioquímica presenta 2 biorreactores de lecho empacado air lift con una bomba

de aire para el suministro del mismo en forma continua para cada una. En la lixiviación férrica, cianuración y/o thioureación se utilizó un sistema de agitación constituido por 2 agitadores. Se extrajo 10 muestras de 1 litro cada una de diferentes puntos de la Compañía Minera Sayapullo, se cultivó la muestra utilizando el medio 9k con 20% de muestra y 80% medio más sulfato ferroso de esta manera se podrá evaluar la oxidación del ferroso y la presencia de microorganismos. Se concluyó que las más altas extracciones de oro y plata se da cuando el mineral de cabeza es molido a 81% -m200 y con biooxidación tratado posteriormente por cianuración teniendo 65% y 73.22% de extracción respectivamente. Finalmente, la Biolixiviación o lixiviación bacteriana indirecta es factible aplicar a minerales auríferos refractarios, por lo que se propone una alternativa viable para el procesamiento de dichos minerales.

En relación con este tema podemos decir que lixiviación bacteriana es un proceso de oxidación de sulfuros metálicos catalizado por microorganismos acidófilos en un medio acuoso, por lo que es un conjunto de reacciones químicas que tienen como resultado la disolución de ciertos minerales, cabe mencionar que este proceso de solubilización de metales es un pre tratamiento en la recuperación de minerales sulfurados con una característica peculiar como lo es la refractariedad, presente en metales preciosos como el oro y la plata, además del cobre (arsenopirita, piritita), posteriormente será posible recuperar el valor metálico del oro y la plata por medio de un tratamiento de cianuración, por lo antes expuesto se tiene que la lixiviación con bacterias es un proceso que se encuentra dentro de la Biominería, en el cual se encargan de alimentar a microorganismos con hierro y azufre para luego pasar a oxidarlos, siendo estas su fuente de energía. Manuel (2016):

La lixiviación bacteriana se explicaba como un proceso natural que se vale de la capacidad de cierto grupo de microorganismos principalmente bacterias del género *Acidithiobacillus* (antes *Thiobacillus*) - de oxidar sulfuros metálicos hacia sus sulfatos solubles correspondientes, con la producción de ácido sulfúrico y sulfato férrico. (pág. 22)

Las bacterias en el proceso de lixiviación son captadas en los relaves para luego ser llevadas a un laboratorio para cultivarlas y adaptarlas a través de procesos químicos para finalmente ser utilizadas en la recuperación de metales preciosos. Misari (2016) menciona:

La lixiviación bacteriana es considerada como un proceso de oxidación bioquímica que es catalizado por microorganismos, los cuales requieren un previo cultivo en condiciones de laboratorio, donde es preciso conocer los elementos nutritivos y las condiciones físicas favorables para su crecimiento. (pág. 212)

La oxidación bacteriana es un proceso biohidrometalúrgico que al tener contacto el sulfuro refractario con la bacteria cultivada reduce los efectos del ion ferroso a férrico.

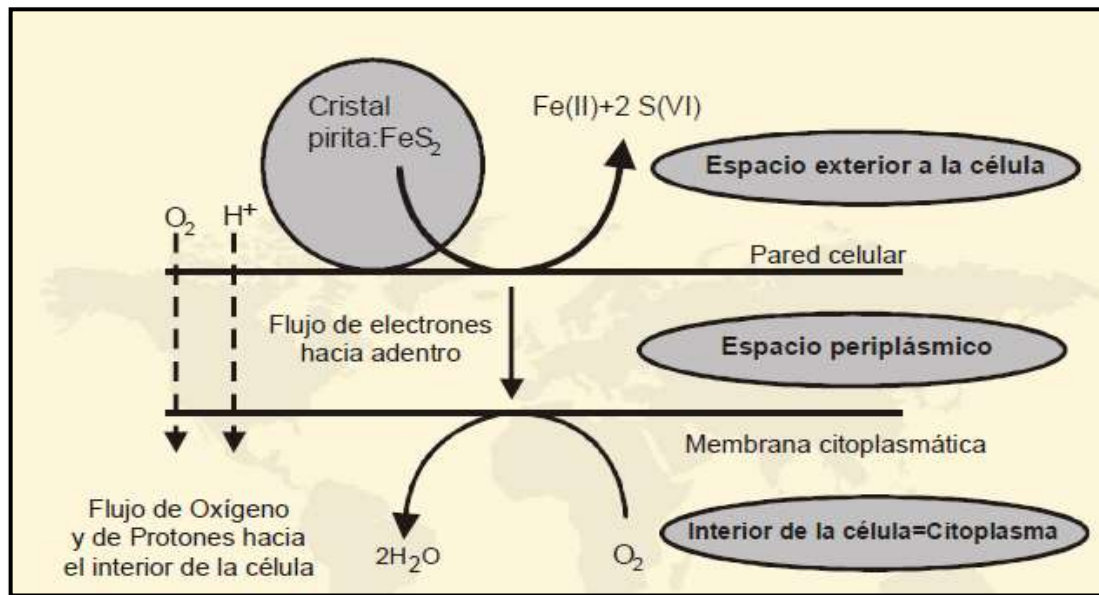


Figura 1: Representación esquemática de la oxidación, catalizada por la bacteria.

Nota: La oxidación es realizada por la bacteria en un cristal de pirita (FeS_2) bajo condiciones aeróbicas.

Fuente: Navarro, 2012.

Dentro de este marco tenemos que la biolixiviación puede ser directa o indirecta. La lixiviación indirecta se realiza con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, cuando no hay presencia de oxígeno o de bacterias que puedan realizar este proceso indirecto, sin embargo, dentro de este mecanismo la reacción de la Thiobacillus Ferroxidans presenta reacciones importantes, que hacen posible tal proceso, en otras palabras Pérez (2016) nos define la lixiviación indirecta como: “La lixiviación indirecta se realiza con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ en ausencia de oxígeno o de bacterias, es responsable de la disolución o lixiviación de varios minerales sulfurados de importancia económica.” (pág. 15)

Así pues la empresa minera Codelco (2017) nos conceptualiza que :

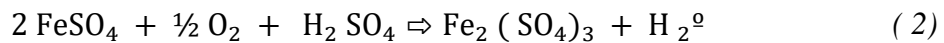
“Lixiviación indirecta se realiza con el ion (III) Fosfato ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) en ausencia de oxígeno o de bacterias. Es responsable de la disolución o lixiviación de

varios minerales sulfurados de importancia económica.” (pág. 5) Dentro de este mecanismo, son importantes dos reacciones mediadas por T. ferrooxidans:

Ecuación 1: Reacción de la T, Ferrooxidans para la pirita



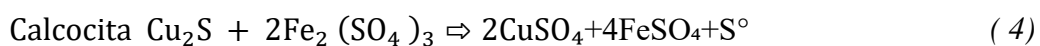
Ecuación 2: Solución de Reacción



Ecuación 3: Reacción de la T. Ferrooxidans para la calcopirita



Ecuación 4: Solución de la ecuación de la Calcopirita



En la lixiviación indirecta ocurre la disolución que es efecto de las reacciones sin el actuar de la bacteria ni el mineral. Codelco (2017) afirmó que: “El mecanismo de lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2). El azufre (S⁰) generado en las reacciones 3 y 4 puede ser convertido en ácido sulfúrico (H₂SO₄) por T. ferrooxidans” (pág. 5)

A continuación, se muestra el cambio de azufre en ácido sulfúrico por la acción de la cepa Ferrooxidans.

Ecuación 5: cambio de azufre en ácido sulfúrico por la acción de la cepa Ferroxidans



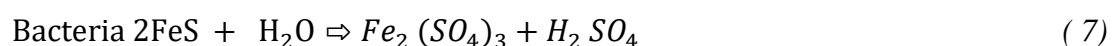
Por otro lado, la lixiviación directa ocurre por el ataque enzimático de las bacterias sobre los componentes del mineral que permiten disolver los sulfuros metálicos directamente por la acción de la cepa Thiobacillus Ferroxidans, sin la presencia del sulfato férrico que se encuentran biológicamente, a lo que la empresa minera Codelco (2017) define como: “En la lixiviación directa las bacterias ferroxidantes también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente, sin la participación del sulfato férrico producido biológicamente. El proceso se describe en la siguiente reacción, donde M representa un metal bivalente.” (pág. 5)

Debido a que el hierro está presente en entornos de lixiviación natural hace aceptable tanto para la lixiviación indirecta como directa que estas ocurran paralelamente, a continuación, se presenta la reacción de la lixiviación directa para minerales sulfurados.

Ecuación 6: reacción de la lixiviación directa para minerales sulfurados.



Ecuación 7: Bacteria Cu



Ecuación 8: Bacteria CuFeS

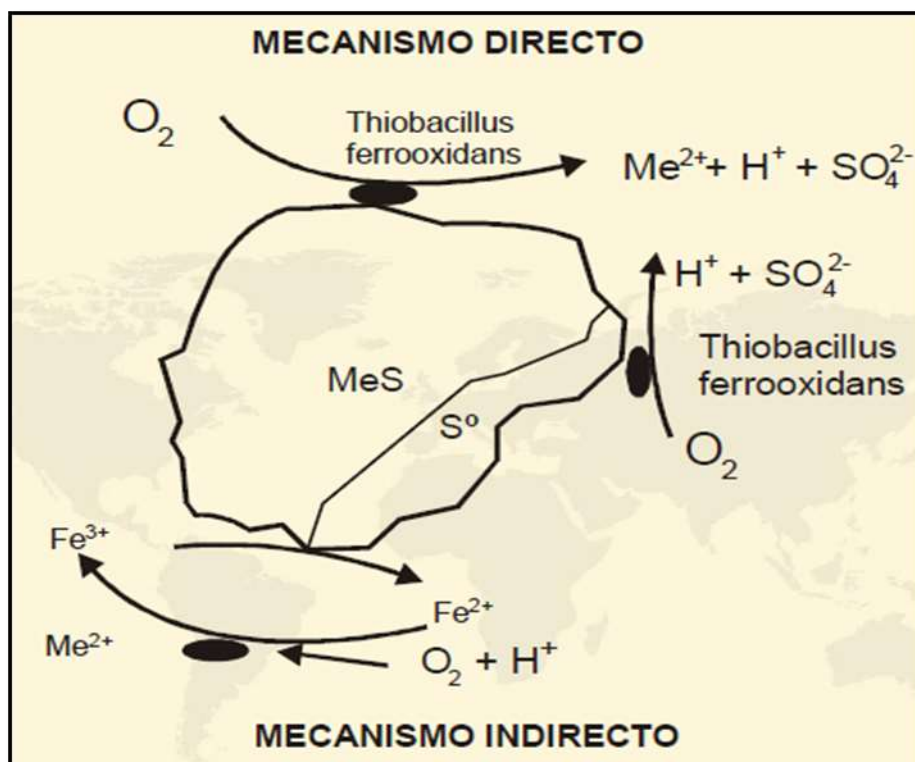
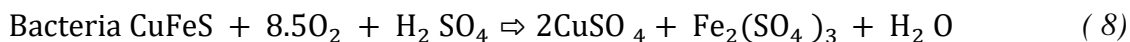


Figura 2: Mecanismos directo e indirecto para la solubilización del metal.

Fuente: Navarro, 2012

La actividad minera es uno de los principales factores en la formación del Drenaje Acido de Mina (DAM) la cual se caracteriza por su pH bajo (< 4) y contener Fe^{2+} y SO_4 disueltos en el medio, además de contar con grandes cantidades de metales en el medio que son altamente tóxicos como As, Cd, Pb, Zn, Cu, Hg, Sb, Se, entre otros. Mamani (2018):

El drenaje ácido de mina es la acidificación del agua superficial y subterránea en una mina al estar en contacto con minerales metalíferos en las labores

mineras, botaderos, relaves y otros de acuerdo a la mineralogía de la roca expuesta y de la disponibilidad de oxígeno y agua, y se produce tanto en minas activas como abandonadas, en túneles subterráneos, pozos, tajos abiertos, material de desmonte y relaveras. La formación de aguas ácidas tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana. Los principales elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y como elemento catalizador las bacterias. (págs. 25-28)

El DAM es una preocupación latente y una problemática ambiental que por sus propiedades físico - químico del agua ocasionaría contaminación del medio alterando el ecosistema.

Tabla 1

Clasificación de los drenajes ácidos de mina.

Sub categoría	Descripción	Rango de acidez o alcalinidad
1	Muy rápido	Acidez Neta >300mg/l como CaCO ₃
2	Moderadamente ácido	$100 \leq \text{Acidez Neta} \leq 300\text{mg/l como CaCO}_3$
3	Débilmente ácido	$0 \leq \text{Acidez Neta} < 100\text{mg/l como CaCO}_3$
4	Débilmente alcalino	Alcalinidad Neta < 80 mg/l como CaCO ₃
5	Fuertemente alcalino	Alcalinidad Neta ≥ 80 mg/l como CaCO ₃

Fuente: Mamani (2018)

Se entiende que todo DAM es producto de toda actividad minera con mayor grado de manipulación de agua y que a través de las excavaciones manejan grandes volúmenes principalmente por las infiltraciones de los acuíferos interceptados y de la escorrentía superficial. Como consecuencia existen ciertos componentes que influyen en la formación de los drenajes ácidos, así como determinar que procesos químicos y que reactantes se involucran, además de pronosticar la capacidad de generación de ácido en las operaciones mineras. Mamani (2018) afirma:

Los componentes principales para la generación del DAM son:

- ✓ Minerales sulfurosos,
- ✓ Agua o atmosfera húmeda,
- ✓ Un oxidante, especialmente el oxígeno de la atmosfera,
- ✓ La velocidad y la magnitud de la generación del DAM son afectadas por los siguientes factores secundarios:

- Bacterias (Thiobacillus Ferrooxidans),
- pH,
- Temperatura.

Destacamos que entre el factor principal en la formación del DAM es la oxidación de pirita (FeS_2), que libera protones e iones de Fe a la solución. La disminución del pH del agua, resultando de la pirita oxidada, puede acelerar la oxidación de otros minerales sulfúricos, como estibina (Sb_2S_3), argentita (Ag_2S), y estanita ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$). Secundariamente el DAM puede lixiviar metales y metaloides eco-tóxicos desde materiales geológicos de los cuales fluyen. Y que los iones metálicos eco-tóxicos, la acidez, y los resultantes

precipitados asociados con el DAM, son amenazas significativas para los recursos de agua dulce. (págs. 28-29)

El DAM es altamente toxico en niveles altos para la vida del hombre, la fauna y la vegetación, degrada ásperamente la calidad del agua, pudiendo afectar tremendamente la vida acuática, convirtiendo al agua prácticamente inservible. Se registra reportes de la muerte de miles de peces y crustáceos de ríos, afecciones ha ganado y destrucción de cultivos y riveras, así como se detección de una coloración y turbiedad en aguas de ríos y lagos.

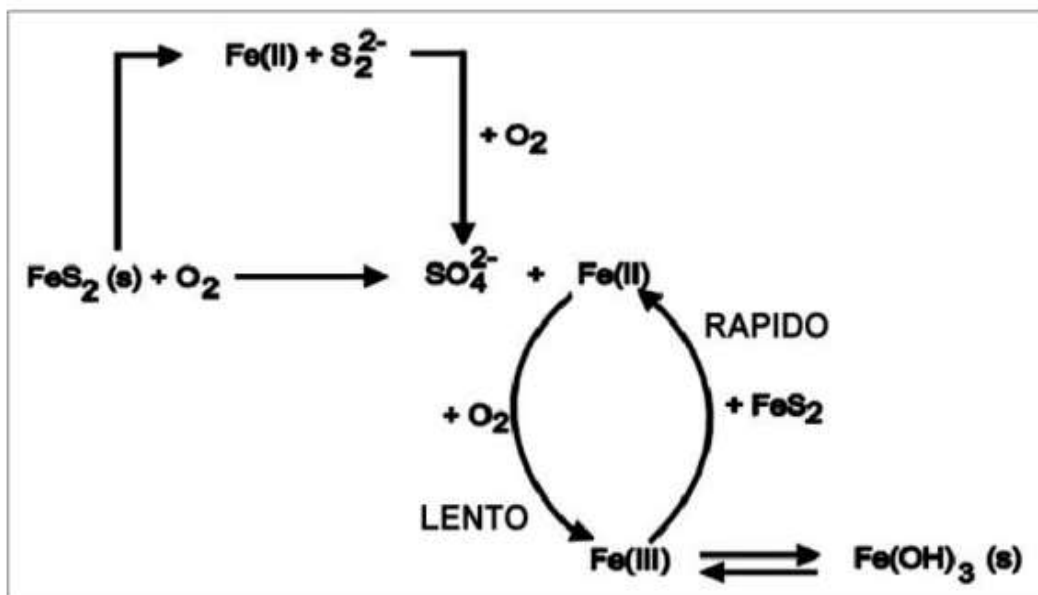


Figura 3: Formación de aguas ácidas de mina.

Fuente: (Mamani, 2018)

Las bacterias en el proceso de biolixiviación permiten que sea más asequible y adaptable las cuales no se reproducen a una velocidad necesaria, motivo por la cual en un laboratorio se realizará el aislamiento, manejo e identificación de dichas bacterias

biolixiviantes permitiendo una minera limpia y con bajos costos de operación e inversión. Pérez (2016)

Bacterias biolixiviantes, biooxidantes o ferroxidantes; son microorganismos también llamados sulfoxidantes que pertenecen a los mesofilicos y termofilicos moderados. Se dividen 3 grupos: nitrospira, actinobacterias y proteobacteria. Se les denomina biolixiviantes debido a que participan de bioprocesos, ya sean biolixiviación, bio-oxidación o biomineralización, siempre con el objetivo de purificar metales. (pág. 17)

A través de la genética se obtendrán bacterias biolixiviantes con atributos mejoradas, obteniendo alta resistencia a los metales pesados y gran porcentaje de recuperación.



Figura 4: Ciclo de Existencia de una Colonia de Bacterias.

Fuente: Navarro, 2012

Así en la figura mostrada a continuación se detalla los tipos de microorganismos y sus características.

Tabla 2

Bacterias Acidófilas de interés en la Biolixiviación de Metales.

Tipo de microorganismo	Principal modo de metabolismo	Géneros y especies
Mesófilo	Carbón inorgánico y fuente de energía quimiolitótrofa	Acidithiobacillus ferrooxidans, A.thiooxidans, A. prosperus, Leptospirillum ferrooxidans
	Carbón orgánico y fuente de energía quimiolitótrofa	Acidiphilium cryptum y heterótrofos relacionados
	Carbón orgánico e inorgánico y fuente de energía quimiolitótrofa (heterótrofos facultativos)	A.acidophilus, A.organovorius, A.cuprinus.
Termófilos moderados	Carbón inorgánico y fuente de energía quimiolitótrofa.	Sulfobacillus thermosulfidooxidans, Metallosphaera sedula.
Termófilos extremos	Carbón inorgánico y fuente de energía quimiolitótrofa.	Sulfolobus solfaraticus, S.acidocaldarius, Acidianus brierleyi, A. infernus.

Fuente: Navarro, 2012

La bacteria *Leptospirillum ferrooxidans* pertenecen a la familia de las bacterias mesófilas, así como también *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*; actúan a temperaturas moderadas. Pandura & Peña (2015) afirma:

Leptospirillum ferrooxidans; es quimiolitautótrofo obligado, oxida hierro ferroso de sulfuros minerales como única fuente de energía. Es aerobio, cidófilo obligado y sensible a materia orgánica. Es un microorganismo incapaz de oxidar hierro o sulfuros metálicos bajo variadas condiciones. Sin embargo, es hábil en oxidar azufre elemental a temperaturas de 2 a 45°C, siendo su óptimo 28 – 30°C, y tolera pH desde 0,5 a 5,0. Siendo su óptimo en torno a pH 2,0, con 0,3-0,5 micrones de ancho y de 0,9-4.0 micrones de largo. (pág. 30)

La bacteria de esta especie son gram negativas y se encuentran localizados en yacimientos sulfurados y siempre en compañía de la Thiobacillus ferrooxidans. Además de ello tiene una particularidad de tener forma de espiral.

La bacteria Ferrooxidans, una de sus funciones principales es la de oxidar el sulfato ferroso para convertirlo en sulfato férrico en el proceso químico. Misari (2016) expresa:

Los Thiobacillus Ferrooxidans utilizan la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} como fuente de energía para su metabolismo. Esta oxidación se muestra en un cambio del color de la solución nutriente y se comprueba, de este modo, el límite de la concentración para la dilución de un cultivo. (pág. 60)

Estos microorganismos a través de la oxidación extraen los metales más puros de la ganga, actuando como catalizadores y cultivándose en ambientes ácidos, para luego pasar a una celda electroquímica para recuperación de estos.

Las cepas Acidithiobacillus Ferrooxidans antes conocidas como Thiobacillus Ferrooxidans en el proceso de oxidación necesita ciertos parámetros para su realización entre ellos será tener el tamaño óptimo de la partícula para acelerar la extracción del mineral, así mismo necesita desarrollarse en un pH adecuado para su evolución siendo el valor óptimo de 2, así también requiere de una temperatura apropiada para su incubación en la preparación de concentrados de la bacteria. Manuel (2016) afirma:

Las bacterias Ferrooxidantes, también conocidas como Acidithiobacillus ferrooxidans, las cuales tienen las siguientes características: 0.5 μ de ancho por 1.0 μ de largo, se desarrolla con un PH entre 1.5- 3.0, siendo el más óptimo el valor de 2, se desarrolla en temperaturas entre 30°C-45°C, estando el óptimo

entre 35° y 40°C, tienen la capacidad de oxidar compuestos de Fe^{+2} y S reducido; empleada en la disolución de cobre y en el pre-tratamiento de sulfuros auríferos refractarios. (pág. 16)

Todo microorganismo sobre todo del género *Acidithiobacillus Ferrooxidans* requiere de una fuente de energía como son azufre y hierro para poder desarrollarse y adaptarse. Manuel (2016) expresó: “Fuente de Energía son utilizados por todo microorganismo, son fuente primaria de energía el ion ferroso y el azufre inorgánico”. (pág. 27). En la lixiviación de mineral el ion ferroso (Fe^{+2}) es producido biológicamente, por ello no es necesario añadirlo. En caso de usar mineral no es necesario añadir Fe^{+2} .

La cepa durante todo el proceso de biolixiviación recibe luz visible y no filtrada al momento de ser tratadas, sin embargo, estas muestran acciones de seguridad contra las mismas. Manuel (2016) mencionó: “La luz visible y la no filtrada tienen un efecto inhibitorio sobre algunas especies de bacterias, pero el hierro ofrece alguna protección a los rayos visibles” (pág. 27)

Durante el tratamiento de la cepa *Thiobacillus Ferrooxidans* uno de los factores importante que se debe mencionar es determinar la temperatura adecuada en que la bacteria podrá evolucionar óptimamente y de esta manera ser utilizada en la recuperación de mineral. Manuel (2016) mencionó:

En la Temperatura los microorganismos se clasifican según el rango de temperatura en el cual pueden sobrevivir. Así las mesófilas sobreviven en un rango óptimo de 30-40°C, las moderadamente termófilas a una temperatura cercana a los 50°C, y las extremadamente termófilas sobre los 65°C. Si la

temperatura del medio en que se encuentren los microorganismos es menor a 5°C, se vuelven inactivos volviendo a cumplir su función si aumenta la temperatura, pero si la temperatura del medio sobrepasa el óptimo, los microorganismos se mueren. (pág. 28)

Las *Thiobacillus Ferrooxidans* son moderadamente termófilas las cuales viven en temperaturas adecuadas.

La bacteria *Sulfobacillus acidophilus* pertenecen a la familia termófilos moderados, teniendo la propiedad de ser autótrofos ya que tiene la facultad de oxidar el ion ferroso, azufre y minerales sulfurados. Jaque (2012) expresa:

La bacteria *Sulfobacillus acidophilus* posee forma de bastón, sus dimensiones son de 0,5-0,8 μm de ancho y 3,0-5,0 μm de largo, es Gram-positiva y formadora de endosporas, crece en condiciones de temperatura entre 40°C y 60°C, siendo su óptimo crecimiento entre los 45°C y 50°C. El pH óptimo de crecimiento es de 2,0; no obstante, estudios de biolixiviación de pirita a bajos pH muestran que ésta fue efectiva sólo cuando el pH de los cultivos se encontraba entre 1,2 y 1,5 e incluso a pH 1,0. (págs. 16-17)

Por lo tanto, la bacteria *Sulfobacillus acidophilus* es autótrofa, es decir tiene propiedades aeróbicas ya que necesita de oxígeno para la oxidación de minerales. Cabe recalcar que también trabajan en condiciones de pH bajos.

En la figura 5 a continuación, se muestra una bacteria *Sulfobacillus acidophilus* con endosporas en su interior.

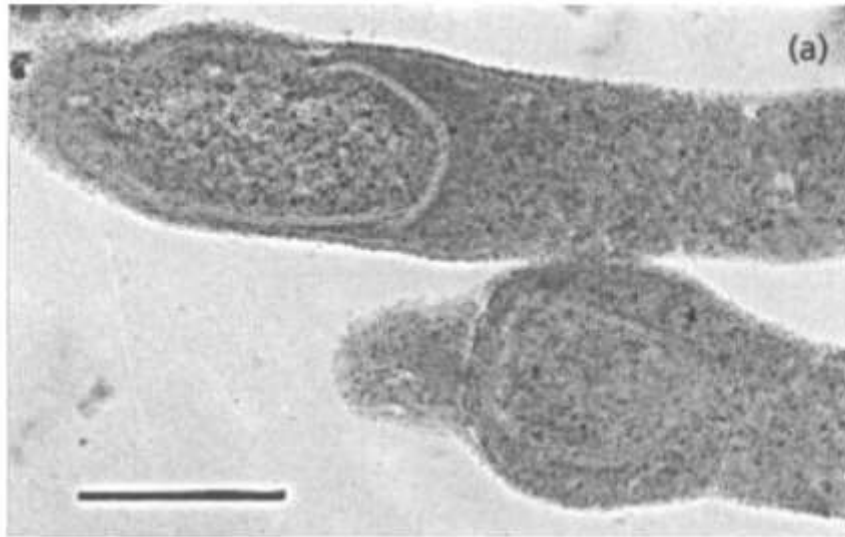


Figura 5: Micrografía Electrónica de bacterias Sulfobacillus Acidophilus donde se observan Endosporas.

Fuente: Jaque (2012)

Dentro de la archaea bacteriana se encuentra la archaea hipertermófila se localiza en el hábitat más extremo del planeta, sobreviviendo a temperaturas por encima a los 65 °C, requiriendo mecanismo para su aclimatación. Se dividen en termófilas e hipertermófilas. Fernández & Pérez (2007) expresan:

La temperatura óptima de desarrollo de archaea hipertermófila oscila entre los 80 y 106°C y el pH óptimo de su medio varía, desde la acidez hasta valores cercanos a la neutralidad. La fuente de energía utilizada son quimiolitótrofos pudiendo utilizar el azufre elemental y reducirlo a ácido sulfhídrico, o, por el contrario, hacer uso de fuentes de energía orgánicas complejas como azúcares, proteínas, etc. Las ventajas para la industria son: incremento de la solubilidad de los sustratos poliméricos, disminución de la viscosidad, incremento de la biodisponibilidad, aumento de la ratio de la velocidad de las reacciones y disminución del riesgo de contaminación. (págs. 566-567)

Las bacterias archaea son de gran provecho en la industria (papeleras, textil, azucarera, farmacéuticas, detergentes, reciclaje y en la industria minera, entre otras) como biotecnología debido a la peculiaridad de sus propiedades de las cuales deriva ciertas ventajas, ya que requieren biocatálisis en condiciones extremas es decir el uso de enzimas para catalizar reacciones químicas. El ambiente en que se desenvuelve esta bacteria suelen ser ricos en azufre y con pH muy ácido, pero en ambiente ligeramente alcalina.

La cepa Acidianus involucradas en la biolixiviación a veces llamadas arqueas termófilas semejantes a las bacterias las cuales carecen de núcleo y crecen en condiciones anaeróbicos. Castro (2016)

El género Acidianus es una nueva especie que integran este género de arqueas, todas anaerobias facultativas, Capaces de crecer en condiciones quimiolitautótrofas y, en algunos casos son autótrofas facultativas. La característica en común de estas especies es la capacidad de oxidar o reducir azufre elemental, dependiendo de la disponibilidad de oxígeno. Otra característica de las especies Acidianus es que pueden usar H_2 como donar de electrones en la respiración aeróbica. (pág. 23)

Así también esta cepa reduce el azufre a sulfuro de hidrógeno (H_2S), viviendo en condiciones de hábitats extremas como lagos, aguas calientes, fumarolas, lechos oceánicos.

Para el crecimiento de las bacterias uno de los factores principales para su desarrollo es la temperatura promedio en la cual se adaptan. Manuel (2016) expresa: “Existe una relación entre la especie de bacteria y el sustrato en el cual es posible su crecimiento mediado por un rango de temperatura a continuación en la tabla 1 presenta las medidas de temperaturas para las cepas aisladas” (pág. 23)

Tabla 3

Temperaturas para el Crecimiento de las Cepas.

Microorganismos	Sustrato	Temperatura	
		Tmin	Tmax
Acidithiobacillus ferridurans D2	Fe ²⁺	29	37
Acidithiobacillus ferrooxidans IESL32	Fe ²⁺	30	45
Acidithiobacillus thiooxidans IESL33	S ^o	Nd.	Nd.
Leptospirillum ferriphilum IESL25	Fe ²⁺	37	48
Leptospirillum ferriphilum Iic	Fe ²⁺	Nd.	Nd
Acidithiobacillus caldus CBAR 5	S ^o	45	49
Sulfobacillus thermosulfidooxidans	Fe ²⁺	49	49

Fuente: Minera Escondida, Chile

Nota: Nd. significa que no hay valor disponible. Dichas cepas fueron aisladas a partir de operaciones de biolixiviación en la Minera Escondida, Chile.

Tabla 4

Bacterias Asociadas a la Oxidación de Minerales.

Microorganismo	Crece por oxidación de:				Fuente de carbono		T°	Acidez
	Fe ²⁺	S ²⁻	S ⁰	S ₂ O ₃	CO ₂	Levadura	°C	pH
Thiobacillus Ferroxidans	+	+	+	+	+	-	20 -35	1.5-2.5
Thiobacillus Thiooxidans	-	-	+	+	+	-	20 -35	1.5 -2.5
Leptospirillum Ferroxidans	+	-	-	-	+	-	30	1.2 -2.0
Sulfobacillus Thermosulfidooxidans	+	+	+	-	+	+	45 -60	3.0
Sulfobacillus Thermotolerans	+	+	-	-	+	+	45-60	3.0
Leptospirillum Thermoferrooxidans	+	+	-	-	+	+	45-60	3.0
Sulfobollus Acidocaldarius	+	+	+	+	+	+	60 -80	3.0
Acidianus Archae	+	+	+	+	+	+	60 -80	2.5
Metallosphaera Archea	+	+	+	+	+	+	60-80	2.5
Sulfurococcus Archea	+	+	+	+	+	+	60 a 80	2.5

Fuente: Pérez, 2016

Nota: + señala que esa reacción procede habitualmente en términos positivos, - indica que esa reacción normalmente no ocurre.

Tabla 5

Bacterias Asociadas a la Lixiviación de Minerales.

Microorganismos	Fuente de energía	pH	Temperatura(C°)
Thiobacillus Ferroxidans	Fe ⁺² , U ⁺⁴ , S ^o	1.5	25 – 35
Thiobacillus thiooxidans	S ^o	2.0	25 – 35
Leptospirillum Ferroxidans	Fe ⁺²	1.5	25 – 35
Sulfobacillus	S ^o , Fe ⁺² , Carbón orgánico	2.0	> a 60
Acidiphilium cryotum	Carbón orgánico	2.0	25 – 35
Th. Intermedius	S ^o , S ⁻² , Carbón orgánico	2.5	30
Th. Napolitanas	S ^o , S ⁻²	2.8	30
Th. Acidophilus	S ^o , S ⁻²	3.0	
Th. Thioparus	S ^o , S ⁻²	3.5	
Thiobacillus TH2 y TH3	Fe ⁺² , S ⁻²	6.0	50
Metallogenium sp.	Fe ⁺²	4.5	
Heterótrofos	Carbón orgánico		25-40

Fuente: Navarro, 2012.

Nota: La tabla detalla a cada bacteria con su fuente de energía, pH, temperatura

Cabe mencionar que el potencial redox en el proceso de lixiviación es un factor que tiene la capacidad de aceptar y donar electrones es decir pueden oxidar o reducir, por consiguiente, hay bacterias que requieren de un entorno oxidado para desarrollarse entretanto hay otras que necesitan de entornos reductores para su actividad metabólica. Manuel (2016) mencionó: “Potencial redox (Eh), en la medida del potencial, es un indicador de la actividad microbiana, mientras mayor sea el potencial medido, mayor será la actividad microbiana. El potencial óptimo es de 600 a 800 mV (miliVolt)”. (pág. 28). Las bacterias aeróbicas para su crecimiento necesitan de valores redox positivos así mismo las bacterias anaeróbicas necesitan de valores negativos.

Otro factor no menos importante es el tamaño de partícula, la cual influye en el proceso de biooxidación de manera tal que mientras más reducido sea el tamaño de la partícula mayor será su velocidad en este proceso. Manuel (2016) expresó: “A menor Tamaño de partícula del mineral, mayor es el área de contacto que tiene el microorganismo, haciendo más efectiva la lixiviación”. (pág. 28) .

En menas con microorganismos es de gran importancia que estas cepas necesitan de cultivos trabajados en condiciones de laboratorio para su tratamiento. Misari (2016) expresa: “Lo importante de conocer los elementos nutritivos y las condiciones físicas favorables para su crecimiento, siendo el medio más favorable para cultivar estas bacterias es el medio conocido como 9K (Silverman y Lundgren) con hierro ferroso” (págs. 211-212) A continuación, los siguientes elementos componen el medio:

Tabla 6

Componentes del Medio 9K.

Reactivos	Contenido
$(NH_4)_2 SO_4$	3.0 g
KCl	0.1g
$K_2 HPO_4$	0.5 g
$MgSO_4 + 7H_2O$	0.5 g
$Ca(NO_3)_2$	0.1 g
$FeSO_4 7H_2O$	44.2 g
$H_2 SO_4$	1 ml

Fuente: Misari, 2016

Es importante mencionar que todo microorganismo encontrado en depósitos minerales necesita de un medio para su evolución, las cuales tendrán que ser necesariamente trabajado en condiciones de laboratorio para su tratamiento y posterior efectividad en el proceso de lixiviación. López (2014) menciona:

El medio MKM (Medio Kelly Modificado), la bacteria como, todo organismo vivo, debe obtener energía de elementos básicos para su nutrición, el cual debe ser en cantidades proporcionales a su composición celular en el medio de cultivo en forma de sales. Lo más importante cuantitativamente, son el nitrógeno, generalmente como sal de amonio, el magnesio (sulfato de magnesio) necesario para la fijación de CO_2 , el fósforo (fosfato ácido de potasio) para el metabolismo, es por esto que se prepara, el medio MKM. (pág. 56)

Este medio MKM es fundamental para la supervivencia del microorganismo, los cuales son alimentados obteniendo la energía necesaria para el óptimo desarrollo del proceso, logrando un tratamiento efectivo en la recuperación del concentrado en el proceso de biolixiviación.

El medio MKM está compuesto de elementos esenciales que se requiere para actuar con eficacia en la recuperación del concentrado dentro de la biolixiviación. López (2014) expresa:

El medio MKM está compuesto por:

- Incubador orbital: se prepara cultivos de molibdenita con un tamaño de partícula de 325 μm en medio nutriente MKM al 5% en sólidos, inoculados al 1%, con una cepa bacteriana termófila extrema disponible en laboratorio. Periódicamente se monitorean pH, ORP y bacterias por campo.
- Reactores: se coloca 1L del medio MKM en el recipiente inoculado 1% V/V, adicionado 5g del concentrado de MoS_2 con un tamaño de partícula de 325 μm y se prende el reactor a una temperatura constante de 65°C. cada 4 horas se realiza el monitoreo del sistema (pH, potencial, bacterias por campo, conductividad). El pH, potencial y conductividad se miden tomando una muestra de 10ml. Se adjunta el volumen del agua evaporada nuevamente a 1L con el medio MKM. El método para medir la densidad es el empleo de un picnómetro. Para el conteo de las bacterias por campo se usa la cámara Neubauer, tomando una pequeña muestra con pipeta Pasteur. Se coloca sobre la cámara un cubreobjetos y se introduce la muestra; en caso de haber burbujas en el cubreobjetos o se haya movido se debe repetir la operación.

- **Meb:** la técnica de caracterización por el estudio de microscópico electrónico del barrio (MEB) y microanálisis con e⁻ electrodispersados permite determinar la composición elemental y las especies minerales que presentan los elementos de interés y la morfología del mineral, esto nos suministra una información muy importante a pesar de la limitación que tiene esta técnica, la cual no es capaz de captar fases de bajas concentraciones sobre todo menor al 5% en peso, ya que el espectro de las demás crea una interferencia que traslapa a la especie de menor concentración. (págs. 55-57)

Cada composición da una particularidad en el funcionamiento del medio MKM, es decir se tiene en cuenta el tamaño de la partícula (325 μm), concentrados adicionales que se incorporan como MoS₂, además de una temperatura constante de 65°C necesaria para el desarrollo de la cepa monitoreada correspondiente cada cierto periodo de tiempo; además de ello incorpora la técnica de MEB que será fundamental para especificar la composición y especies minerales de interés presentes en las muestras tratadas.

Tabla 7

Composición del Medio MKM.

Composición (g/L)	MKM
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.4
K ₂ HPO ₄	0.04
MgSO ₄ .7H ₂ O	0.4

Fuente: (López, 2014)

Existen diversos factores que intervienen en la respuesta de las cepas encargadas del desarrollo de la biolixiviación entre estos factores encontramos al pH, dióxido de carbono y oxígeno, nutrientes, fuente de energía, luz, temperatura, tamaño de la partícula y el potencial redox. Manuel (2016) menciona: “Las bacterias acidófilas crecen en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollarse a un pH mayor de 3.0. El pH define que especies de bacterias se desarrollarán en el medio” (pág. 27) . Las bacterias no se pueden desarrollar en pH muy altos porque esto causaría la muerte.

Otro factor importante es el dióxido de carbono y el oxígeno ya que toda bacteria necesita un entorno con aireación para poder sobrevivir. Manuel (2016) afirma:

El aire aporta el oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2) necesarios para la lixiviación. El oxígeno es utilizado como oxidante por los microorganismos en ambientes de lixiviación. El dióxido de carbono es utilizado como fuente de carbono para la fabricación de su arquitectura celular o generación de biomasa. (pág. 27)

Toda bacteria necesita de nutrientes adquirido por los minerales para su adecuada evolución y necesario añadir bajo la forma de sales al cultivo bacteriano, esto es otro de los factores en mención. Manuel (2016) expresó:

Los nutrientes son los que necesita todo ser vivo como los microorganismos requiriendo fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, obtenidos del mismo mineral, como amonio, fosfato, azufre, iones metálicos (Mg^+), etc. El magnesio, es necesario para la fijación de CO_2 y el fósforo es requerido para el metabolismo energético. (pág. 27)

Una de las ventajas principales de la oxidación biológica es que se desarrolla a presiones atmosféricas y en temperatura ambiente. Misari (2016) afirmó:

Como producto de la oxidación bacteriana se genera solución férrica, que se caracteriza por la coloración marrón oscuro que obtiene el medio. Una solución conteniendo ion férrico es un buen agente lixivante de los sulfuros metálicos, debido a su alto potencial de oxidación. Siendo la bacteria *Thiobacillus Ferrooxidans* capaz de regenerar ion férrico, resulta obvio afirmar que esta bacteria contribuirá a la lixiviación de los sulfuros manteniendo una alta concentración de Fe^{3+} en solución. (pág. 210)

Un factor importante para la extracción de Au en el proceso de lixiviación es el tamaño del grano, a menor tamaño mayor es el contacto que tiene la cepa. Romero & Flores (2010) menciona:

En la mayoría de los casos, un porcentaje significativo de Au puede ocurrir en forma submicroscópica o en solución sólida con pirita, tales minerales son llamados refractarios; los métodos de pre-oxidación para minerales refractarios y concentrados son comúnmente usados para mejorar la recuperación de metales preciosos. Al decrecer el tamaño de la partícula, se incrementan también las reacciones de competencia de otros elementos, por tanto, se debe encontrar un compromiso entre el tamaño de la partícula, el porcentaje de extracción del oro y el consumo de cianuro. (pág. 315)

Este parámetro hará más efectiva la lixiviación esto definirá la velocidad de disolución con la que se extraerá este mineral valioso.

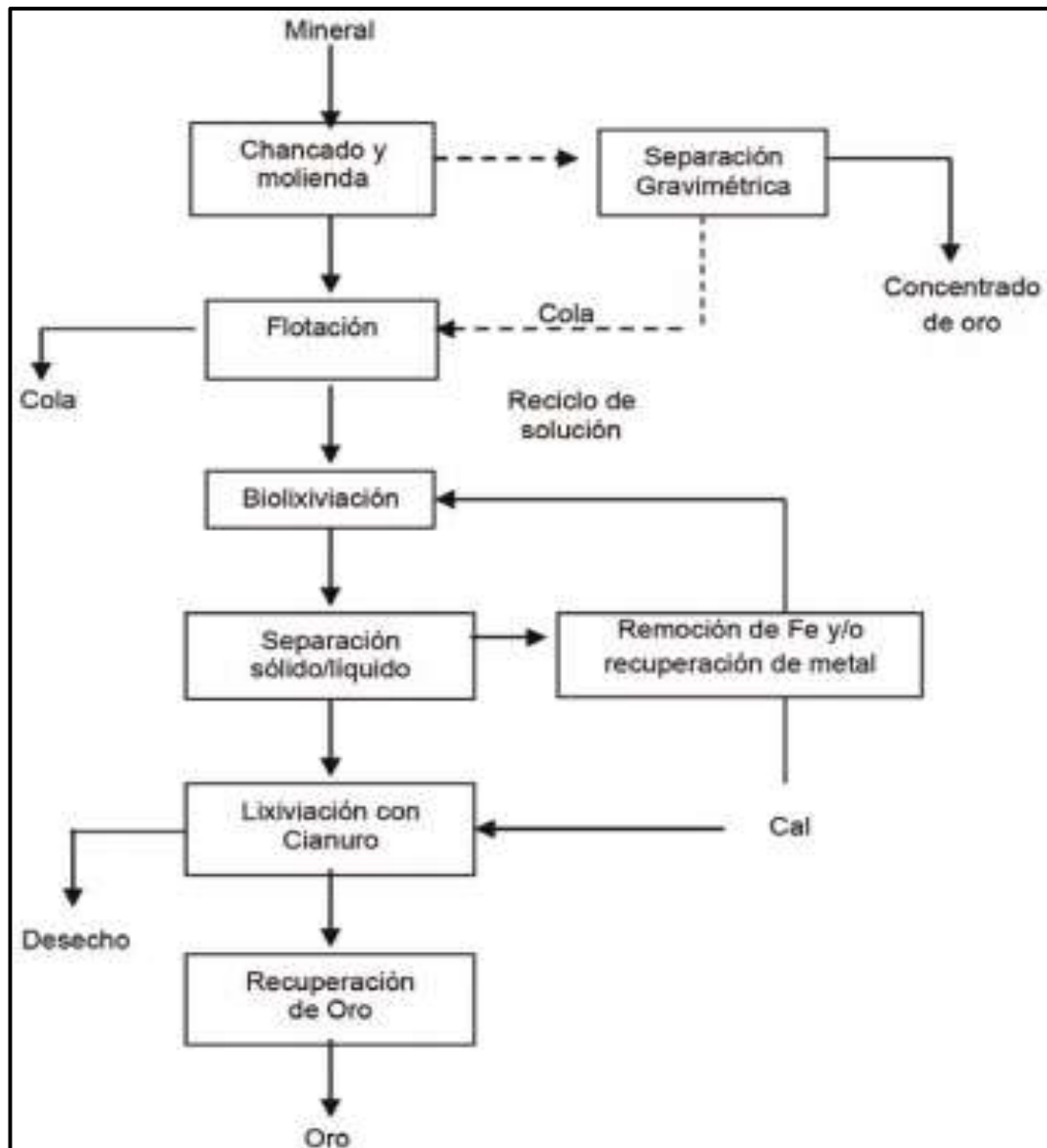


Figura 6: Diagrama de flujo de recuperación incorporando la pre - oxidación biológica.

Fuente: Misari, 2016

La importancia de realizar las pruebas en laboratorio en la biolixiviación radica en que se puede describir la conducta del mineral refractario bajo condiciones ideales de lixiviación. Misari (2016) mencionó:

Un aspecto fundamental, antes de iniciar la lixiviación de un determinado mineral, constituye el estudio mineralógico de dicha muestra. Estos estudios nos indicarán, entre otros, la mineralogía que las integran, los tipos de entrelazamientos (textura de cada grano), los grados de liberación, y la proporción de los minerales económicos en los granos entrelazados. Es necesario recalcar, dentro de estas pruebas de laboratorio, la importancia que tiene la muestra a tratarse. Es importante que la muestra sea representativa del cuerpo del mineral y que, por lo tanto, toda información obtenida a partir de ella sea confiable. (pág. 119)

Sin embargo, se debe ejecutar análisis químicos y espectrográficos que se efectúan con el fin de determinar cómo está compuesto el mineral valioso y localizar los componentes dañinos para la bacteria.

Existen acondicionamiento para las muestras a consecuencia de una lixiviación bacteriana, todas estas pruebas ser ejecutaran para demostrar la factibilidad del proceso, entendiéndose que en algunos casos los minerales sulfurados no son accesibles al ataque microbiológico. Misari (2016) expresó:

La determinación del potencial de la muestra (mineral o material de desecho) a ser lixiviado por los microorganismos; realizar un análisis del contenido de azufre total, que al final será convertido a ácido sulfúrico. El siguiente paso es realizar una valoración a $\text{pH} = 2.3$ (pH óptimo para el T. Ferroxidans) con ácido sulfúrico, el mismo que será expresado como H_2SO_4 consumido / ton de mineral. Si el consumo de ácido en Kg/ton excede a la cantidad que, teóricamente, podría producir el material, puede ser considerado como no

productor de ácido. Por lo tanto, este material no será dócil a la lixiviación bacteriana (al menos no directamente, la adición de pirita o azufre elemental podría ayudar a vencer este problema). Si el consumo de ácido es menor que el ácido producido por el material, entonces se tratará de un material productor de ácido. Por lo tanto, el mineral o desecho será una fuente apropiada para la lixiviación bacteriana. (págs. 119-220)

Todas estas preparaciones permitirán que el desarrollo de este proceso se efectúe de manera rápida y exitosa, permitiendo el máximo nivel de optimización de la lixiviación bacteriana en la recuperación de minerales auríferos.

En la lixiviación microbiana existe cuatro métodos de estudio a nivel laboratorio. Misari (2016) afirmó: “Fundamentalmente, son cuatro métodos para el estudio de la lixiviación químico bacteriana estas son: Lixiviación en matraces Erlenmeyer sometidos a agitación; Lixiviación en reactor estacionario; Lixiviación en reactor continuo; Lixiviación en columna” (pág. 120). El empleo de cualquier método dependerá del interés del estudio.

Del proceso de lixiviación en pilas realizadas a través de lixiviación en columna se obtendrán datos más confiables sobre las condiciones reales del proceso. Misari (2016) expresa:

Para llevar a cabo estas pruebas el mineral se coloca dentro de las columnas; las cuales están formadas por un tubo de PVC de un diámetro apropiado. La parte inferior del tubo está provisto de una placa del mismo material perforada, de tal manera que sirva de soporte al mineral cargado y al mismo tiempo permita el paso de la solución impregnada. Para captar la solución impregnada

se requiere de un recipiente que debe estar colocado. La columna estará soportada por medio de barras o por un parante de hierro, lo cual debe ser de fácil manipuleo para cuando se quiera eliminar el mineral que ya ha sido lixiviado, quedando entonces lista para otra prueba. (pág. 134)

La lixiviación en pilas es uno de los métodos más usados ya que de ahí nace la concepción de lixiviación en columna, debido a que representa mejor dicho proceso.

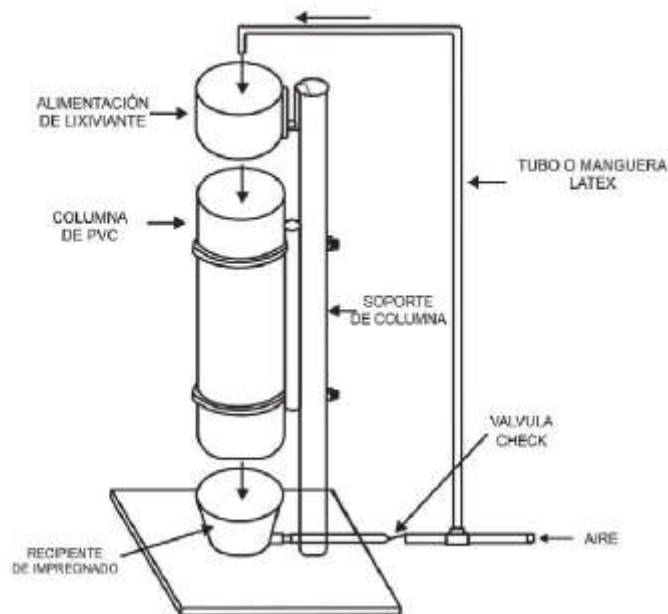


Ilustración 7: Columna de Lixiviación.

Fuente: (Misari, 2016)

Las pruebas de lixiviación en columnas son un proceso químico completo, la cual permite alcanzar con cierta confiabilidad factores de sumo interés que serán necesarios tomarlos en cuenta para una mejor efectividad del tratamiento. Misari (2016) menciona: “Dichos factores en mención son: Efecto del tamaño de partícula, Velocidad de extracción, Extracción total, Decrepitación del mineral, Migración del mineral, Formación de capas impermeables, Precipitación de sales de hierro férrico”.

(pág. 134). Cabe mencionar que el éxito dependerá de elaborar un diseño que posibilite alcanzar una solución rica de manera competente y eficiente convirtiéndose de esta manera en una lixiviación factible optimizando una exitosa recuperación del mineral.

El tamaño de las partículas juega un papel muy importante en la recuperación del mineral. Misari (2016) en la pág.135, menciona: “Comúnmente, los tamaños de partículas con los cuales se operan las columnas son los siguientes: - 1”, - 1” + 3/4”, - 3/4” + 1/2”, - 1/2” + 1/4”, - 1/4” + 10#, - 10#”. Es importante recalcar que a menor tamaño de la partícula se dará mejor resultado en la recuperación del oro, pero también traerá como consecuencia la disminución de la permeabilidad ocasionando problemas durante el tratamiento.

De acuerdo al tamaño de las partículas dependerá las dimensiones de las pilas para obtener mejor concentración de solución. Misari (2016) expresa lo siguiente:

Por otro lado, también se puede ver que, aunque el período de extracción del metal usando partículas grandes o pequeñas es aproximadamente el mismo; la concentración de las soluciones obtenidas difiere notablemente. Esto obligaría, en el caso de partículas grandes, a incrementar la altura de la pila y/o recircular las soluciones para obtener una solución más concentrada, adecuada para su tratamiento en una planta de cementación o extracción por solventes. En el caso de las partículas pequeñas, en cambio, la recirculación no es aconsejable y la altura de la pila no es su factor limitante. Sólo habría que cuidar la adecuada oxigenación de la pila construyéndola de una altura relativamente baja, entre 30 – 50 pies. En este caso, es necesario conocer el tamaño promedio de partículas y la distribución aproximada de los tamaños de partícula en

porcentaje de todo el cuerpo mineralizado. Como la extracción, velocidad de extracción, concentración de las soluciones y tiempo de lixiviación son conocidos para los principales tamaños de partícula; entonces, las concentraciones de las soluciones a obtenerse para una altura imaginaria pueden ser predecidas. En este punto, es aconsejable efectuar pruebas de columna con este tipo de mineral con distribución de partículas de tamaño promedio. (pág. 138)

Las dimensiones de las pilas es un punto importante en la optimización del tratamiento para la recuperación del metal, es decir a mas altura de la pila permitirá disminuir los costos de operaciones relacionadas al apilamiento e irrigación para un mismo tonelaje del mineral a estudiar al reducir la superficie de riego.

Para la extracción de oro de minerales refractarios se realiza entendiendo la mineralogía, es decir una vez comprendida se puede pronosticar si el componente se puede extraer por lixiviación directa o indirecta; para poder sobrellevar los problemas de procesamientos de minerales. Barriga (2019) menciona:

Menas que responden con baja recuperación por debajo de 80% a la cianuración de material normalmente molido son consideradas refractarias. Los métodos convencionales de tratar menas de oro son normalmente molienda entre 75 y 150 micrones, seguida de cianuración. De acuerdo a la naturaleza de la mena asociada recibirán diferentes tratamientos, para lo cual trataremos la mineralogía relacionada al posible tratamiento, clasificación de menas refractarias y luego los diferentes procesos para tratar menas refractarias de oro. (pág. 10)

Tabla 8

Tipos de Menas de Oro y su tratamiento.

Tipo	Tratamiento
Oro libre	Gravedad para gruesos y cianuración para finos.
Oro con sulfuros de hierro	Flotación de pirita, fundición o tostación, oxidación atmosférica, a presión o biológica, cianuración
Oro con As y/o Sb	Flotación, tostación, oxidación atmosférica, a presión o biológica, cianuración
Teleluros de oro	Flotación, tostación, oxidación química, cianuración
Oro con cobre	Fundición y electro-refinación de cobre donde los lodos anódicos contienen oro. Recientemente, sulfidización, acidificación, reciclado y espesamiento (SART: sulfidization, acidification, recycling and thickening)
Oro con Pb y Zn	Flotación, tratamiento de escorias o purificación de residuos electrolíticos de zinc
Menas carbonaceos	Oxidación, flotación, tratamiento de superficie o tostación previo a cianuración
Oro soluble en ríos y agua de mar	Resinas de intercambio iónico
Oro orgánico / biológico	Tostación, oxidación química, cianuración
Oro laterítico (plantas y animales)	Múltiples técnicas químicas

Fuente: Barriga (2019)

Nota: Amplia variedad de ocurrencias de oro y los diferentes procesos de tratamiento para diferentes tipos de menas se describen en Tabla 8.



Figura 8: Clasificación de Refractoriedad de Menas de Oro.

Fuente: Barriga (2019)

Los minerales refractarios están relacionados con sulfuros y arseniuros y son sometidos a tratamientos piroquímicos de tostación, calcinación y fusión para luego reducir y oxidar sus componentes. Morales (2014) afirma:

Los minerales refractarios, son aquellos que no permiten conseguir valores rentables en su respectiva recuperación por los métodos convencionales, como la cianuración (es menor del 80%). Por otro lado, también se consideran como

refractarios a los minerales que alcancen residuos o relaves con contenidos elevados de oro alrededor de 3 – 30 g/TM. La naturaleza de la refractariedad puede ser variada y es consecuencia de diversas causas entre las que pueden citarse las siguientes: Encapsulamiento físico: Encapsulamiento de partículas submicroscópicas de oro en la matriz de sulfuros, lo que impide el contacto entre el cianuro y el oro. Este tipo de cierre es común en menas portadoras de sulfuros tales como pirita y arsenopirita. Consumo excesivo de cianuro: La presencia de sulfuros y compuestos cianicidas propicia la pasivación de la reacción durante la cianuración, ya que consumen excesivo cianuro y oxígeno. Limitación de oxígeno: ciertos iones entre los que se encuentran el ion ferroso, el ion sulfuro, ion sulfato, entre otros, tienden a consumir el oxígeno cuando están disueltos, lo que limita la cantidad de este elemento, fundamental para el proceso de cianuración. (págs. 3-4)

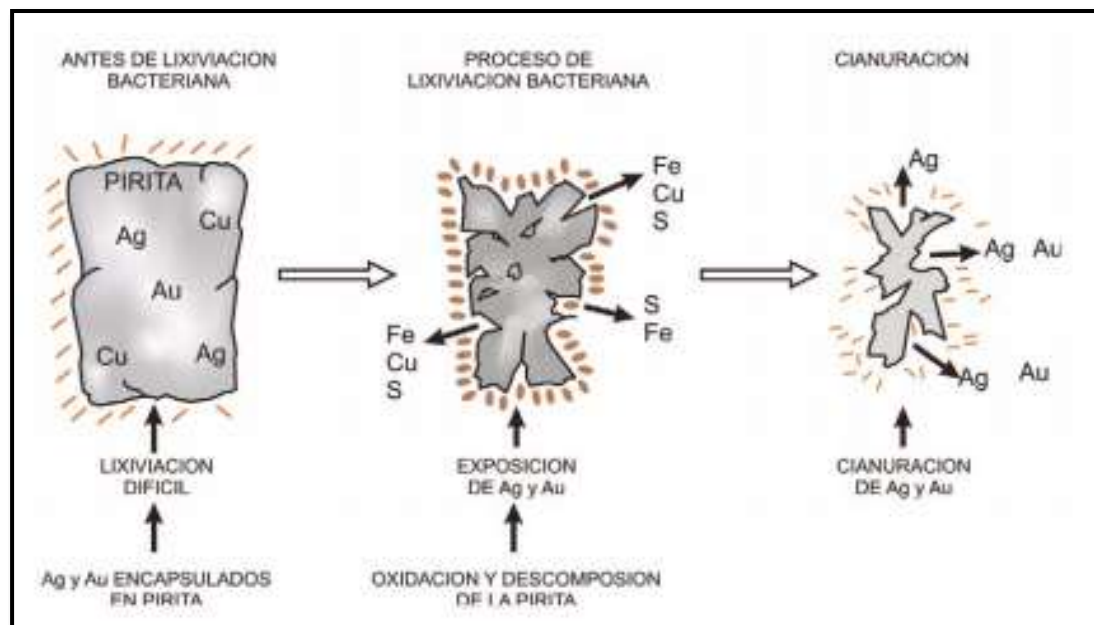


Figura 9: Esquema que representa la liberación de la Plata y el Oro

Fuente: Misari, 2016

El proceso de cianuración es una técnica metalúrgica para la extracción de oro, contiene soluciones de cianuro de sodio y también de potasio las cuales tiene el poder de disolución tanto en oro como en plata. Morales (2014) afirmó:

La cianuración es el proceso electroquímico de disolución de oro, plata y algunos otros componentes que se encuentran en una mena aurífera, mediante el uso de una solución alcalina de cianuro, que forman aniones complejos de oro, estables en condiciones acuosas. El rango de operación al cual se da una cianuración efectiva está definido por un intervalo restringido de pH con valores superiores a 9,34 como parámetro de seguridad. El proceso global inicia con la disolución del oxígeno en el seno de la solución cianurada, luego se da el transporte del oxígeno y cianuro hacia la interface líquido-sólido donde se da la adsorción en la matriz mineral y las reacciones electroquímicas que permiten la formación de complejos estables. Finalmente se da la desorción del complejo de aurocianuro formado y su transporte al seno de la solución. (pág. 22)

Es importante mencionar la que cianuración debe tener una disolución preferencial a raíz de los metales preciosos presentes en los minerales procesados.

En el proceso de lixiviar con cianuro requiere de diferentes factores que permita la extracción de minerales refractarios en altos niveles. Morales (2014) afirma:

La disolución del oro en una solución alcalina de cianuro dependerá de varios factores como: El efecto de la concentración, en donde la razón de disolución del oro en soluciones cianuradas, aumenta linealmente con la concentración de cianuro hasta que se alcanza un máximo, por lo que, si se produce un

incremento adicional de la concentración del cianuro, causaría un efecto retardante en la cantidad de disolución del oro. El efecto de la concentración de oxígeno, en el que tenemos que este indicador es difícil de controlar, ya que es limitada la solubilidad de oxígeno en agua bajo condiciones atmosféricas, por lo cual es necesario aplicar métodos para incrementar la concentración de oxígeno disuelto como: Inyección de aire en el proceso de lixiviación a baja presión e inyección de oxígeno puro, aire enriquecido con O_2 H_2O_2 . El efecto del pH y alcalinidad, para prevenir pérdidas excesivas de cianuro por hidrólisis el proceso de cianuración se lleva a cabo a valores de pH superiores de 9.4. En algunos casos la velocidad de disolución de oro puede disminuir con el incremento de pH, ya que aumenta la velocidad de las reacciones que interfieren como son la descomposición de sulfuros y otras especies. El efecto del área superficial del oro y tamaño de Au, la velocidad de disolución del oro aumenta al tener menor tamaño de partícula, por lo que al decrecer el tamaño de la partícula se incrementa las reacciones de competencia de otros elementos, por lo que se debe hallar un tamaño de partícula óptimo que establezca la mejor relación entre recuperación de oro y consumo de cianuro y oxígeno. El efecto de agitación, la disolución del oro está controlada por el fenómeno de transporte de masa y depende del espesor de la capa de difusión, por lo cual, si se incrementa la agitación, se aumenta la velocidad de disolución. (págs. 26-27-28)

En la actualidad las empresas mineras han optado por este proceso metalúrgico ya que registra un alto nivel de eficiencia.

Algamarca es un centro poblado ubicado en el distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, región de Cajamarca, a 3033 msnm. Science for a changing world-USGS (2016) expresa:

Las minas de Algamarca, están situadas a más o menos 25 km en línea recta hacia el oeste de la ciudad de Cajabamba, prov. de Cajabamba, dpto. de Cajamarca. partiendo de la ciudad de Trujillo, las minas son accesibles por medio de la carretera Trujillo - Huamachuco - Cajabamba - casa hacienda Araqueda - Algamarca con un recorrido total de 300 km. En la geología estructural localmente, El Cerro Algamarca está formado por un perfecto anticlinal, constituido por cuarcitas, habiendo desaparecido por efectos de la erosión los estratos de pizarras y calcáreos. se pueden ver varios diques de traquita que cortan los estratos de pizarra y/o cuarcita. (pág. 1)

La roca que predomina en la región es sedimentaria, se observan estratos de cuarcita, pizarras y calcáreos con bastantes pliegues y fallas.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la recuperación del oro en minerales refractarios por Lixiviación bacteriana a partir con cepas Mesófilas y Termófilas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la lixiviación bacteriana a partir de cepas mesófilas y termófilas para la recuperación de oro en minerales refractarios de Algamarca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar por medio del análisis químico la ley de oro, azufre y hierro del mineral en estudio en las fracciones -1/2" +1/4", -1/4" + 10M, -10M+ 48M y – 48M.
- Evaluar la Oxidación de minerales refractarios con bacterias Mesófilas y Termófilas en la recuperación de oro.
- Comparar la biooxidación a diferentes temperaturas y el efecto en la posterior lixiviación del oro.
- Estimar la concentración del hierro soluble en las columnas de biooxidación a diferente temperatura durante todo el proceso.
- Analizar los valores del Potencial de Oxidación-Reducción (Eh) y el pH de la solución con la temperatura de incubación de las columnas.
- Evaluar la recuperación de oro de los minerales refractarios oxidados con bacterias mesófilas y termófilas.

1.4. Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

La lixiviación bacteriana, utilizando cepas Mesófilas y Termófilas recupera el oro entre el 85 % y 95% en minerales refractarios de Algamarca.

1.4.2 Hipótesis Específicas

- Por medio del análisis químico del mineral en estudio en las fracciones - 1/2” + 1/4”, -1/4” + 10M, -10M+ 48M y - 48M, se determinará la ley de oro, azufre y hierro.
- Durante la incubación de las bacterias Mesófilas y Termófilas se evaluará la Oxidación de los minerales refractarios.
- La variación de la temperatura para la biooxidación dependerá del tipo de bacteria para medir el efecto del pretratamiento del mineral refractario.
- La variación de temperatura durante todo el proceso nos permitirá estimar la concentración del hierro soluble en las columnas de biooxidación.
- Con la variación de temperatura de incubación de las columnas se podrá analizar los valores del Potencial de Oxidación-Reducción (Eh) y el pH.
- Utilizando bacterias mesófilas y termófilas se evaluará la recuperación de oro de los minerales refractarios de Algamarca.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

(Sampieri, Fernández, & Baptista, 2014) indica que “la investigación puede cumplir dos propósitos fundamentales: a) producir conocimiento y teorías (investigación básica) y b) resolver problemas prácticos (investigación aplicada)”. Por lo tanto, el tipo de investigación es aplicada por lo que nos centramos en el análisis y solución del problema de varias índoles de la vida real; asimismo, requiere obligatoriamente de un marco teórico, sobre el cual se basó para generar una solución al problema específico que se quería resolver.

El tipo de investigación es experimental a nivel de laboratorio con el propósito de obtener información respecto al problema planteado, se manipuló de manera intencional la variable independiente (Lixiviación bacteriana con cepas Mesófilas y Termófilas), para evaluar las consecuencias sobre la variable dependiente (Recuperación de oro en minerales refractarios). Se incubaron en columnas de lixiviación, bacterias mesófilas y termófilas, con el mineral refractario.

Tabla 9

Factores y Niveles para el Diseño Experimental

Condiciones	Temperatura de biooxidación	Recuperación de oro, %	
	°C	Grueso, - 1/2"	Pulverizado
		CN	CIL
Control	NA	R1	R2
Biooxidado con cepas mesófilas.	23-24	R3	R4
Biooxidado con cepas mesófilas	35	R5	R6
Biooxidado con cepas termófilas	50	R7	R8
Biooxidado con cepas hipertermófilas	60	R9	R10
Biooxidado con todas las cepas.	Variable 23-60-23	R11	R12

Fuente: Propia

2.2. Población y muestra

2.2.1 Población:

Las cepas de bacterias mesófilas y termófilas, las cuales están asociadas a la oxidación de minerales auríferos refractarios en las minas de la Región Cajamarca.

2.2.2 Muestra:

Las cepas de bacterias mesófilas y termófilas, las cuales están asociadas a la oxidación de minerales auríferos refractarios de la mina Algamarca.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron la observación, la experimentación y el análisis documental:

- Con la observación se pudo visualizar el tipo y el estado del mineral, los drenajes ácidos de mina, los reactivos a utilizar, las bacterias que se utilizaron en las pruebas de laboratorio y los fenómenos de la prueba de la biolixiviación y Lixiviación con cianuro.
- En el análisis documental se recolectó información de los tipos de bacterias asociadas a la biooxidación de minerales sulfurados y a metales preciosos con la propiedad de refractariedad, como es el caso del oro y la plata, también se buscó información del tamaño del mineral para facilitar la biooxidación, así como también de los tipos de reactivos y equipos para las pruebas de experimentación en el laboratorio y por último se hizo la búsqueda y recolección de investigaciones antecesoras a esta, que presenten los mismos factores de estudio que se están tratando, para de esta forma darle sustento y respaldo a la investigación realizada.

- Con la experimentación se monitoreó las pruebas con las cepas, en el proceso de incubación, adaptación y crecimiento, controlando tiempos, consumo de reactivos, temperatura del medio, consumo de material, nivel de acidez del agua, % de recuperación final del oro. Para la realización de las pruebas de laboratorio se utilizaron los siguientes equipos, instrumentos y materiales:

a) Equipos

- Balanza Analítica
- Incubadora con agitación orbital
- Espectrofotómetro UV-Visible
- Microscopio
- Calculadora
- Peachímetro
- centrifugadora.

b) Instrumentos

- malla 10 y 48
- Columnas de lixiviación
- bomba de aire
- Material de laboratorio común.

c) Materiales

- Para la recuperación del mineral se utilizaron como reactivos el cianuro.
- agua desionizada.
- Levadura

- Para la adaptación de bacterias: fosfato de potasio monobásico, sulfato de magnesio heptahidratado, sal de amonio, el magnesio (sulfato de magnesio), fosfato ácido de potasio.

2.4. Procedimiento

Pretratamiento de Biooxidación

Se realizaron pruebas en columna para comparar la biooxidación a diferentes temperaturas y el efecto en la posterior lixiviación del oro. Para el control de la temperatura se establecieron columnas con camisa de agua y baños de agua circulante (baño María). Las respectivas columnas se controlaron a temperatura ambiente (20-23°C), 35°C, 50°C, 60°C y variaron en el rango (20-23°C, 35°C, 50°C y 60°C) con un incremento de temperatura gradual cada dos semanas, seguido de una disminución gradual equivalente. Se enterró un termistor en el mineral de cada columna para monitorear la temperatura interna.

El mineral usado para las pruebas fue extraído de la unidad minera de Algamarca, cada columna contenía 10 Kg. de mineral triturado al 100% pasando 1/2 pulgada y se utilizó la siguiente inoculación: (1) columnas a 20°-23°C y 35°C, cultivo convencional en laboratorio de *Thiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* (2) columna a 50°C, bacterias de tipo *Sulfobacillus* moderadamente termofílicas que oxidan el hierro;(3) columna a 60°C, archaea hipertermofílica, *Acidianus* y especies de la Metalósfera;(4) una mezcla igual de todo lo anterior para la columna de temperatura variable.

Controles de pH, Eh y calibración de equipos.

Para la medición de pH, antes de leer las muestras, el pH metro digital se debe colocar en un vaso con una solución amortiguadora que tiene pH 7. Luego en un vaso de precipitado se vacía un volumen de 50 ml de cada solución de cada columna, se introduce el electrodo en la muestra de tal manera que no toque el fondo, agitando el electrodo, se realiza la medición anotando las lecturas de pH en el display del equipo. Para una adecuada medición del pH, se recomienda calibrar el pH metro con soluciones buffer 4,7y 10, ajustando el pH en el equipo. La calibración debe hacerse antes de realizar cualquier medición al inicio de la jornada. Para el control del pH en las pruebas ejecutadas, estas mediciones se realizaron semanalmente.

Para la medición del potencial Reducción (Eh) se utilizó con el mismo equipo multifuncional para medición del pH, pero en este caso con un electrodo especial para la medición del Eh, se registraron los datos en mili voltios (mv). Al proceso complementario de oxidación – reducción se le conoce como Redox y el valor ORP es la medida del potencial de Oxidación – Reducción. Para el control del Eh estas mediciones se realizaron semanalmente.

Los certificados de calibración de estos equipos no existen porque son de uso manual y no computarizados, y no son registrados en archivo por la empresa minera en estudio donde se realizaron las pruebas.

Monitoreo de Biooxidación

El licor de biooxidación circulante de cada columna se controlaba de forma convencional semanalmente para el pH, Eh y la valoración de las especies de hierro.

Las temperaturas de la columna se registraron diariamente, cinco veces por semana.

Cada dos semanas se tomaban muestra sin contaminar de las soluciones de biooxidación en los respectivos puntos de descarga de las columnas, para estimar la densidad de las poblaciones microbianas. Se prepararon diluciones seriadas de cada muestra para su incubación a 30°, 50° y 60°C. Se utilizó la solución de sales basales MKM con una fuente de energía de hierro ferroso. Los cultivos de dilución a 50° y

60°C se complementaron con un extracto de levadura al 0,02% (w/v) para facilitar el crecimiento de cualquier termófilo presente. Además, los cultivos de dilución a 60°C se complementaron con alrededor de 0,1 g de FeS₂ para facilitar el crecimiento de los hipertrófilos.

Procedimientos de lixiviación

Se utilizaron procedimientos de lixiviación en botellas para determinar la posible recuperación de oro tras el pretratamiento por biooxidación en las condiciones respectivas. Se simuló una lixiviación en botellas a 96 horas con el mineral grueso a menos 1/2 pulgada. La concentración inicial de cianuro fue de 0,33 g NaCN/L sin carbón activado. El proceso de lixiviación se simuló con mineral biooxidado triturado hasta aproximadamente P₈₀ de malla menos 200 y lixiviado durante 24 horas con 0,33 g NaCN/L y 15 g de carbón activado/L.

Prueba de Hipótesis

- H₀: El método de lixiviación bacteriana, con bacterias Mesófilas y Termófilas como paso previo a la recuperación de Oro en Minerales Refractarios por lixiviación con cianuro NO aumenta la recuperación de los mismos.
- H₁: El método de lixiviación bacteriana, con bacterias Mesófilas y Termófilas como paso previo a la recuperación de Oro en Minerales Refractarios por lixiviación con cianuro aumenta la recuperación de los mismos.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

El mineral que se utilizó como fuente de energía y de alimento para las bacterias, correspondió a muestras de la veta mina artesanal, de la Asociación de Mineros artesanos de Algamarca, distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca.



Figura 10: Localización de la Minera Algamarca.

Fuente: Problemática Ambiental Caso Algamarca- RENAMA 2009.

Las aguas ácidas de las cuales se realizó los cultivos de las bacterias fueron extraídas de la bocamina Prosperidad, localizada en el pasivo ambiental San Nicolás, en la Provincia de Hualgayoc, Departamento de Cajamarca.

3.1 Análisis químico de la ley de oro, azufre y hierro del mineral en estudio en las fracciones -1/2” +1/4”, -1/4” + 10M, -10M+ 48M y – 48M.

Tabla 10

Análisis químico de la muestra del mineral aurífero refractario.

Valores del ensayo de cabeza de muestra de 3 minerales para fracciones de pantalla y compuestos					
Muestra	AuFA oz/tc	AuCN Oz/tc	S - Total %	Fe %	
-1/2 +1/4 Pulg.	0.061	0.015	2.26	1.69	
-1/4 pulg + malla 10	0.080	0.029	2.17	1.67	
-10+ malla 48	0.135	0.087	2.32	1.69	
Malla - 48	0.213	0.136	2.82	1.85	

Fuente: Laboratorio químico de la empresa minera en estudio.

Nota: La tabla que se muestra presenta valores altos de oro en el análisis químico realizado por fundición (AuFA) en la malla -48, así mismo en esta malla el oro cianurable (AuCN) es de 0.136 Oz/tc.

3.2 Oxidación de sulfuros con bacterias Mesófilas y Termófilas en la recuperación de oro.

Oxidación de sulfuros con bacterias Termófilas frente a la recuperación de oro

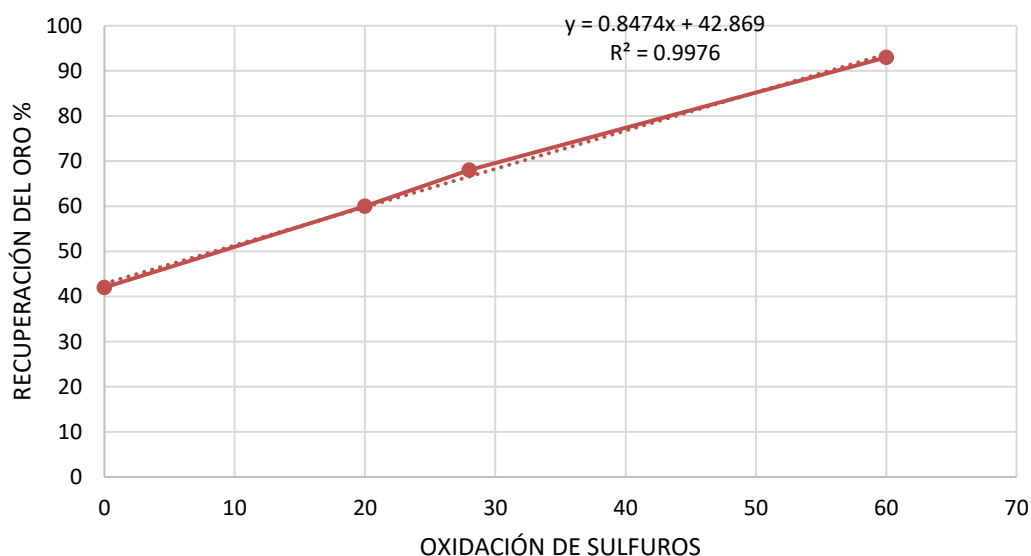


Figura 11: Recuperación de oro vs. oxidación de sulfuros.

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: La oxidación de sulfuros con las bacterias, presentan una regresión positiva en función de la recuperación de oro; es decir a medida que aumenta la oxidación de sulfuros también aumenta la recuperación de oro. Esta regresión tiene una tendencia lineal donde el 99.77 % se ajustan al modelo. En la gráfica se observa que sin bacterias (0% de biooxidación) la recuperación del oro fue del 43%, luego con 20% de la biooxidación la recuperación del oro se incrementó al 60%, y cuando la oxidación se incrementó al 60% la recuperación de oro se incrementó al 93%.

3.3 Biooxidación a diferentes temperaturas

Tabla 11

Temperaturas de las muestras del mineral con bacterias en las columnas.

Tiempo - Días	T° AMBIENTE	35°C	50°C	60°C	T° VARIABLE
0					
1	22.20	34.20	49.20	59.40	21.90
8	23.80	34.60	50.20	59.70	22.90
15	23.60	34.70	50.10	60.50	21.50
22	23.90	34.20	50.90	60.30	32.70
29	24.00	33.70	50.80	60.00	32.90
36	25.20	34.90	51.00	59.80	50.00
43	26.80	35.00	51.00	59.80	49.70
50	26.10	35.00	51.10	60.70	58.30
57	25.50	34.90	52.20	59.70	59.00
64	25.70	34.90	51.50	59.80	50.00
71	25.20	34.80	51.40	59.70	50.00
78	24.40	34.90	51.20	59.60	35.00
85	25.10	35.10	51.40	59.70	35.00
92	24.80	35.20	51.50	59.50	23.00
99	24.30	35.00	51.80	58.30	23.00

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: La tabla contiene las temperaturas obtenidas durante el proceso de biooxidación, el cual duró exactamente 99 días y se tuvieron en total 5 columnas, las cuales tenían 10 kg de mineral pulverizado y con un grupo distinto de cepas. Las columnas en que se trabajó a 20-23°C y 35°C, contenían cultivo de *Thiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, la columna a 50°C tenía bacterias de tipo *Sulfobacillus*, la columna a 60°C tenía archaea hipertermófila y la quinta columna que se trabajó a T° variable contenía una mezcla igual de todo lo anterior.

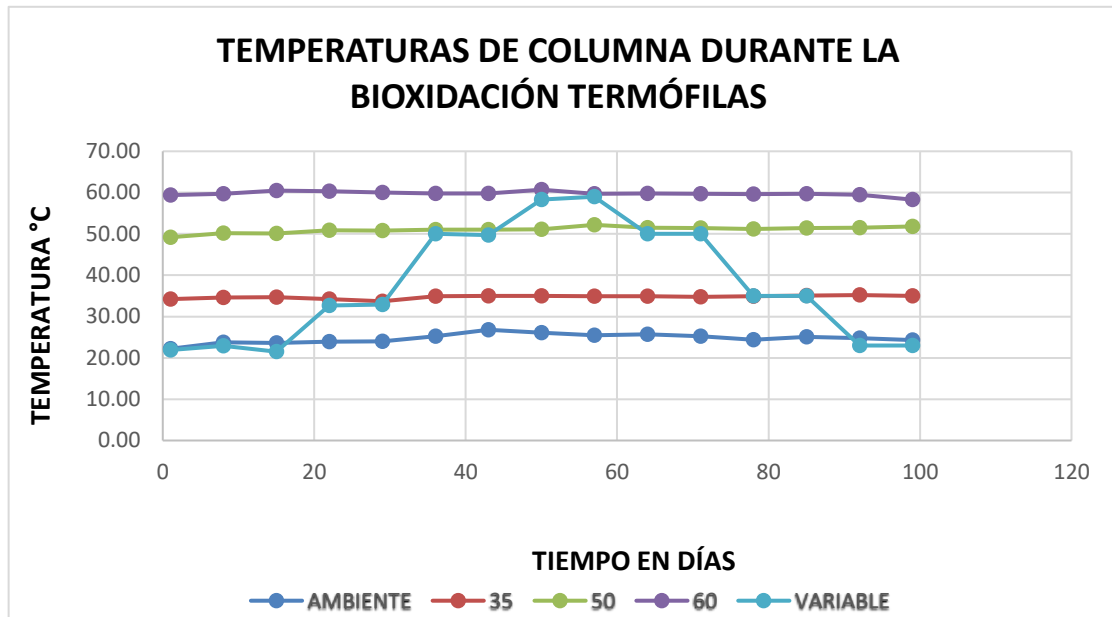


Figura 12: Temperaturas de las muestras del mineral con bacterias en las columnas.

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: Las desviaciones de temperatura con respecto a los límites establecidos se debieron a fallos transitorios en los baños de agua de control de la temperatura. La columna de temperatura variable fue la que mostró la mayor variabilidad, debido a que intencionalmente se incrementó la T° en forma escalonada a 60°C y luego se le disminuyó con el objetivo de medir el efecto de la sobrevivencia de las bacterias al cambio de temperatura.

3.4 Concentración del hierro soluble en las columnas de biooxidación a diferente temperatura.

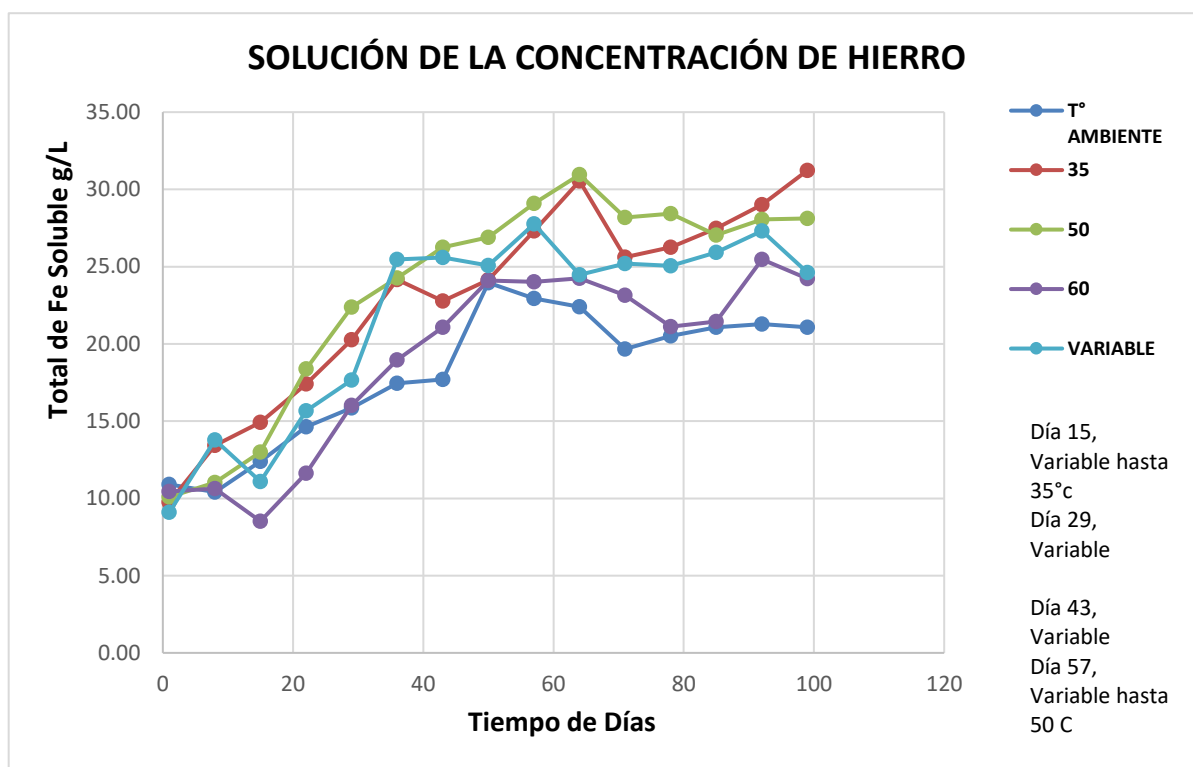
Tabla 12

Concentración de Hierro soluble.

Tiempo - Días	T° AMBIENTE	Total de Fe Soluble g/L			
		35°C	50°C	60°C	T° VARIABLE
0					
1	10.90	9.76	10.09	10.44	9.10
8	10.41	13.44	11.03	10.64	13.79
15	12.40	14.92	12.99	8.52	11.08
22	14.64	17.40	18.39	11.63	15.66
29	15.86	20.27	22.37	16.02	17.66
36	17.44	24.17	24.26	18.96	25.47
43	17.69	22.78	26.26	21.07	25.59
50	23.96	24.14	26.89	24.10	25.07
57	22.94	27.32	29.09	24.02	27.76
64	22.41	30.55	30.95	24.24	24.48
71	19.67	25.62	28.17	23.14	25.19
78	20.52	26.26	28.43	21.11	25.06
85	21.07	27.48	27.05	21.45	25.92
92	21.29	29.00	28.05	25.47	27.31
99	21.08	31.23	28.11	24.22	24.62

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: Esta tabla nos muestra la producción de hierro soluble producto de la actividad bacteriana sobre la pirita que contenía el mineral utilizado en la prueba para los ensayos en el proceso de biooxidación. Se tiene una mayor significancia aproximadamente en el día 64, ya que se observó una clara estabilización de los crecientes resultados. La menor concentración de hierro soluble se produjo con la columna a temperatura variable, aunque la solubilización parecía haber terminado a temperaturas más altas.



Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: En esta figura se muestra el aumento del hierro soluble total debido a la biooxidación de la pirita. Los datos sugieren que el pretratamiento de biooxidación logró una oxidación efectiva de la pirita expuesta hacia el día 64, cuando el aumento de hierro soluble tendió a estabilizarse. Este fenómeno parece ser independiente de la temperatura. Las concentraciones finales de hierro soluble total pueden haber sido influenciadas por la temperatura, ya que las concentraciones aumentaron de unos 21 a 31 g de Fe/L.

3.5 Potencial de Oxidación-Reducción (Eh) y el pH de la solución con la temperatura de incubación de las columnas.

Tabla 13

Valores del Potencial de Oxidación - Reducción (Eh).

TIEMPO - DÍAS	T° AMBIENTE	Eh (mV)			
		35°C	50°C	60°C	T° VARIABLE
0					
1	449.50	430.00	393.70	376.70	455.00
8	555.80	570.30	433.50	390.20	533.10
15	654.90	684.60	483.50	411.10	576.00
22	651.40	670.60	505.70	456.00	625.30
29	676.80	684.20	507.80	514.60	585.20
36	662.20	642.40	510.20	510.20	512.50
43	672.30	675.30	515.00	567.00	530.40
50	644.50	662.00	520.20	576.50	471.60
57	640.80	673.30	514.40	591.30	508.90
64	649.10	672.90	527.60	594.90	534.10
71	662.90	682.50	557.00	615.60	563.90
78	642.10	670.80	562.20	601.50	656.50
85	655.20	672.00	559.50	608.40	653.00
92	650.80	675.50	578.20	611.80	660.50
99	667.20	690.80	588.80	615.90	681.10

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: Esta tabla contiene los valores monitoreados del potencial redox durante el proceso de biooxidación de las 5 muestras en las columnas tratadas a distintas temperaturas, demostrándose que la temperatura es un indicador importante, ya que a menor T° el potencial redox se incrementó y esto desfavorece a las bacterias termófilas que trabajan con mayor temperatura.

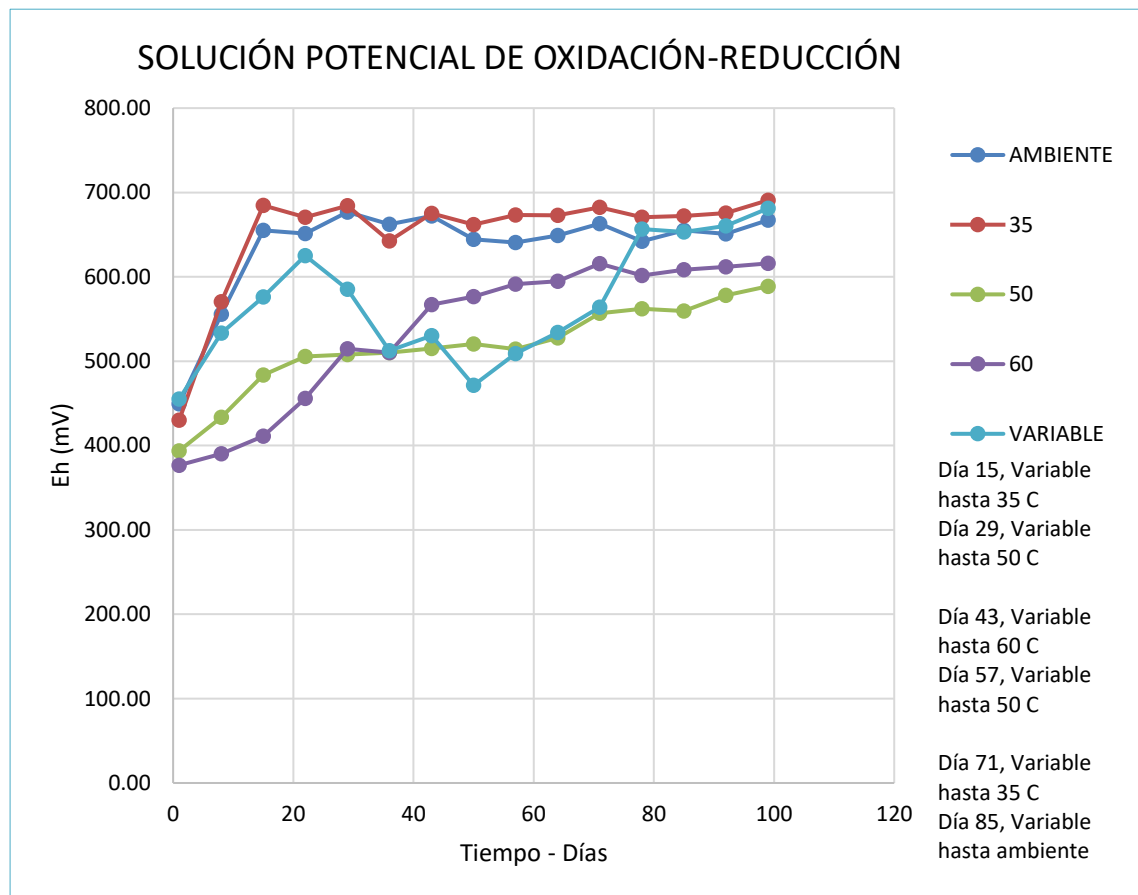


Figura 14: Valores del Eh en las muestras.

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: Esta gráfica nos muestra el comportamiento del Eh presente en las muestras durante el proceso de biooxidación, en la que la temperatura parece tener un efecto sobre el potencial redox, ya sea por causas físico-químicas o microbiológicas. Las columnas de mayor temperatura operan con valores redox más bajos. El aumento de la temperatura de la columna de temperatura variable dio lugar a una disminución del potencial redox durante los periodos a 50 y 60°C. La disminución de la temperatura en la columna de la temperatura variable a 35°C y a temperatura ambiente, dio lugar a un aumento del potencial redox.

Tabla 14

Valores del pH en las muestras.

TIEMPO - DÍAS	T° AMBIENTE	pH			T° VARIABLE
		35°C	50°C	60°C	
0					
1	1.67	1.55	1.45	1.43	1.76
8	1.72	1.63	1.44	1.36	1.75
15	1.64	1.52	1.52	1.40	1.69
22	1.59	1.44	1.51	1.30	1.56
29	1.46	1.31	1.39	1.35	1.40
36	1.50	1.34	1.43	1.38	1.44
43	1.40	1.26	1.38	1.35	1.42
50	1.40	1.27	1.45	1.37	1.29
57	1.38	1.27	1.39	1.37	1.39
64	1.41	1.30	1.46	1.36	1.50
71	1.38	1.29	1.48	1.34	1.51
78	1.34	1.27	1.45	1.36	1.47
85	1.25	1.20	1.38	1.24	1.37
92	1.24	1.18	1.44	1.25	1.42
99	1.36	1.32	1.54	1.37	1.50

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: En esta tabla se tienen los valores de pH generados por las distintas cepas cultivadas en las 5 muestras para la simulación de la biooxidación a diferentes temperaturas, teniéndose valores favorables para el crecimiento de las bacterias, porque el pH no varió significativamente con el valor promedio.

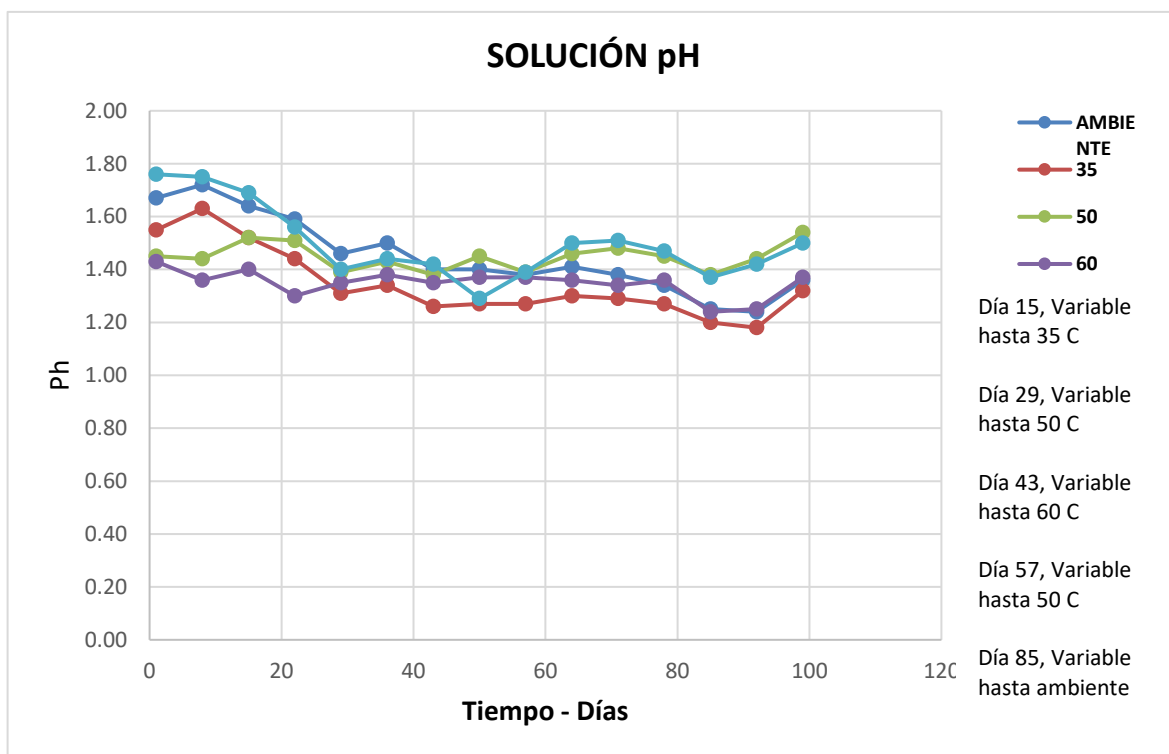


Figura 15: Valores del pH.

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: En esta figura se observa que el pH de las columnas de mayor temperatura, y de la columna de temperatura variable a mayor temperatura, tiene una tendencia a disminuir.

3.6 Recuperación de oro de los sulfuros oxidados con bacterias mesófilas y termófilas.

Tabla 15

Recuperación de Oro mediante biooxidación.

Condiciones	Temperatura de biooxidación °C	Extracción de oro, %	
		Grueso, - 1/2" CN	Pulverizado CIL
Control	NA	45.4	43.6
Biooxidado con cepas mesófilas.	23-24	67.8	88.5
Biooxidado con cepas mesófilas	35	72.8	91.5
Biooxidado con cepas termófilas	50	68.7	85
Biooxidado con cepas hipertermófilas	60	72.4	95.2
Biooxidado con todas las cepas.	Variable 23-60-23	69.2	85.3

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: En esta tabla se tiene los resultados de la recuperación de oro mediante la biooxidación en la que se obtuvo una mayor recuperación de oro utilizando el mineral de biooxidación pulverizado con carbón activado CIL, con valores del 95.2% utilizando cepas hipertermófilas; en un escenario estos resultados se podrían aplicar en una operación con molienda y ataque con bacterias. Los resultados de recuperación de oro en lixiviación en botellas utilizando solo cianuro de sodio sin carbón activado se obtuvo una recuperación del oro en 45.4%.

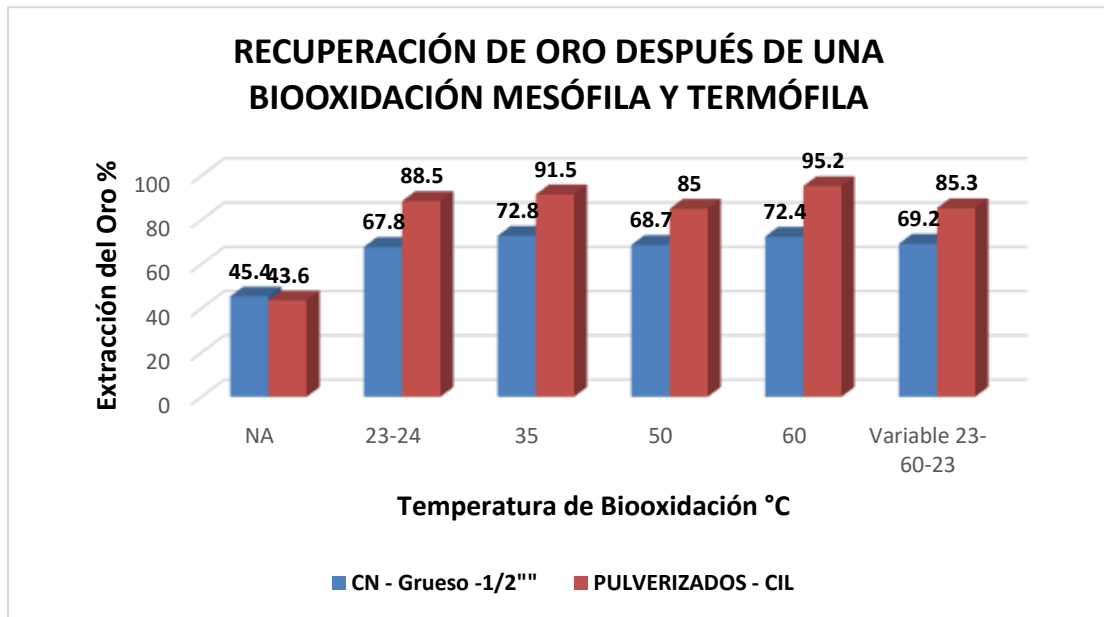


Figura 16: Recuperación de oro por biooxidación.

Fuente: Resultado de las pruebas de biooxidación.

Nota: En esta figura se muestra que las extracciones en la lixiviación en botella con respecto a las pruebas de lixiviación solo con cianuro, son del 45.4%, 67.8% y 72.8%, siendo la más alta la del mineral biooxidado a 35°C. La pulverización del mineral biooxidado aumentó la recuperación de oro desde un valor de referencia del 43.6%, 85% y 95.2%, siendo la recuperación más alta la del mineral biooxidado a 60°C.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Un aspecto fundamental para la recuperación de oro refractario es el estudio de la mineralogía de este, por lo que es muy importante realizar estudios físico químicos, y ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento del mineral bajo condiciones ideales de lixiviación, así mismo para conocer los minerales asociados a la muestra y la proporción de los minerales económicos en los granos entrelazados, razones por las que en primer instancia se realizaron dichos estudios a la muestra, la cual se obtuvo de la mina artesanal Algamarca; cabe mencionar que se hicieron pruebas por fundición y cianuración, también se analizaron el azufre y el hierro, de los que se lograron los siguientes resultados: la ley del mineral fue de 0.09 oz Au/ct, para las pruebas de fundición y cianuración en la malla -48, se obtuvo que el oro por fundición es de 0.213 oz Au/tc y los valores de oro cianurable fue de 0.136 Oz/tc, así como el de azufre que resultó de 2.82% y de hierro del 1.85%. Estos resultados confirman la investigación de Reyes, López, Alvarado, & Valencia (2016), que recalcan la importancia del estudio físico químico de la muestra, en la que estudiaron un mineral sulfurado de mineralogía compleja, el cual fue analizado químicamente por vía seca, vía húmeda y gravimetría respectivamente, de los cuales se tuvieron los siguientes resultados: 21.5g/TM de Au, 26.84% de Fe, 30.67% de S, ayudado por un análisis granulométrico a malla 200 y 325, reafirmando así que estos estudios son imprescindibles en todo proceso de recuperación de minerales, ya sean refractarios o no. Por lo tanto, se valida la hipótesis específica 1: por medio del análisis químico del mineral en estudio en las fracciones - 1/2” + 1/4”, -1/4” + 10M, -10M+ 48M y - 48M, se determinará la ley de oro, azufre y hierro.

El % de oxidación de sulfuros con las bacterias es un indicador muy importante ya que nos indica la acción de las bacterias frente a los minerales agregados al mineral de interés, en este caso frente a la pirita, en el cual obtuvimos que sin bacterias (0% de biooxidación) la recuperación del oro fue del 43%; luego con 20% de la biooxidación la recuperación del oro llegó al 60%, y cuando la oxidación fue al 60% la recuperación de oro se incrementó al 93%. Nuestros resultados confirman la investigación de Santos (2015), quien demostró que la oxidación de sulfuros por medio de la pirita, brinda resultados favorables para la recuperación de oro encapsulado; así mismo obtuvo que con la biolixiviación al 5%, pudo recuperar un 36% más frente a otros métodos convencionales de recuperación de oro. Por lo tanto, se valida la hipótesis específica 2: durante la incubación de las bacterias Mesófilas y Termófilas se evaluará la Oxidación de los minerales refractarios.

La temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes que condicionan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos, por lo cual es muy importante llevar un control intensivo de esta. El proceso de biooxidación duró exactamente 99 días y se tuvieron en total 5 columnas, las cuales tenían 10 kg de mineral pulverizado y con un grupo distinto de cepas. Las columnas en las que se trabajó a 20-23°C y 35°C, contenían cultivo de *Thiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, la columna a 50°C tenía bacterias de tipo *Sulfobacillus*, la columna a 60°C tenía archaea hipertermófila y la quinta columna que se trabajó a T° variable contenía una mezcla igual de todo lo anterior. La columna de temperatura variable fue la que mostró la mayor variabilidad, debido a que intencionalmente se incrementó la T° en forma escalonada a 60°C y luego se le disminuyó con el objetivo

de medir el efecto de la sobrevivencia de las bacterias al cambio de temperatura. Estos resultados confirman la investigación de Reyes, López, Alvarado, & Valencia (2016), demostraron que la temperatura es un factor determinante en la biooxidación de sulfuros, y en sus pruebas obtuvieron un mayor crecimiento bacteriano a 70°C que a 50°C, lo que se evidenció en la diferencia entre las variables medidas (pH, ORP, Fe (II), K y B/mL) entre la muestra testigo y los cultivos. A 70°C, crecieron aproximadamente 10 veces más las bacterias cultivadas con S°. Por lo tanto, se valida la hipótesis específica 3: la variación de la temperatura para la biooxidación dependerá del tipo de bacteria para medir el efecto del pretratamiento del mineral refractario.

Con respecto al Fe⁺², podemos decir que es el resultado de la actividad bacteriana, el cual es utilizado como nutriente para el crecimiento de la población bacteriana, por lo cual es de vital importancia medir los niveles de Fe⁺² presentes en las simulaciones de biooxidación. Debemos recalcar que se trabajó con cinco muestras en las cuales se llevó un control estricto de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados: las concentraciones se incrementaron 21 a 31 gramos de Fe/L, teniéndose una oxidación efectiva de la pirita expuesta hacia el día 64; cuando se aumentó el hierro soluble, tendió a estabilizarse. Nuestros resultados confirman la investigación que realizó Alvarez (2017), en el cual propone pruebas de biooxidación con Acidithiobacillus Ferrooxidans, las cuales fueron realizados a dos porcentajes diferentes de concentrado, a 8 y 12 %. La muestra del 8% de concentrado de arsenopirita, obtuvo un máximo de 1,6 g/L de ion Fe⁺³ aproximadamente; la muestra de 12 % de arsenopirita también alcanzó el máximo de 1,6 g/L de ion Fe⁺³; lo cual evidencia una óptima oxidación de los concentrados de la arsenopirita y por ende para el pretratamiento de minerales

auríferos refractarios. Por lo tanto, se valida la hipótesis específica 4: la variación de temperatura durante todo el proceso nos permitirá estimar la concentración del hierro soluble en las columnas de biooxidación.

En relación con los parámetros para un óptimo crecimiento bacteriano, tenemos al Eh y al pH, los cuales son indispensables para el crecimiento y sobrevivencia de las bacterias, así como para la biolixiviación de los metales pesados, por lo cual es muy importante tener un registro de la producción de ambos parámetros. En el caso del Eh, cuyo valor indica el potencial de reducción de las bacterias durante la oxidación del mineral, en esta investigación se realizaron muestras para tomar los datos de este importante parámetro, teniendo un valor inicial de 390 mv, para alcanzar los niveles óptimos de 700 mv. Por otro lado, el pH, se evaluó semanalmente en las 5 columnas en las que se simuló la biooxidación y se obtuvieron los siguientes resultados que van desde 1.18 hasta 1.76, así como que se observó que el pH de las columnas de mayor temperatura, y de la columna de temperatura variable a mayor temperatura, tendía a ser más bajo, reflejando la hidrólisis del Fe^{+3} , lo que resulta en la producción de ácido a temperaturas más altas. De tal forma que esta investigación guarda cierto vínculo con los estudios realizados por investigadores previos, que indican que el potencial redox, es un parámetro de que la biolixiviación se está realizando y de que hay que tener en cuenta la presencia de ion Fe^{+2} , el cual, al estar presente en el cultivo en grandes concentraciones, puede ser perjudicial para los microorganismos Alvarez, (2017). Además, Gamboa, (2015) precisa que la tendencia de pH decreciente indica la prueba del avance del proceso bioquímico, teniendo en cuenta que los iones H^+ son producto principal del mecanismo indirecto de la biooxidación. Por lo tanto, se valida

la hipótesis específica 5: Con la variación de temperatura de incubación de las columnas se podrá analizar los valores del Potencial de Oxidación-Reducción (Eh) y el pH.

En cuanto a la recuperación del oro de los sulfuros oxidados con bacterias mesófilas y termófilas, se midió haciendo una simulación a través de dos muestras, una con mineral grueso a -1/2" tratado con cianuro, en el que se obtuvo una recuperación del 45.4% y la otra muestra con mineral pulverizado y tratado con las bacterias y carbón activado, se obtuvo una recuperación del 95.2%. Así pues, demostramos que esta investigación guarda correlación con investigaciones previas de otros autores, los cuales indican que la recuperación de oro logra el 90,6 %, considerando el 8 % de sólidos y el consorcio de bacterias. Alvarez, (2017). Así mismo Reyes, López, Alvarado, & Valencia, (2016) señalan que las más altas extracciones de oro y plata se obtienen cuando el mineral de cabeza es molido a 81% -m200 y con biooxidación tratado posteriormente por cianuración, obteniéndose extracciones del 65% y 73.22% respectivamente. Por último, en la investigación de Gamboa (2015), logró demostrar que la biooxidación del mineral como pretratamiento a la cianuración favoreció la disolución de oro y plata, aumentando la recuperación desde 75% a 93% y desde 68% hasta 99% respectivamente. De esta forma se demuestra que la biolixiviación es una metodología altamente eficiente para la recuperación de minerales auríferos refractarios. Por lo tanto, se valida la hipótesis específica 6: utilizando bacterias mesófilas y termófilas se evaluará la recuperación de oro de los minerales refractarios de Algamarca.

4.2 Conclusiones

Se concluye que la recuperación de oro en minerales refractarios por lixiviación bacteriana de cepas mesófilas y termófilas, recupera un 95.2% del oro a una temperatura de 60°C utilizando cepas de bacterias hipertermófilas. Este tipo de lixiviación es una metodología innovadora ya que utiliza agua contaminada por el drenaje ácido de mina, la cual fue utilizada como medio de obtención de dichas bacterias; cabe mencionar que para el cultivo de estas cepas se utilizaron los medios enriquecedores como el 9k y MKM, siendo estos vitales para la solubilización de los sulfuros presentes en la muestra (pirita). La biooxidación del mineral de oro se realizó mediante lixiviación por columnas, las cuales fueron sometidas a diferentes temperaturas durante un periodo de 100 días que duró el tratamiento, así mismo se llevó un control de los principales parámetros de oxidación por parte de las bacterias (Eh, pH, T° y concentración del hierro soluble). Por lo tanto, también se valida la hipótesis general: la lixiviación bacteriana utilizando cepas Mesófilas y Termófilas recupera el oro entre el 85 % y 95% en minerales refractarios de Algamarca. Con estos resultados experimentales también se valida la prueba de hipótesis alterna H1: El método de lixiviación bacteriana, con bacterias Mesófilas y Termófilas como paso previo a la recuperación de Oro en Minerales Refractarios por lixiviación con cianuro aumenta la recuperación de los mismos.

El análisis físico-químico de la muestra fue de gran relevancia para el estudio de la mineralogía, la cual nos ayudó a conocer la proporción de mineral económico en los sulfuros asociados a la muestra, así como también determinar el comportamiento de

los minerales asociados al oro en cuanto a condiciones de lixiviación convencionales, por lo cual, para el análisis de la muestra, fue sometida a trituración para ser pasada por malla $-1/2 + 1/4$ Pulg., de la cual se realizaron dos simulaciones de recuperación de mineral, se concluye que la ley de oro por fundición fue de 0.061 Oz Au/tc. y de la muestra sometida por cianuración se obtuvo una recuperación de 0.015 Oz Au/tc, siendo los valores más bajos obtenidos durante el proceso; a comparación de los valores obtenidos con la malla -48 registraron una mayor recuperación, con una ley de cabeza de 0.213 Oz Au/tc., se obtuvo una recuperación por cianuración de 0.136 Oz Au/tc. Concluyéndose también así que mientras más fino se triture el mineral mayor recuperación de oro se obtendrá.

Se concluye que, a mayor oxidación de los sulfuros, la recuperación del oro será mayor, ya que durante el monitoreo de la biooxidación se obtuvo que, en la prueba de recuperación de oro sin el uso de bacterias, este valor fue muy bajo con un 43%, y conforme vaya aumentando el porcentaje de la biooxidación, la recuperación de oro será incrementada, por lo que a un 60% de la oxidación de sulfuros se obtuvo una recuperación de oro de un 93%.

Se concluye que la temperatura resulta un factor muy importante en el crecimiento de la población bacteriana y de la oxidación de los sulfuros, mineral refractario. Este tratamiento se llevó a cabo en 5 columnas de lixiviación las cuales estuvieron sometidas a diferentes temperaturas: la primera y segunda columna se trabajaron a temperatura ambiente (20°C - 23°C) y 35°C las cuales tuvieron cepas de bacterias *Thiobacillus ferroxidans* y *Leptospirillum Ferroxidans*; la tercera columna expuesta

a 50°C contenía bacterias del tipo *Sulfobacillus*, la cuarta columna expuesta a 60°C tenía cepas del tipo archaea hipertermófila, la quinta columna se trabajó a temperatura variable con una mezcla de todas cepas antes mencionadas. También se concluye que la columna de temperatura variable presentó mayor variabilidad, ya que se manipuló intencionalmente la temperatura con el objetivo de medir el efecto de la sobrevivencia de las bacterias al cambio de temperatura.

Se concluye que la actividad bacteriana en el proceso de biooxidación a diferentes temperaturas demostró que la concentración de hierro soluble se verá incrementada por la biooxidación de la pirita, lográndose una mayor oxidación de esta a partir del día 64, debido a que se registró una estabilización de la producción del hierro soluble por acción de las bacterias sobre el sulfuro; cabe indicar que la temperatura es un elemento principal para el aumento de dichas concentraciones de unos 21 a 31 gramos de Fe/L.

Se concluye que, durante el proceso de biooxidación de las 5 columnas a diferentes temperaturas, el Eh aumentará o disminuirá, en función a la temperatura; es decir que a menor T° el Eh aumenta, por lo contrario, a mayor T° el Eh disminuye. De lo que se puede concluir que los microorganismos termófilos operan a un Eh más bajo, posiblemente a que sus sistemas de oxidación de hierro requieren mayores concentraciones de Fe⁺² que las bacterias mesófilas oxidantes de hierro. Esto daría lugar a una mayor relación entre el ion Fe⁺² y el ion Fe⁺³, con un menor Eh asociado. Con respecto al pH de la solución se mantuvo en un rango favorable para el crecimiento de las bacterias oxidantes de minerales a lo largo de la experimentación,

en el cual se vio reflejado que el pH de la columna de mayor temperatura y de la columna de la temperatura variable a mayor temperatura tenía una tendencia a disminuir, lo cual reflejó la hidrólisis del hierro férrico, resultando en la producción de ácido, a las temperaturas más altas.

Por último, se concluye, que se obtuvo una mayor recuperación de oro, utilizando el mineral de biooxidación pulverizado con carbón activado en un proceso de carbón en lixiviación (CIL), en el cual se obtuvo recuperaciones de oro del 95.2% utilizando cepas hipertermófilas; a diferencia de la lixiviación en botellas utilizando solo cianuro de sodio sin carbón activado se obtuvo una recuperación del oro en 45.4%, 67.8% y 72.8%, siendo la más alta la del mineral biooxidado a 60°C. La pulverización del mineral biooxidado aumentó la recuperación de oro desde un valor de referencia del 43.6%, 85% y 95.2%, siendo la recuperación más alta la del mineral biooxidado a 60°C.

REFERENCIAS

- Alvarez, J. (2017). *Evaluación de la Biooxidación de Concentrado Arsenopíritico Aurífero por Pretratamiento con Bacterias Quimiolitotrofas Acidófilas que Mejoren la Recuperación del oro por Cianuración en la Empresa Minera Eminsol S.A Bolivia - 2015*. Obtenido de Repositorio UNJBG: http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/2487/1035_2017_alvarez_cuarite_jm_fain_ingenieria_metalurgica_materiales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arias, V., Coronado, R., Puente, L., & Lovera, D. (2015). *Refractariedad de concentrados Auríferos*. Obtenido de Sisbib UNMSM: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol8_n16/a01.pdf
- Barriga, A. (2019). *Estudio De La Extracción De Oro De Concentrados Refractarios Mediante El Proceso Albión*". Obtenido de Repositorio UNSA: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9069/IMbavia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro, C. (2016). *Interacción de una arquea termófila con la superficie mineral y su influencia en la biolixiviación de minerales*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/>: https://www.researchgate.net/publication/303566403_Interaccion_de_una_arquea_termofila_con_la_superficie_mineral_y_su_influencia_en_la_biolixiviacion_de_minerales

- Codelco. (2017). *Biolixiviación, Bacterias como Piedras*. Obtenido de Codelco: https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004857/biolixiviaci__n_media_t__cnico_060119.pdf
- Fernández, P., & Pérez, M. (2007). *Archeobacterias Hipertermófilas: Vida en Ebullición*. Obtenido de Revistas UCM: <http://revistas.ucm.es/index.php/RCCV/>.
- Gamboa, A. (2015). *Evaluación del efecto de la biooxidación como pretratamiento a la cianuración de un mineral refractario del distrito minero Vetas California Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Idrogo, J., Mego, C., Monzón, P., & Sanchez, H. (2017). *Informe de la Mina de Algamarca*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Jaque, I. (2012). *Estudio de Lixiviación de Pirita por un cultivo de *Sulfobacillus acidophilus* a 45°C*. Obtenido de Repositorio UChile: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104398/cf-jaque_il.pdf?sequence=3&isAllowed=
- López, F. (2014). *Biolixiviación de un Concentrado de MoS₂ con Bacterias Termófilas extremas en nuevos reactores biológicos*. Obtenido de <http://132.248.9.195:> <http://132.248.9.195/ptd2014/febrero/0707998/0707998.pdf>
- Mamani, W. (2018). *Caracterización y Tratamiento de Efluentes de Aguas Ácidas en la Mina La Rinconada*. Obtenido de Repositorio UNAP:

http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/11993/Mamani_Chipana_Wilfredo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Manuel, D. (2016). *Biolixiviación de Cobre por Bacterias Ferrooxidans a partir de Calcopirita en un sistema de Columnas de Lixiviación por Gravedad*. Obtenido de Repositorio UNSA: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/1826/BImacrdr.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Misari, F. (Octubre de 2016). *Biolixiviación, Tecnología de la lixiviación Bacteriana de Minerales*. Obtenido de Osinergmin: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf

Misari, F. (2016). *Tecnología de la Lixiviación Bacteriana en Minerales*. . Obtenido de <https://www.osinergmin.gob.pe/>: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf

Morales, A. (2014). *Procesamiento de un Mineral Aurífero Refractario Polisulfurado para la Recuperación de Oro*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Pandura, I., & Peña, M. (2015). *Aislamiento de Cepas de Acidithiobacillus Ferrooxidans para la Recuperación de Metales de Minerales Sulfurados*. Obtenido de Repositorio UNCP: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3745/Pandura%20Trinidad-Pe%C3%B1a%20Quispealaya.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Perez, N. (2016). *Aislamiento y determinación de bacterias biooxidantes del género Acidithiobacillus Leptospirillum presentes en las aguas residuales de las unidades mineras de Recuay – Huaraz*. Obtenido de Repositorio URP: http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/urp/914/P%C3%A9rez_nm.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pérez, N. (2016). *Aislamiento y Determinación de bacterias biooxidantes del género Acidithiobacillus yLeptospirillum presentes en las aguas residuales de las unidades mineras de Recuay – Huaraz*. Obtenido de Repositorio URP: http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/urp/914/P%C3%A9rez_nm.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reyes, López, Alvarado, & Valencia, R. &. (2016). *Biolixiviación de Minerales Auríferos Refractarios de la Compañía Minera Sayapullo S.A.* Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
- Rivera, R., Camejo, P., Moya, F., López, J., & Munguía, M. (2011). *Estudio de Biolixiviación de un Mineral de Sulfuros de Cobre de Baja Ley con Bacterias Tio - y Ferro-oxidantes en Condiciones Termófilas*. Obtenido de Revista de Ingeniería UDA.: <http://www.revistaingenieria.uda.cl/Publicaciones/260009.pdf>
- Romero, A., & Flores, S. (2 de Junio de 2010). *La influencia de la velocidad de agitación en la lixiviación dinámica de minerales alterados*. Obtenido de Sisbib UNMSM:

http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v12_n24/pdf/a14v12n24.pdf

Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación 6ta Edición*. McGraw-Hill Education.

Santos, R. (2015). *Evaluación de cuatro métodos para la Recuperación del oro a partir de un Mineral Refractario*. Obtenido de Cimav Repositorio Institucional:

<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2314/1/ROCIO%20Tesis%20maestria.pdf>

Science for a changing world-USGS. (2016). *Algamarca*. Obtenido de Science for a changing world-USGS: https://mrdata.usgs.gov/mrds/show-mrds.php?dep_id=10007773

ANEXO

ANEXO 1: Monitoreo de las pruebas de lixiviación bacteriana.

COMPARACIÓN DE LA BIOOXIDACIÓN TERMÓFILA							Comentarios
Fecha	Hora/ Día	Temperatura de prueba de la columna				Variable	
		Ambiente	Temperaturas de la columna, C°				
			35	50	60		
21/07/2020	0	21.30	19.90	19.20	19.50	17.90	
22/07/2020	1	22.20	34.20	49.20	59.40		
23/07/2020	2	24.50	34.40	50.50	59.70	23.10	
26/07/2020	5	23.50	34.40	50.40	59.20	22.30	
28/07/2020	7	24.30	34.60	50.40	59.70	23.10	
29/07/2020	8	23.80	34.60	50.20	59.70	22.60	
30/07/2020	9	24.30	34.70	50.40	59.80	22.60	
2/08/2020	12	22.90	34.60	50.00	59.60	20.50	
3/08/2020	13	23.20	34.80	50.10	62.60	21.50	
4/08/2020	14	23.80	34.60	50.10	60.60	21.70	
5/08/2020	15	23.60	34.70	50.10	60.50	21.50	
6/08/2020	16	24.20	34.70	50.10	60.70	22.30	
9/08/2020	19	24.00	34.40	45.20	60.40	32.90	50 °C col. mal funcionamiento durante el fin de semana
10/08/2020	20	24.20	34.30	48.20	60.30	32.90	
11/08/2020	21	23.50	34.30	51.10	60.40	32.90	
12/08/2020	22	23.90	34.20	50.90	60.30	32.70	
13/08/2020	23	23.30	34.10	50.90	60.20	32.90	
16/08/2020	26	23.10	33.90	50.80	60.10	32.80	
17/08/2020	27	24.00	33.90	50.90	60.00	32.90	
18/08/2020	28	24.30	33.80	50.90	60.10	32.90	
19/08/2020	29	24.00	33.70	50.80	60.00	32.90	
20/08/2020	30	24.50	33.60	51.10	60.10	47.10	Pérdida de potencia durante la noche del 24 al 25
23/08/2020	33	24.50	33.60	50.90	60.10	48.90	
23/08/2020	34	24.30	33.60	50.70	59.90	50.00	
25/08/2020	35	27.00	35.10	51.30	60.20	50.10	
26/08/2020	36	25.20	34.90	51.00	59.80	50.00	
27/08/2020	37	25.50	35.00	51.20	60.00	50.00	
30/08/2020	40	25.80	35.00	51.00	59.70	49.90	
31/08/2020	41	26.40	35.00	51.10	59.70	49.70	
1/09/2020	42	26.50	35.00	51.10	59.80	49.80	
2/09/2020	43	26.80	35.00	51.00	59.80	49.70	
3/09/2020	44	25.70	34.90	50.90	59.70	58.20	
7/09/2020	48	25.80	35.00	50.90	49.90	58.00	60 °C col. mal funcionamiento durante el fin de semana
8/09/2020	49	25.70	34.90	30.40	60.70	58.20	50°C col. mal funcionamiento de la bomba
9/09/2020	50	26.10	35.00	51.10	60.70	58.30	
10/09/2020	51	26.20	34.90	51.20	60.60	59.10	
13/09/2020	54	25.80	34.90	51.20	60.50	58.70	
14/09/2020	55	25.50	34.90	51.00	60.50	58.60	
15/09/2020	56	25.20	34.90	51.20	60.40	56.00	Var. col. Fallo del termistor, temperatura controlada desde el baño de circulación
16/09/2020	57	25.50	34.90	51.20	59.70	59.00	
17/09/2020	58	27.20	35.20	51.60	60.00	50.00	
20/09/2020	61	25.70	34.90	51.70	59.90	50.00	
21/09/2020	62	24.90	34.90	51.70	59.80	50.00	
22/09/2020	63	25.70	34.90	51.70	59.80	50.00	
23/09/2020	64	25.70	34.90	51.50	59.80	50.00	
24/09/2020	65	25.60	34.80	51.60	59.90	50.00	
27/09/2020	68	25.40	34.80	51.50	59.80	50.00	
28/09/2020	69	24.50	34.90	51.60	59.80	50.00	
29/09/2020	70	25.20	34.80	51.40	59.70	50.00	Pérdida de energía durante el día
30/09/2020	71	24.20	18.20	34.40	39.50	39.00	Restablecimiento del suministro eléctrico.
1/10/2020	72	25.00	34.90	51.40	59.80	35.00	
4/10/2020	75	24.50	34.90	52.00	59.80	35.00	
5/10/2020	76	24.60	34.80	51.80	59.70	35.00	50°C col. mal funcionamiento de la bomba.
6/10/2020	77	24.60	34.90	46.60	59.70	35.00	
7/10/2020	78	24.40	34.90	51.20	59.60	35.00	
8/10/2020	79	24.60	34.90	50.90	59.50	35.00	
11/10/2020	82	24.20	35.00	51.00	59.40	35.00	
12/10/2020	83	24.90	34.90	50.90	59.70	35.00	
13/10/2020	84	24.50	35.10	51.30	59.60	35.00	
14/10/2020	85	25.10	35.10	51.40	59.70	35.00	
18/10/2020	89	23.90	35.20	51.50	59.50	23.00	
19/10/2020	90	24.90	35.20	51.50	59.50	23.00	
20/10/2020	91	24.00	35.30	51.50	59.70	23.00	
21/10/2020	92	24.80	35.20	51.50	59.50	23.00	
22/10/2020	93	24.30	35.30	51.50	59.60	23.00	
25/10/2020	96	23.80	35.30	51.80	59.90	23.00	
26/10/2020	97	24.20	35.10	52.00	59.60	23.00	
27/10/2020	98	24.60	35.00	51.90	58.40	23.00	
28/10/2020	99	24.30	35.00	51.80	58.30	23.00	Biooxidación terminada para la lixiviación.

DATOS DE LA COLUMNA DE BIOOXIDACIÓN		Colocación de la columna	Comentarios	
Número de columna:	20-3	Peso del mineral seco (g):	10(Kg)	Caudal 1,6 ml/min Aire 0,5 SCHF/hora
Número de lote de la muestra:	20-07-12	Peso del mineral de flotación en seco (g):	n/a	Añadido 0.4 g/L (NH4)2SO4 9/22/99 1g total
Descripción de la muestra: BDH III Carlin SSR - 1/2"		Mineral aglomerado no utilizado (g):	n/a	
		Altura de la columna (cm):	99.0	
		Solución en el depósito (mL):	2500	
		Columna cerrada		
Inóculo		Peso del mineral húmedo (g):	10.95 (kg)	
Inóculo:	T. Ferroxidans (Temperatura ambiente)	Altura de la columna (cm):	74.0	
Inóculo (mL):		Solución en el depósito (mL):	2500	
pH:	2.29			
Eh (mV):	654.5			
Fe II (mM,g/L):	1.9, .11			
Fe III (mM,g/L):	158.1, 8.83			
Fe Total (mM, g/L):	160.0,8.94			

Análisis de la solución de lixiviación												Solución añadida al depósito				
Fecha	Día	Temp	pH	Eh (mV)	Fe II (mM)	Fe II (g/L)	Fe III (mM)	Fe III (g/L)	Fe Total (mM)	Fe Total (g/L)	Ratio Fe III/Fe II	Fecha	Día	Vol. Inicial (mL)	MKM (mL)	H2O (mL)
07/21/2020	0													2500		
07/22/2020	1	22.20	1.67	449.50	91.40	5.10	103.70	5.79	195.10	10.90	1.10	07/22/2020	1	1471	1029	
07/29/2020	8	23.80	1.72	555.80	6.00	0.34	180.40	10.08	186.40	10.41	30.10	07/28/2020	7	2500		0
8/05/2020	15	23.60	1.64	654.90	1.90	0.11	220.20	12.30	222.10	12.40	115.90	8/04/2020	14	2289		211
8/12/2020	22	23.90	1.59	651.40	2.10	0.12	260.00	14.52	262.10	14.64	123.80	8/11/2020	21	2194		306
8/19/2020	29	24.00	1.46	676.80	2.30	0.13	281.70	15.73	284.00	15.86	122.50	8/18/2020	28	2284		216
8/26/2020	36	25.20	1.50	662.20	1.80	0.10	310.40	17.34	312.20	17.44	172.40	8/25/2020	35	2220		280
9/02/2020	43	26.80	1.40	672.30	2.60	0.15	314.10	17.54	316.70	17.69	120.80	9/01/2020	42	2258		242
9/09/2020	50	26.10	1.40	644.50	2.70	0.15	426.30	23.81	429.00	23.96	157.90	9/08/2020	49	2090		410
9/16/2020	57	25.50	1.38	640.80	2.40	0.30	408.40	22.81	410.80	22.94	170.20	9/15/2020	56	2390		110
9/23/2020	64	25.70	1.41	649.10	2.40	0.13	398.80	22.27	401.20	22.41	166.20	9/22/2020	63	2058		442
9/30/2020	71	25.20	1.38	662.90	2.50	0.14	349.70	19.53	352.20	19.67	139.90	9/29/2020	70	2228		272
10/07/2020	78	24.40	1.34	642.10	3.00	0.17	364.40	20.35	367.40	20.52	121.50	10/06/2020	77	2192		308
10/14/2020	85	25.10	1.25	655.20	2.40	0.13	374.90	20.94	377.30	21.07	156.20	10/13/2020	84	2316		184
10/21/2020	92	24.80	1.24	650.80	2.40	0.13	378.80	21.16	381.20	21.29	157.80	10/20/2020	91	1919		581
10/28/2020	99	24.30	1.36	667.20	2.60	0.15	374.80	20.93	377.40	21.08	144.20	10/27/2020	98	2400		100

Descripción de la columna		Colocación de la columna			Comentarios	
Número de columna:	20-4	Peso del mineral seco (g):	10(Kg)	Caudal 1,6 ml/min Aire 0,5 SCHF/hora		
Número de lote de la muestra:	20-07-12	Peso del mineral de flotación en seco (g):	n/a	Añadido 0.4 g/L (NH4)2SO4 9/22/99 1g total		
Descripción de la muestra: BDH III Carlin SSR - 1/2"		Mineral aglomerado no utilizado (g):	n/a			
		Altura de la columna (cm):	104.0			
		Solución en el depósito (mL):	2500			
		Columna cerrada				
Inóculo						
Inóculo:	T. Ferrooxidans (35°C)	Peso del mineral húmedo (g):	10.60 (kg)			
Inóculo (mL):		Altura de la columna (cm):	82.0			
pH:	1.74	Solución en el depósito (mL):	2500			
Eh (mV):	642.6					
Fe II (mM,g/L):	1.8, .10					
Fe III (mM,g/L):	12.35, .69					
Fe Total (mM, g/L):	14.15,.79					

Análisis de la solución de lixiviación												Solución añadida al depósito				
Fecha	Día	Temp	pH	Eh (mV)	Fe II (mM)	Fe II (g/L)	Fe III (mM)	Fe III (g/L)	Fe Total (mM)	Fe Total (g/L)	Ratio Fe III/Fe II	Fecha	Día	Vol. Inicial (mL)	MKM (mL)	H2O (mL)
07/21/2020	0													2500		
07/22/2020	1	34.20	1.55	430.00	128.50	7.18	46.20	2.58	174.70	9.76	0.40	07/22/2020	1	1347	1153	
07/29/2020	8	34.60	1.63	570.30	5.00	0.28	235.60	13.16	240.60	13.44	47.10	07/28/2020	7	2500		0
8/05/2020	15	34.70	1.52	684.60	1.60	0.09	265.60	14.83	267.20	14.92	166.00	8/04/2020	14	2094		406
8/12/2020	22	34.20	1.44	670.60	2.20	0.12	309.30	17.27	311.50	17.40	140.60	8/11/2020	21	2105		395
8/19/2020	29	33.70	1.31	684.20	2.00	0.11	360.90	20.16	362.90	20.27	180.50	8/18/2020	28	2260		240
8/26/2020	36	34.90	1.34	642.40	2.10	0.12	430.60	24.05	432.70	24.17	205.00	8/25/2020	35	2290		210
9/02/2020	43	35.00	1.26	675.30	2.40	0.13	405.40	22.64	407.80	22.78	168.90	9/01/2020	42	2146		354
9/09/2020	50	35.00	1.27	662.00	1.60	0.09	430.70	24.05	432.30	24.14	269.20	9/08/2020	49	2120		380
9/16/2020	57	34.90	1.27	673.30	2.30	0.13	486.90	27.19	489.20	27.32	211.70	9/15/2020	56	2168		332
9/23/2020	64	34.90	1.30	672.90	2.30	0.13	544.70	30.42	547.00	30.55	236.80	9/22/2020	63	1948		552
9/30/2020	71	34.80	1.29	682.50	2.40	0.13	456.40	25.49	458.80	25.62	190.20	9/29/2020	70	2085		415
10/07/2020	78	34.90	1.27	670.80	2.20	0.12	467.90	26.13	470.10	26.26	212.70	10/06/2020	77	2143		357
10/14/2020	85	35.10	1.20	672.00	2.20	0.12	489.80	27.36	492.00	27.48	222.60	10/13/2020	84	2021		479
10/21/2020	92	35.20	1.18	675.50	1.80	0.10	517.40	28.90	519.20	29.00	287.40	10/20/2020	91	2009		491
10/28/2020	99	35.00	1.32	690.80	2.50	0.14	556.60	31.09	559.10	31.23	222.60	10/27/2020	98	2149		351

DATOS DE LA COLUMNA DE BIOOXIDACIÓN

Descripción de la columna		Colocación de la columna		Comentarios	
Número de columna:	20-5	Peso del mineral seco (g):	10(Kg)	Caudal 1,6 ml/min Aire 0,5 SCHF/hora	
Número de lote de la muestra:	20-07-12	Peso del mineral de flotación en seco (g):	n/a	9/8/99 Falló de la bomba del baño perdió la temperatura durante la noche.	
Descripción de la muestra:	BDH III Carlin SSR - 1/2"	Mineral aglomerado no utilizado (g):	n/a	Añadido 0.4 g/L (NH4)2SO4 9/22/99 1g total	
		Altura de la columna (cm):	110.0		
		Solución en el depósito (mL):	2500		
Inóculo		Columna cerrada			
Inóculo:	<i>Termófilo Moderado (50°C)</i>	Peso del mineral húmedo (g):	10.80 (kg)		
Inóculo (mL):		Altura de la columna (cm):	84.0		
pH:	1.82	Solución en el depósito (mL):	2500		
Eh (mV):	602.3				
Fe II (mM,g/L):	3.2, .17				
Fe III (mM,g/L):	6.9, .39				
Fe Total (mM, g/L):	10.0, .56				

Análisis de la solución de lixiviación

Solución añadida al depósito																
Fecha	Día	Temp	pH	Eh (mV)	Fe II (mM)	Fe II (g/L)	Fe III (mM)	Fe III (g/L)	Fe Total (mM)	Fe Total (g/L)	Ratio Fe III/Fe II	Fecha	Día	Vol. Inicial (mL)	MKM (mL)	H2O (mL)
07/21/2020	0													2500		
07/22/2020	1	49.20	1.45	393.70	167.70	9.37	13.00	0.73	180.70	10.09	0.10	07/22/2020	1	1325	1175	
07/29/2020	8	50.20	1.44	433.50	132.00	7.37	65.50	3.66	197.50	11.03	0.50	07/28/2020	7	2500		0
8/05/2020	15	50.10	1.52	483.50	53.80	3.00	178.80	9.99	232.60	12.99	3.30	8/04/2020	14	1823		677
8/12/2020	22	50.90	1.51	505.70	38.00	2.12	291.20	16.26	329.20	18.39	7.70	8/11/2020	21	2159		341
8/19/2020	29	50.80	1.39	507.80	41.60	2.32	359.00	20.05	400.60	22.37	8.60	8/18/2020	28	2102		398
8/26/2020	36	51.00	1.43	510.20	41.10	2.30	393.20	21.96	434.30	24.26	9.60	8/25/2020	35	2162		338
9/02/2020	43	51.00	1.38	515.00	39.80	2.22	430.30	24.03	470.10	26.26	10.80	9/01/2020	42	2277		223
9/09/2020	50	51.10	1.45	520.20	31.20	1.74	450.20	25.14	481.40	26.89	14.40	9/08/2020	49	1790		710
9/16/2020	57	52.20	1.39	514.40	47.60	2.66	473.30	26.43	520.90	29.09	9.90	9/15/2020	56	2174		326
9/23/2020	64	51.50	1.46	527.60	28.50	1.59	525.60	29.35	554.10	30.95	18.40	9/22/2020	63	1795		705
9/30/2020	71	51.40	1.48	557.00	10.80	0.60	493.60	27.57	504.10	28.17	45.70	9/29/2020	70	1733		767
10/07/2020	78	51.20	1.45	562.20	8.90	0.50	500.10	27.93	509.00	28.43	56.20	10/06/2020	77	2058		442
10/14/2020	85	51.40	1.38	559.50	10.00	0.56	474.40	26.50	484.40	27.05	47.40	10/13/2020	84	1830		670
10/21/2020	92	51.50	1.44	578.20	6.60	0.37	495.70	27.68	502.30	28.05	75.10	10/20/2020	91	1767		733
10/28/2020	99	51.80	1.54	588.80	4.70	0.26	498.70	27.85	503.40	28.11	106.10	10/27/2020	98	1873		627

Descripción de la columna		Colocación de la columna	Comentarios
Número de columna:	20-6	Peso del mineral seco (g):	10(Kg) Caudal 1,6 ml/min Aire 0,5 SCHF/hora
Número de lote de la muestra:	20-07-12	Peso del mineral de flotación en seco (g):	n/a 9/7/99 fallo temporal durante el fin de semana.
		Mineral aglomerado no utilizado (g):	n/a Añadido 0.4 g/L (NH4)2SO4 9/22/99 1g total
		Altura de la columna (cm):	115.5
		Solución en el depósito (mL):	2500
	BDH III Carlin SSR - 1/2"	Columna cerrada	
Inóculo		Peso del mineral húmedo (g):	11.0 (kg)
Inóculo:	Termófilo Extremo (60°C)	Altura de la columna (cm):	82.0
Inóculo (mL):		Solución en el depósito (mL):	2500
pH:	1.82		
Eh (mV):	557.3		
Fe II (mM,g/L):	2.32, .13		
Fe III (mM,g/L):	7.16, .40		
Fe Total (mM, g/L):	9.49,.53		

Análisis de la solución de lixiviación												Solución añadida al depósito				
Fecha	Día	Temp	pH	Eh (mV)	Fe II (mM)	Fe II (g/L)	Fe III (mM)	Fe III (g/L)	Fe Total (mM)	Fe Total (g/L)	Ratio Fe III/Fe II	Fecha	Día	Vol. Inicial (mL)	MKM (mL)	H2O (mL)
07/21/2020	0													2500		
07/22/2020	1	59.40	1.43	376.70	179.10	10.00	7.90	0.44	187.00	10.44	0.00	07/22/2020	1	1230	1270	
07/29/2020	8	59.70	1.36	390.20	182.80	10.21	7.70	0.43	190.50	10.64	0.00	07/28/2020	7	1624		876
8/05/2020	15	60.50	1.40	411.10	123.20	6.88	29.30	1.64	152.50	8.52	0.20	8/04/2020	14	1441		1059
8/12/2020	22	60.30	1.30	456.00	113.60	6.34	94.70	5.29	208.30	11.63	0.80	8/11/2020	21	1710		790
8/19/2020	29	60.00	1.35	514.60	31.20	1.74	255.70	14.28	286.90	16.02	8.20	8/18/2020	28	1328		1172
8/26/2020	36	59.80	1.38	510.20	11.10	0.62	328.30	18.34	339.40	18.96	29.60	8/25/2020	35	1516		984
9/02/2020	43	59.80	1.35	567.00	7.30	0.41	369.90	20.66	377.20	21.07	50.70	9/01/2020	42	1881		619
9/09/2020	50	60.70	1.37	576.50	5.50	0.31	426.10	23.80	431.60	24.10	77.50	9/08/2020	49	1772		728
9/16/2020	57	59.70	1.37	591.30	4.10	0.23	425.90	23.79	430.00	24.02	103.90	9/15/2020	56	1723		777
9/23/2020	64	59.80	1.36	594.90	3.40	0.19	430.60	24.05	434.00	24.24	126.60	9/22/2020	63	1516		984
9/30/2020	71	59.70	1.34	615.60	2.40	0.13	412.00	23.01	414.40	23.14	171.70	9/29/2020	70	1411		1089
10/07/2020	78	59.60	1.36	601.50	3.40	0.19	374.60	20.92	378.00	21.11	110.20	10/06/2020	77	1616		884
10/14/2020	85	59.70	1.24	608.40	3.00	0.17	381.00	21.28	384.00	21.45	127.00	10/13/2020	84	1623		877
10/21/2020	92	59.50	1.25	611.80	3.00	0.17	453.00	25.30	456.00	25.47	151.00	10/20/2020	91	1323		1177
10/28/2020	99	58.30	1.37	615.90	3.00	0.17	430.70	24.05	433.70	24.22	143.60	10/27/2020	98	1641		859

DATOS DE LA COLUMNA DE BIOOXIDACIÓN

Descripción de la columna

Número de columna: 20-7
 Número de lote de la muestra: 20-07-12
 Descripción de la muestra: BDH III Carlin SSR - 1/2"

Colocación de la columna

Peso del mineral seco (g):
 Peso del mineral de flotación en seco (g):
 Mineral aglomerado no utilizado (g):
 Altura de la columna (cm):
 Solución en el depósito (mL):

10(Kg) Caudal 1,6 ml/min Aire 0,5 SCHF/hora
 n/a 9/7/99 fallo temporal durante el fin de semana.
 n/a Subió la temperatura a 35°C 8/6/99
 118.5 Aumento de la temperatura a 50°C 19/8/99
 2500 Aumento de la temperatura a 60°C 9/2/99

Comentarios

Inóculo

Inóculo: *Cultivo mixto de termófilos (temperatura variable)*
 Inóculo (mL):
 pH: 2.29
 Eh (mV): 654.5
 Fe II (mM,g/L): 1.9, .11
 Fe III (mM,g/L): 158.1, 8.83
 Fe Total (mM, g/L): 160.0,8.94

Columna cerrada

Peso del mineral húmedo (g):
 Altura de la columna (cm):
 Solución en el depósito (mL):

10.85 (kg) Bajó la temperatura a 50°C 16/9/99
 83.0 Bajó la temperatura a 35°C 30/9/99
 2500 Bajar la temperatura a ambiente
 Añadido 0.4 g/L (NH4)2SO4 9/22/99 1g total

Análisis de la solución de lixiviación

Solución añadida al depósito

Fecha	Día	Temp	pH	Eh (mV)	Fe II (mM)	Fe II (g/L)	Fe III (mM)	Fe III (g/L)	Fe Total (mM)	Fe Total (g/L)	Ratio Fe III/Fe II	Fecha	Día	Vol. Inicial (mL)	MKM (mL)	H2O (mL)
07/21/2020	0													2500		
07/22/2020	1	21.90	1.76	455.00	69.40	3.88	93.50	5.22	162.90	9.10	1.30	07/22/2020	1	1481	1019	
07/29/2020	8	22.90	1.75	533.10	4.20	0.23	242.80	13.56	247.00	13.79	57.80	07/28/2020	7	2500		0
8/05/2020	15	21.50	1.69	576.00	2.50	0.14	195.80	10.94	198.30	11.08	78.30	8/04/2020	14	1798		702
8/12/2020	22	32.70	1.56	625.30	2.30	0.13	278.10	15.53	280.40	15.66	120.90	8/11/2020	21	2335		165
8/19/2020	29	32.90	1.40	585.20	3.80	0.21	312.40	17.45	316.20	17.66	82.20	8/18/2020	28	2306		194
8/26/2020	36	50.00	1.44	512.50	35.80	2.00	420.20	23.47	456.00	25.47	11.70	8/25/2020	35	1911		589
9/02/2020	43	49.70	1.42	530.40	22.10	1.23	436.10	24.36	458.20	25.59	19.70	9/01/2020	42	2001		499
9/09/2020	50	58.30	1.29	471.60	141.60	7.91	307.30	17.16	448.90	25.07	2.20	9/08/2020	49	1774		726
9/16/2020	57	59.00	1.39	508.90	54.90	3.07	442.20	24.70	497.10	27.76	8.10	9/15/2020	56	1826		674
9/23/2020	64	50.00	1.50	534.10	21.70	1.21	416.60	23.27	438.30	24.48	19.20	9/22/2020	63	1668		832
9/30/2020	71	50.00	1.51	563.90	8.20	0.46	442.90	24.74	451.10	25.19	54.00	9/29/2020	70	2195		305
10/07/2020	78	35.00	1.47	656.50	2.10	0.12	446.60	24.94	448.70	25.06	212.70	10/06/2020	77	2178		322
10/14/2020	85	35.00	1.37	653.00	2.20	0.12	461.90	25.80	464.10	25.92	210.00	10/13/2020	84	2169		331
10/21/2020	92	23.00	1.42	660.50	2.70	0.15	486.30	27.16	489.00	27.31	180.10	10/20/2020	91	1740		760
10/28/2020	99	23.00	1.50	681.10	1.70	0.09	439.20	24.53	440.90	24.62	258.40	10/27/2020	98	2346		154