

Bio-oxidación Indirecta: Tratamiento de sulfuros refractarios de oro y plata

Aldo Castillo Chung, Msc.¹; Alexander Vega Anticona, Dr.²; César Arévalo-Aranda, Dr.³; Breitner Díaz Rodríguez Mg⁴; Iván Reyes López, Dr.⁵*

^{1,5}Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe, ireyes@unitru.edu.pe

²Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe

³Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, cesar.arevalo@upn.edu.pe

⁴Departamento de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de Trujillo, Perú, b.diaz@uct.edu.pe.

*corresponding author:

ireyes@unitru.edu.pe

[Av. Juan Pablo s/n. Phone 044 633952](mailto:ireyes@unitru.edu.pe)

Abstrac: In this research, the process of gold and silver extraction from a refractory gold-silver sulfide ore, sourced from the Gran Chimú Province in the La Libertad department of Peru, was evaluated. The extraction was carried out in two stages, the first being called indirect bio-oxidation, and the second involving conventional cyanidation. In the first stage, an acidic solution from the area was used to cultivate Thiobacillus ferrooxidans bacteria, which was promoted by the addition of salts (9K). The objective of this stage was the transformation of ferrous cations to ferric, which was evidenced by the color change of the acidic water to red. In the second stage, a solution of sodium cyanide and calcium oxide (lime) was used, and the total cyanidation time was 51 hours at an average pH of 10.5 and ambient temperature. The quantification of gold and silver was done through a dry method (fire assay). The evaluated process variables were the concentration of silver salt (0, 0.75, and 1.5 mg/g, mineral particle size (80% passing 100 mesh, 80% passing 200 mesh, and 80% passing 325 mesh), and temperature of indirect bio-oxidation (25, 45, and 65)°C. To evaluate the effect of the bio-oxidation pretreatment, conventional cyanidation tests were conducted, resulting in extraction percentages of 44.61% for gold and 48.98% for silver, using 80% passing 325 mesh particle size. This indicated the need for the mentioned pretreatment to release the gold and silver from the ore. Meanwhile, the extraction percentages using the two stages were 61.44% for gold (80% passing 325 mesh, 65°C, 0.0 mg/g) and 94.24% for silver (80% passing 200 mesh, 65°C, 0.75 mg/g) in the best cases, and 35.98% for gold (80% passing 100 mesh, 45°C, 0.0 mg/g) and 41.44% for silver (80% passing 100 mesh, 25°C, 0.0 mg/g) as the lowest recorded values..

Keywords: Indirect oxidation, mineral, Sulfide, Refractory.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Bio-oxidación Indirecta: Tratamiento de sulfuros refractarios de oro y plata

Aldo Castillo Chung, Msc.¹; Alexander Vega Anticona, Dr.²; César Arévalo-Aranda, Dr.³; Breitner Díaz Rodríguez Mg⁴; Iván Reyes López, Dr.¹*

^{1,5}Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, alrocas@unitru.edu.pe, ireyes@unitru.edu.pe

²Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avega@unitru.edu.pe

³Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Perú, cesar.arevalo@upn.edu.pe

⁴Departamento de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de Trujillo, Perú, b.diaz@uct.edu.pe

*corresponding author:

ireyes@unitru.edu.pe

Av. Juan Pablo s/n, Phone 044 633952

Resumen: En la presente investigación se evaluó el proceso de extracción de oro y plata a partir de un sulfuro refractario aurífero – argentífero, proveniente de la Provincia Gran Chimú, del departamento de La Libertad – Perú; la extracción se realizó en dos etapas, la primera se denominó bio-oxidación indirecta, mientras que en la segunda se realizó un proceso de cianuración convencional. En la primera etapa se utilizó una solución ácida de la zona, con la finalidad de cultivar la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, el cultivo se fomentó mediante la adición de sales (9K), el objetivo de la etapa fue la transformación del catión ferroso a férrico, ello se evidenció con el cambio de color del agua ácida hacia el rojo; en la segunda etapa se utilizó una solución de cianuro de sodio y óxido de calcio (cal viva), el tiempo de cianuración total fue de 51 horas a un pH promedio de 10.5 a temperatura ambiente. El proceso de cuantificación de oro y plata fue por vía seca (ensayo al fuego). Las variables del proceso de extracción evaluados fueron la concentración (0, 0.75 y 1.5) mg/g de sal de plata; granulometría del mineral (80% menos malla 100, 80% menos malla 200 y 80% menos malla 325) y la temperatura de bio-oxidación indirecta (25, 45 y 65)°C. A fin de evaluar el efecto del pre-tratamiento de bio-oxidación se realizó pruebas de cianuración convencional, para este caso se obtuvieron porcentajes de extracción de 44.61% y 48.98%, para el oro y la plata respectivamente, ello con una granulometría de 80% menos malla 325, esto indicó la necesidad de implementar el pretratamiento mencionado, a fin de liberar el oro y la plata del mineral. Mientras que los porcentajes de extracción utilizando las dos etapas fueron de 61.44% para el oro (80% menos malla 325; 65°C; 0.0 mg/g) y 94.24% para plata (80% menos malla 200; 65°C; 0.75 mg/g), en el mejor de los casos y 35.98% para el oro (80% menos malla 100; 45°C; 0.0 mg/g) y 41.44% para plata (80% menos malla 100; 25°C; 0.0 mg/g), como los mínimos registrados.

Palabras claves: Oxidación indirecta, mineral, Sulfuro, Refractario.

I. INTRODUCCION

En el área del Prospecto Cascajal, ubicado en el distrito de Lucma, provincia de Gran Chimú (región La Libertad), existen minerales argento-auríferos refractarios de alta ley que presentan dificultades para su explotación y beneficio

económico debido a su refractariedad y a la presencia de elementos contaminantes como As, Cu, S, Fe y Sb; los minerales de oro se clasifican principalmente en dos tipos, los denominados no refractarios y los refractarios; los minerales son refractarios cuando contienen oro y plata y no se pueden extraer de forma significativa los metales preciosos mediante métodos convencionales [1]; los minerales refractarios se pueden dividir en dos categorías geoquímicas: los minerales sedimentarios (oro libre), y los minerales hidrotermales, en los que el oro está asociado con sulfuros de carbono y compuestos de sílice [2]; ambos casos se consideran difíciles de recuperar, debido a la diseminación y encapsulamiento del oro y plata dentro de la matriz piritita y arsenopiritita del mineral; también es común usar el término refractario, cuando se refiere a los minerales de oro y plata cuya recuperación mediante el proceso de cianuración convencional es menor al 80% [3]. La evaluación de la posibilidad del beneficio de los minerales refractarios es importante debido entre otras causas al agotamiento creciente de los minerales de oro no refractarios y de la cantidad total de oro en todo el mundo que se encuentra en forma de mineral refractario [4]. Los minerales de oro refractarios carbonosos contienen tanto carbono orgánico e inorgánico por ello las rocas suelen ser oscuras (carbonosas), sedimentarias y diseminada [5]; estos minerales de oro se consideran refractarios porque el complejo de aurocianuro disuelto es atrapado por adsorción en la materia orgánica (carbono) que este posee; este fenómeno se denomina pre-robo [6].

Las investigaciones en este ámbito se centran en el análisis de la composición y en las propiedades de los minerales carbonosos, mientras que existen pocos estudios sobre el mecanismo de minerales carbonosos en lixiviación de oro con cianuro, debido a la finura (0.0022 μm), bajo ley, estado cristalino y amorfo del carbono, entre otros factores. [7]. Aparte de esto, los carbonatos, las formas de carbón de los minerales incluyen entre otros, carbono elemental, carbono orgánico, hidrocarburos y otras sustancias biológicas, el carbono elemental puede ser grafito o carbono amorfo. Las formas de carbono que más atrapan el oro son el carbono elemental y el

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

carbono orgánico, y más de la mitad del carbono orgánico es ácido húmico. El mecanismo del denominado pre-robo es similar al del carbón activado, mientras que el ácido húmico forma complejos con el oro por grupos funcionales [8, 9]. Generalmente, si el contenido de carbono orgánico está por encima del 0,2%, perturbará seriamente la cianuración del proceso de extracción de oro [4, 10]. La capacidad de pre-robo de los compuestos a base carbón se puede disminuir utilizando agentes de obturación como queroseno, diésel y algunos derivados de hidrocarburos aromáticos que se adsorben selectivamente y recubren la superficie de los compuestos a base carbón, y este método se conoce como proceso de inhibición de barrera. Las sustancias orgánicas pueden inhibir la actividad de pre-robo de los compuestos a base carbón al formar repulsión electrostática o adsorberse preferentemente en los sitios activos de la superficie [4,11,12]. Además, se pueden usar inhibidores con alto grado higroscópico para pasivar o eliminar el robo de carbono en los minerales de oro debido a la hidrofobicidad de la superficie de los compuestos a base carbón [13]. En el caso del uso de derivados de hidrocarburos, la separación sólido-líquido es difícil debido a que estos son más livianos que el agua después de la lixiviación.

La técnica tradicional empleado en minerales refractarios de oro y plata es la tostación de tipo oxidante, la cual es una técnica confiable para descomponer compuestos a base carbón y mejorar la eficiencia de lixiviación del oro, además de ser muy adaptable; esta técnica se aplicada a los concentrados de flotación, estos generan azufre, el cual promueve la formación de calcina porosa, esta última puede ser tratada por cianuración; sin embargo, la técnica también tiene desventajas, entre ellas témenos el alto consumo de energía, productos que contaminan el medio ambiente (gases que contienen azufre, arsénico, antimonio y mercurio); además el tostado excesivo fomenta la encapsulación física y el cierre de fisuras y poros que puede conducir al incremento del estado refractario; si las condiciones de incineración no se controlan adecuadamente, mejorará la actividad de los compuestos a base carbón y disminuirá aún más la tasa de lixiviación del oro [7]; la temperatura de tostado de los minerales de oro no puede exceder los 700 °C, de lo contrario el oro formará una aleación con el arsénico presente y se volatilizará fácilmente; el proceso es sensible a la presencia de pequeños contenidos de antimonio y plomo en el concentrado, pues su presencia reducen la permeabilidad necesaria de la calcina; se considera un proceso de alto costo, por lo que implementación en condiciones de altos volúmenes debería ser evaluada en términos de rentabilidad [14, 15, 16]; actualmente existen proceso de tostación diferentes al oxidante entre ellos témenos la tostación reductora y la tostación sulfurante, además de una serie de nuevas técnicas aplicadas a la tostación oxidante [15].

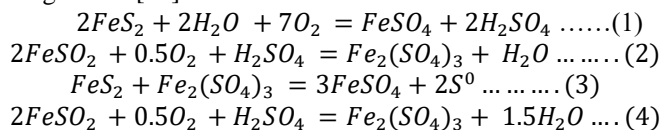
Otra técnica de tostación no tradicional evaluada, es vía microondas, en este caso los resultados mostraron que el efecto del tratamiento está relacionado con la potencia de microondas, el tiempo de procesamiento y las características de la muestra. El carbono es absorbente de la energía de microondas, por lo

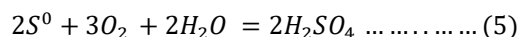
que puede calentarse y oxidarse rápidamente [12]; este método tiene ventajas, como la rápida velocidad de descarbonación, la alta velocidad de calentamiento y el bajo consumo de energía en comparación con el tostado convencional [17], sin embargo, estos beneficios por el momento solo están disponibles en escala laboratorio por la restricción de equipos.

A fin de mejorar los porcentajes de recuperación de oro y plata de los minerales refractarios, esto, están siendo evaluados mediante el uso de pretratamientos como es el caso de la bio-oxidación, en la cual se utilizan microorganismos, estos se pueden dividir en autótrofos inorgánicos y heterótrofos inorgánicos. En la actualidad, los microorganismos conocidos relacionados con el pretratamiento de bio-oxidación incluyen principalmente *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Sulfolobus acidocaldarius* de *Sulfolobus* y *Sulfobacillus sp.*, etc., y la mayoría de estas cepas son bacterias quimiolitotrofas [18]. *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans* son muy similares en morfología, fisiología y características bioquímicas, por lo que ambas bacterias se denominan *Thiobacillus ferrooxidans*. En los últimos años, algunas investigaciones han indicado que varias bacterias heterótrofas, actinomicetos y hongos como *Phanerochaete chrysosporium*, *Pseudomonadaceae*, *Streptomyces setonii* también podrían pasivar o descomponer los compuestos a base carbón de los minerales a utilizar. La mayoría de las cepas son de domesticación natural o artificial para el pretratamiento de bio-oxidación. Las bacterias quimiotróficas minerales como *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* no pueden oxidar eficientemente los compuestos a base carbón y su mecanismo puede ser la pasivación. El mecanismo con el uso de hongos sobre los compuestos a base carbón incluye principalmente pasivación, alcalinización, quelación y oxidación de radicales libres de enzimas biológicas [17,18].

La lixiviación bacteriana presenta ventajas sobre los métodos no biológicos, pues requiere poca inversión de capital (las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de mina); tiene bajos costos de operación necesarios para las operaciones hidrometalúrgicas en comparación con los procesos convencionales; el proceso no presenta contaminación ambiental, no da lugar a la formación de subproductos gaseosos; es flexible y puede utilizarse para tratar una diversidad de minerales sulfurados individuales o mezclas de minerales, incluyendo los minerales de baja ley, los que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales [19].

Si la bio-oxidación de minerales sulfurosos se lleva a cabo mediante la acción de bacterias como la *Thiobacillus ferrooxidans* y la *Thiobacillus thiooxidans*, el mecanismo sería el siguiente: [20]





Las ecuaciones (1) y (2) se denomina ataque directo microbiológico, mientras que las (3), (4) y (5) ataque indirecto por regeneración de Fe (II) a Fe (III).

En la presente investigación se evaluó el efecto de la concentración (mg/g) de sal de plata; granulometría del mineral y la temperatura de bio-oxidación indirecta; sobre el porcentaje de extracción de oro y plata, en la bio-oxidación se utilizó las bacterias *Thiobacillus ferrooxidans* y la *Thiobacillus thiooxidans*, el nutriente de estas fue el denominado 9K; de esta forma se pretende presentar una alternativa para el beneficio de los minerales refractario de nuestra región

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

El mineral aurífero refractario sulfurado (MARS) utilizado, fue obtenido de la unidad minera de Cascajal, del Distrito de Lucma, Provincia de Gran Chimú, Región La Libertad, a 2500 msnm. La TABLA I, muestra los datos del MARS inicial utilizada.

TABLA I
ANÁLISIS QUÍMICO DEL MINERAL DE CABEZA

Au (g/T)	Ag (g/T)	Fe (%)	As (%)	S (%)	Cu (%)	Sb (%)	Insoluble
28,08	4029,42	21,6	15,2	32,4	4,1%	<0.01%	25%

B. Métodos Experimentales

B.1. Diseño experimental

El diseño experimental que se utilizó fue de tipo trifactorial, con el fin de obtener información respecto al efecto que ejercen las variables ya mencionadas en sección anterior. Los factores y niveles, así como el diseño factorial, se muestran en la TABLA II.

TABLA II
FACTORES Y NIVELES DEL DISEÑO FACTORIAL.

Factores		Niveles	
A	Concentración de sal de plata	0.00 mg/g mineral	a1
		0.75 mg/g mineral	a2
		1.50 mg/g mineral	a3
B	Granulometría	80%-m100	b1
		80%-m200	b2
		80%-m325	b3
C	Temperatura	25°C	c1
		45°C	c2
		65°C	c3

B.2. Procedimiento

B.2.1. Análisis Granulométrico

A cada muestra mineral se les realizó un análisis granulométrico a menos malla 100 (-m 100), menos malla 200 (-m 200) y menos malla 325 (-m 325) con la finalidad de identificar los porcentajes pasantes, retenidos y acumulado.

B.2.2. Bio-oxidación indirecta

B.2.2.1. Aislamiento y adaptación de bacterias

Se extrajo aguas ácidas (agua de mina) de la localidad de Lúma (Cerro de Carangas) de diferentes puntos, tomando cuatro muestras de medio litro cada una de ellas, luego se

procedió al cultivo de dichas muestras utilizando un medio 9K (nutrientes), la relación fue de (1:3) v/v entre el agua de mina y nutrimentos respectivamente. Cuando las bacterias oxidaron al ion ferroso casi completamente fue un indicativo que las bacterias se han adaptado y por lo tanto se ha conseguido el cultivo de bacterias. En el cultivo de bacterias, fue monitoreado y se optimizo el tiempo de oxidación antes del proceso experimental.

B.2.2.2. Generación de inóculo y sulfato férrico

Se inició con un volumen de inóculo de 1 L. Cuando la concentración del sulfato ferroso estuvo en 2 g/L se hizo adiciones de sulfato ferroso comercial, para empezar a producir el sulfato férrico necesario para las pruebas de bio-oxidación, el proceso experimental como tal utilizo biorreactores de 40 L. El sulfato férrico generado en estos tanques fue utilizado en las 54 pruebas de bio-oxidación indirecta.

B.2.2.3. Preparación de la muestra (mineral)

Se realizó el cuarteo del mineral aurífero refractario de un total de 200 Kg, para posteriormente extraer 50 Kg de mineral. Seguidamente se procedió al chancado, y luego a la molienda para la obtención de las muestras de acuerdo a los niveles y factores señalados en el diseño experimental.

B.2.2.4. Proceso de bio-oxidación indirecta

Se tomaron 1.5 Kg de mineral y se agregaron a los reactores los cuales contenían la solución férrica que era generada por los biorreactores en la parte biológica. Se hizo 3 corridas de bio-oxidación indirecta para cada muestra. En cada corrida se agregó nueva solución de sulfato férrico y la solución de sulfato ferroso descargada se recirculó a los birreactores para la generación de sulfato férrico.

B.2.2.5. Lavado

Una vez que el mineral fue bio-oxidado se dejó un tiempo para la sedimentación de los sólidos, para luego ser separado. El sólido que es el mineral bio-oxidado se lavó seis veces para eliminar el azufre y otros iones presentes para posteriormente pasar a cianuración.

B.2.2.6. Cianuración

Al mineral lavado y secado se procedió a la cianuración en botella por un tiempo de 51 horas. Debido a que el mineral tiene un considerable porcentaje de cobre se prefirió trabajar a un pH sobre 10.5.

B.2.2.7. Lavado y secado

Después de haber cianurado el mineral, se lavó cuatro veces y luego se secó al medio ambiente.

B.2.2.8. Análisis de Au y Ag por vía seca

En este caso, debido a las dificultades para realizar un análisis directo de solución (por no disponer de un equipo de absorción atómica); se optó por analizar el relave de cada

prueba de lixiviación por vía seca, para esto se utilizó un flux adecuado, y por diferencia entre la ley de cabeza y la ley del relave se obtuvo la extracción de Au y Ag de cada prueba. La Fig. 1 muestra el diagrama de bloques para el procesamiento del mineral; y en la Fig. 2 se muestra el circuito experimental.

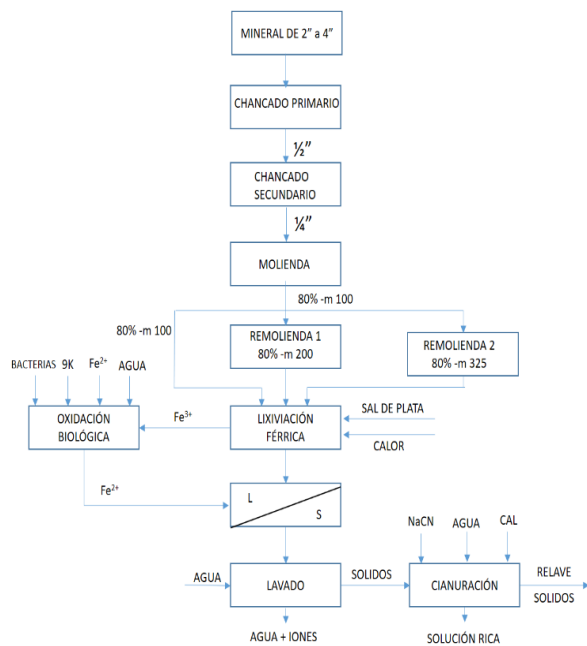


Fig. 1. Diagrama de bloques del procedimiento experimental

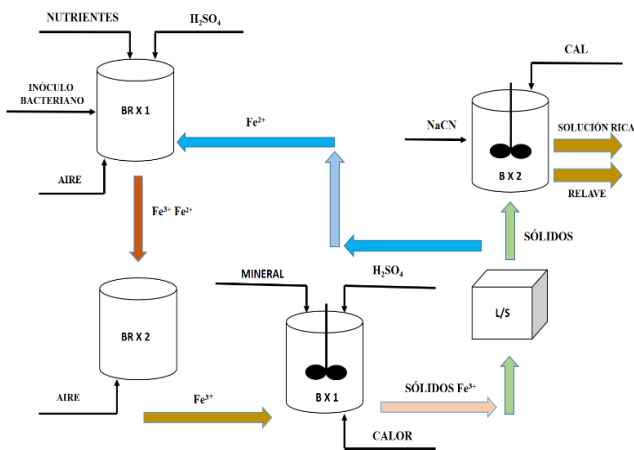


Fig. 2. Circuito experimental para la extracción de Au y Ag del mineral aurífero refractario

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis granulométrico

A las muestras de mineral, después de realizar el análisis granulométrico a mallas -m 100, -m 200 y -m 325, se encontró el % pasante retenido y acumulado cuyos resultados se encuentran en las TABLAS III, IV y V.

TABLA III
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MINERAL A - MALLA 100

Nº malla	Peso (g)	% pasante retenido	%Pasante acumulado retenido (+)	% Pasante acumulado (-)
48	1.78	1.78	1.78	98.22
100	17.28	17.28	19.06	80.94
170	14.3	14.3	33.36	66.64
200	34.2	34.2	67.56	32.44
325	27.97	27.97	95.53	4.47
-325	4.47	4.47	100	0

TABLA IV
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MINERAL A - MALLA 200

Nº malla	Peso (g)	% pasante retenido	%Pasante acumulado retenido (+)	% Pasante acumulado (-)
48	1.78	1.78	1.78	98.22
100	17.28	17.28	19.06	80.94
170	14.3	14.3	33.36	66.64
200	34.2	34.2	67.56	32.44
325	27.97	27.97	95.53	4.47
-325	4.47	4.47	100	0

TABLA V
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MINERAL A - MALLA 325

Nº malla	Peso (g)	% pasante retenido	%Pasante acumulado retenido (+)	% Pasante acumulado (-)
48	0	0	0	100
100	1.97	1.97	1.97	98.03
170	2.91	2.91	4.88	95.12
200	7.32	7.32	12.2	87.8
325	8.2	8.2	20.4	79.6
-325	79.6	79.6	100	0

B. Bio-oxidación indirecta

La TABLA VI y la Fig. 3 muestran los resultados de la extracción de oro afectados por la granulometría, temperatura y la concentración de la sal de plata después de realizarse la bio-oxidación indirecta.

TABLA VI
RESULTADOS DEL % DE EXTRACCIÓN DE AU POR BIO-OXIDACIÓN INDIRECTA

Granulometría	Temperatura (°C)	Concentración de sal de plata		
		0.00 mg/g	0.75 mg/g	1.50 mg/g
80% -m 100	25	38.06	40.08	42.22
	45	35.98	42.04	43.44
	65	57.81	53.74	51.4
80% - m 200	25	45.6	45.12	44.26
	45	44.18	45.78	45.74
	65	56.08	53.24	50.61
80% - m 325	25	41.88	41.11	40.78
	45	48.62	49.4	51.4
	65	61.44	57.09	52.46

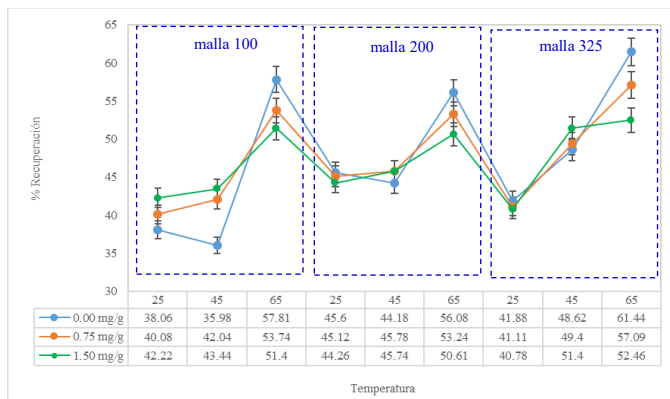


Fig. 3 – Gráfico del % de extracción de oro por bio-oxidación indirecta

La TABLA VII y la Fig. 4 muestran los resultados de la extracción de plata afectados por la granulometría, temperatura y la concentración de la sal de plata después de realizarle bio-oxidación indirecta.

TABLA VII

RESULTADOS DEL % DE EXTRACCIÓN DE AG POR BIO-OXIDACIÓN INDIRECTA

Granulometría	Temperatura (°C)	Concentración de sal de plata		
		0.00 mg/g	0.75 mg/g	1.50 mg/g
80% -m 100	25	41.44	44.98	52.5
	45	64.14	53.2	73.96
	65	86.22	84.01	84.4
80% - m 200	25	64.52	63.27	64.03
	45	63.54	73.26	78.18
	65	81.44	94.24	87.92
80% - m 325	25	65.94	65.01	63.74
	45	68.99	76.16	70.74
	65	87.3	89.87	87.1

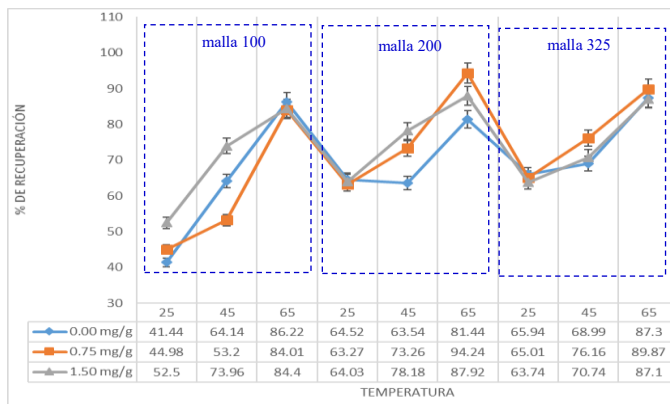


Fig. 4 – Gráfico del % de extracción de plata por bio-oxidación indirecta

En la Fig. 3. se presentan los datos experimentales para la extracción de oro, se observa que la máxima extracción a 80% -m325; 65°C y con una concentración de 0.00 mg de sal de plata/g mineral (61.44% extracción Au). Este resultado concuerda con la teoría de la bio-oxidación indirecta, donde se demuestra la habilidad del *T. Ferrooxidans* para (1) oxidar el mineral directamente, (2) oxidar los iones ferrosos producidos

por la oxidación del mineral o por reducción química del ión ferrico, y (3) oxidar el azufre producido por la oxidación del mineral [21].

En la Fig. 4 se presentan los datos experimentales obtenidos para la extracción de plata y se observa que la máxima extracción se da a 80%-m200; 65°C y 0.75 mg sal de plata/g mineral (94.24% extracción Ag). De este resultado se confirma la mayor extracción de plata con respecto al oro, debido a que la plata no sólo se encuentra encapsulada, sino que también se encuentra en forma de argentita, que es un sulfuro de plata nativo.

IV. CONCLUSIONES

Los parámetros óptimos de las variables para la bio-oxidación indirecta del mineral aurífero refractario, que permitieron obtener un mayor % extracción de los metales preciosos fueron, para el Au, una temperatura de 65°C, granulometría 80% - m325 y concentración de sal de plata sin adición; mientras que, para la plata, los mejores resultados de extracción se obtuvieron a una temperatura de 65°C, granulometría 80%-m200 y a una concentración de sal de plata de 0.75 mg/g mineral

El pretratamiento de biooxidación indirecta como proceso biotecnológico aplicado a la metalurgia, seguido de una cianuración convencional, permitió aumentar la extracción de 44.61% de Au y 48.98% de Ag a 61.24% extracción para el Au y 94.24% de extracción para la Ag, reduciendo significativamente los consumos de cianuro y cal en la cianuración.

La biooxidación indirecta es factible aplicar a minerales auríferos refractarios, por lo que se presenta como una solución viable al procesamiento

AGRADECIMIENTOS

Laboratorio de Procesamiento de Minerales. Escuela de Ingeniería Metalúrgica – Universidad Nacional de Trujillo.

Laboratorio de Materiales Compuestos. Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional de Trujillo.

REFERENCIAS

- [1] Manuscript Templates for Conference Proceedings, IEEE. http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/publishing/templates.html
- [2] M. King, B. Zhu, and S. Tang, "Optimal path planning," *Mobile Robots*, vol. 8, no. 2, pp. 520-531, March 2001.
- [3] H. Simpson, *Dumb Robots*, 3rd ed., Springfield: UOS Press, 2004, pp.6-9.
- [4] L. Ting. Biological metallurgy of Au ores trouble-leached in Russia. *Precious Metals*, 1998, 19(1): 54_56.
- [5] F. Zhao-heng. Mineral characteristic and extractive technology of carbonaceous gold ores [J]. *Gold Science and Technology*, 2003, 11(6): 28_35.
- [6] W. Min-jie, BAI Chun-gen. The chlorination pretreatment of carbonaceous gold ores [J]. *Gold Science and Technology*, 1994, 2(1): 34_39.

- [6] AFENYA P. Treatment of carbonaceous refractory gold ores. *Minerals Engineering*, 1991, 4(7_11): 1043_1055.
- [7] PYKE B L, JOHNSTON R F, BROOKS P. The characteristic and behavior of carbonaceous material in a refractory gold bearing ore. *Minerals Engineering*, 1999, 12(8): 851_862.
- [8] RAZVOZZHAEVA E A, NEMEROV V K, SPIRIDONOV A M, PROKOPCHUK S I. Carbonaceous substance of the Sukhoi Log gold deposit (East Siberia) [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2008, 49(6): 371_377.
- [9] LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng, GUAN Kang, CHEN Ge. Geotectonic evolution and Au metallogeny in China. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1998, 13(3): 24_34.
- [10] OSSEO-ASARE K, AFENYA P M, ABOTSI G M K. Carbonaceous matter in gold ores: Isolation, characterization and adsorption behavior in aurocyanide solution [C]//*Precious Metals: Mining, Extraction and Processing*. Los Angeles, California, USA: Metallurgical Society of AIME, 1984: 125_144.
- [11] ABOTS G M K, OSSE-ASARE K. Surface chemistry of carbonaceous gold ores, II. Effects of organic additives on gold adsorption from cyanide solution [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1987, 21(3_4): 225_239.
- [12] BULATOVIC S, WYSLOUZIL D M. Selection and evaluation of different depressants systems for flotation of complex sulphides ores. *Minerals Engineering*, 1995, 8(1_2): 63_76.
- [13] WEIR, D. Robert, Berezowsky, R.M.G.S. *Refractory Gold: The Role of Pressure Oxidation*. Proc. Intern. Conf. on Gold. Vol. 2: Extractive Metallurgy of Gold. SAIMM. Johannesburg, (Rep. Sudafricana), 1986: 275-285.
- [14] DEMOPOULOS, G.P. y PAPANGELAKIS, V.G. *CIM Bulletin*, Nov., 1989:85-91
- [15] BEREZOWSKI, R.M.G.S., COLLINS, M.J., KERFOOT, D.G.E. y TORRES, N. *JOM*, Feb., 1991: 9-15.
- [16] AMANKWAH R K, PICKLES C A. Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrates [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(13): 1095_1101.
- [17] AMANKWAH R K, YEN W T, RAMSAY J A. A two-stage bacterial pretreatment process for double refractory gold ore [J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(1): 103_108.
- [18] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," *IEEE Translated J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [*Digest 9th Annual Conf. Magnetism Japan*, p. 301, 1982].
- [19] M. King and B. Zhu, "Gaming strategies," in *Path Planning to the West*, vol. II, S. Tang and M. King, Eds. Xian: Jiaoda Press, 1998, pp. 158-176.
- [20] Carranza, F., Mazuelos, A., & Romero, R. (2003). Aplicación del proceso BRISA al tratamiento de menas de cobre conteniendo atacamita. *Revista de Metalurgia*, 39(6). <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.i6.356>
- [21] Lock, D. H. (2004). Introducción a la Biometalurgia. *Revista de Química*, 18(1).