Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr. vol 26 n° 52, 2023: e25358 ISSN-L:1561-0888
https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25358

Artículos: Ingeniería Metalurgica

Caracterización y lixiviación ecológica para recuperar metales preciosos en relaves de amalgamación – Puno

Characterization and ecological leaching to recover precious metals in amalgamation tailings – Puno

Jorge Alberto Ortiz Barreto[1,a], Vidal Sixto Aramburú Rojas[1,b], Luis Alfredo Orihuela Salazar[1,c], Julio Romario Gomez Ugarte[1,d], Lix Shirley Tafur Figueroa[1,e], Wendy Liliana Choque Perez[1,f], Sharon Elisa Aguilar Zevallos[1,g]

Recibido: 03/07/2023 - Aprobado: 10/10/2023 – Publicado: 15/12/2023

RESUMEN

Las operaciones artesanales auroargentíferas desarrolladas a lo largo del territorio peruano se caracterizan por tener bajas recuperaciones de metales preciosos, desarrollarse en malas condiciones laborales y generar consecuencias negativas en el ecosistema, esta realidad fue la base para el planteamiento de nuestra problemática. Investigamos una muestra representativa de un lote de relaves de amalgamación en el departamento de Puno, con una cabeza ensayada de 19.58 gr/TM de Au, 159.67 gr/TM de Ag y 10.53 ppm de Hg. El reporte de microscopía óptica indicó la presencia de oro, pirita, magnetita, hematita, Ilmenita, rutilo y gangas. Con los resultados de la caracterización mineralógica, se realizaron pruebas de lixiviación con reactivos ecológicos para una muestra con una granulometría de remolienda de 87 micras, como: Sandioss, que alcanzó una recuperación de 99.25% de Au y 93.14% de Ag, con un consumo de 22.56 kg/TM para un tiempo de 24 horas. Bajo las mismas condiciones de operación, se evaluó el reactivo Jinchan, logrando una recuperación de 96.31% de Au y 91.18% de Ag, con un consumo de 18.57 kg/TM. El proceso de lixiviación convencional con cianuro logró una recuperación del 97.76% de Au y 92.96% de Ag, para un consumo de 17.83 Kg/TM.

Palabras claves: Amalgamación, jinchan, lixiviación, reactivos ecológicos, sandioss.

ABSTRACT

The gold-silver artisanal operations carried out throughout the Peruvian territory are characterized by having low recoveries of precious metals, being carried out in poor working conditions and generating negative consequences in the ecosystem, which was the basis of the approach to our problem. For this, a representative sample of a batch of amalgamation tailings in the department of Puno was investigated with a tested head of 19.58 gr/TM of Au, 159.67 gr/TM of Ag and 10.53 ppm of Hg. The optical microscopy report indicated the presence of gold, pyrite, magnetite, hematite, Ilmenite, rutile and gangue. With the results of the mineralogical characterization, leaching tests were carried out with ecological reagents for a sample with a regrind granulometry of 87 microns, such as: Sandioss, which reached a recovery of 99.25% Au and 93.14% Ag, with a consumption of 22.56 kg/TM for a period of 24 hours. Under the same operating conditions, the Jinchan reagent was evaluated, achieving a recovery of 96.31% Au and 91.18% Ag, with a consumption of 18.57 kg/TM. The conventional cyanide leaching process achieved a recovery of 97.76% Au and 92.96% Ag, for a consumption of 17.83 Kg/TM.

Keywords: Amalgamation, jinchan, leaching, ecological reagents, sandioss.

1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.
a. Autor para correspondencia: jorgealberto.ortiz@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5217-4510
b. E-mail: varamburu@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7411-3866
c. E.mail: lorihuelas@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3114-8318
d. E-mail. julioromario.gomez@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9816-7885
e. E-mail: lix.tafur@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7822-6753
f. E-mail: wendy.choque@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8463-5921
g. E-mail: sharon.aguilar@unmsm.edu.pe - ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0642-2645

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original. Para mas información, por favor póngase en contacto con iigeo@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

La pequeña minería artesanal utiliza tecnologías obsoletas, emplea mercurio para la recuperación de valores metálicos de oro y plata, a partir de minerales de cabeza de alta ley; representa el 20% de las operaciones de recuperación de oro a nivel mundial. Además, más de 16 millones de personas son económicamente dependientes de dicha actividad, por otro lado, el uso de esta tecnología tradicional genera consecuencias nocivas para la biodiversidad (Bugmann et al., 2022).

El proceso de amalgamación consiste en mezclar el mineral molido con el mercurio en quimbaletes, que luego de ser agitado el tiempo necesario forma la amalgama, cuya composición química puede ser del tipo: AuHg2, Au2Hg y Au3Hg (Taggart & Behre, 1945). El producto de la amalgama llega a concentrar entre 40% y 50% de mercurio, y es sometida a temperaturas por encima de los 460°C, con la finalidad de evaporar el mercurio y obtener el metal doré, generando vapores que se condensan en las nubes y son arrastradas por la lluvia hacia las fuentes de agua, en donde la acción de bacterias metilantes generan metilmercurio, potente neurotoxina que termina desplazándose por todo el ecosistema (Veiga et al., 2006; Ilyas & Lee, 2018; Olivero et al., 2021). Debido a la baja eficiencia del proceso de amalgamación, el relave con alto contenido de metales preciosos es reprocesado en plantas de lixiviación con cianuro (Li et al., 2022), aun así, el proceso tradicional genera un severo impacto ambiental debido a la mala gestión del proceso y la formación de compuestos letales como gas cianhídrico, y cianuro de mercurio que, al solubilizarse en agua se convierte en una sustancia más tóxica que el cianuro de sodio o potasio (Torkaman & Veiga, 2023).

Dicho proceso es empleado por más de 100 años en la industria aurífera debido a su alta eficiencia y bajo costo, pero con impactos negativos tanto para la seguridad, salud del ser humano, y el medio ambiente, tal como sucedió en Rumania, donde en enero del año 2000 un derrame de cianuro afectó el suministro de agua de 2.5 millones de habitantes, incluyendo los países de Yugoslavia y Hungría (Bellotti, 2011; Ray et al., 2022).

Diversos procesos con reactivos alternativos para reemplazar el uso del cianuro se han desarrollado con el objetivo de mejorar la recuperación de metales preciosos, como la lixiviación con tiosulfato (Heath et al., 2008; Wang et al., 2020; Xie et al., 2021; Wang et al., 2020), lixiviación con tiourea (Ray et al., 2022), lixiviación con halógenos (Groza et al., 2008; Pak et al., 2020; Quiroz et al., 2021; Ljubetic et al., 2022), lixiviación con tiocianatos (Wu et al., 2019; Azizitorghabeh et al., 2021) , la disolución con glicina y amoniaco en presencia de permanganato de potasio (Eksteen et al., 2018; Li et al., 2022), la lixiviación con agentes ecológicos como Goldmax (Arapa, 2019), Sandioss, Jinchan (Romero, 2020), entre otros.

Una investigación realizada sobre la aplicación de tiosulfato como reactivo alternativo al cianuro para la recuperación de Au, mediante el proceso de lixiviación, logró velocidades de disolución más rápidas que la cianuración convencional, y a un pH =10, se obtuvo una recuperación del 87,8% de Au frente a la cianuración convencional, que logró recuperar el 87,3% del metal valioso; se concluye que el procedimiento tiene un potencial considerable por su eficacia y bajo impacto ambiental (Vashist et al., 2022). Por otro lado, un estudio enfocado en la lixiviación de Au con glicina como sustituto del cianuro, evidenció que el 77% de dicho metal logró recuperarse después de las 48 horas de proceso, con una concentración de 2g/l de glicina, sin embargo, aumentando la concentración a 4 g/l, la recuperación se elevó notablemente a 96%, debido a la presencia de más iones de glicina libres en el medio, y durante las primeras 4 horas la cinética de lixiviación fue más rápida por la influencia de la concentración de glicina en el sistema, demostrando que es un reactivo prometedor para reducir sustancialmente las huellas ambientales de la hidrometalurgia convencional (Rezaee et al., 2023). Con respecto a los denominados lixiviantes ecológicos, se conoce que son mezclas sintetizadas por distintos reactivos a elevadas temperatura, habiendo identificado principalmente compuestos como SC(NH2)2, NaSiO3, NaOH y Na(PO3), en el “Jinchan”, y Na2O, N2, Compuestos de NH4+, (Fe(CN)6)4− , además de H2O, Ca, Fe e insolubles en el reactivo “Sandioss”. Los impactos generados por dichos lixiviantes son menores a los del cianuro. Existe un gran vacío en la investigación de la lixiviación con estos tipos de reactivos, que engloba los tipos de reacciones y complejos de oro que forman (Zhang et al., 2022).

Hay un trabajo realizado para evaluar la eficiencia del proceso de lixiviación con el reactivo ecológico Sandioss, de un mineral del departamento de Cusco, de tipo aluvial con presencia de cuarzo en mayor proporción, así como grava, arena y limo. El autor concluyó que luego de 48 horas logró recuperar 92.27% de Au con un pH de 12, demostró que los reactivos ecológicos ofrecen resultados alentadores, con respecto a los métodos convencionales (Romero, 2020).

Por lo expuesto anteriormente, se investigó la lixiviación con reactivos ecológicos Sandioss y Jinchan, para la recuperación de oro y plata en relaves de amalgamación, en Puno.

II. METODOLOGÍA

2.1 Diseño de investigación

La investigación que se ha desarrollado representa un diseño experimental puro, con un nivel de investigación aplicativo, dado que se manipuló la variable de tiempo de lixiviación con reactivos ecológicos (Arias & Covinos, 2021), las cuales se aplicaron para recuperar Au y Ag, a partir de los relaves de amalgamación del departamento de Puno; previamente se identificaron las especies mineralógicas presentes en la muestra, mediante microscopía óptica de luz polarizante.

La Figura 1 representa el diagrama esquemático del diseño de investigación.

2.2 Procedimiento metodológico de la investigación

- Recopilación de información y reconocimiento de la problemática

- La recuperación de oro en la provincia de Carabaya, región Puno, se realiza con métodos artesanales poco efectivos y altamente tóxicos, como consecuencia del uso del mercurio. El proceso de amalgamación genera un relave con alto contenido de oro y mercurio, que puede llegar hasta 70% del metal precioso contenido en la cabeza del mineral, acumulándose en depósitos tipo cocha para luego ser comercializados. La intensa actividad de la minería informal de Puno abarca la cuenca alta del río Carabaya, afluente del Ramis, la cual es severamente afectada por las actividades de explotación y procesamiento.
- Muestreo y ensayos químicos de los relaves de amalgamación
- Se tomó muestra de la cocha de relaves de amalgamación de manera aleatoria, se empleó una pluma de muestreo de acero inoxidable de 1m de largo por 1" de diámetro; se tomaron las muestras desde la base del depósito para asegurar la representatividad del lote.
- Ensayos de microscopía óptica de luz polarizante de la muestra
- Para identificar las especies de minerales presentes en la muestra de relave, se preparó una briqueta de 30 mm de diámetro, se empleó 12 g de muestra de relave representativo del lote, 14 g de resina epóxica y 2 g de endurecedor.
- Pruebas metalúrgicas de lixiviación en botella con reactivos ecológicos
- En base a los resultados de la caracterización de la muestra, se desarrollaron pruebas de cinética de lixiviación en botella con reactivo Sandioss, y Jinchan, empleando 300 g de muestra representativa a una relación líquido/sólido de 3 a 1, pH igual a 11, una granulometría de 58.53% -200 malla y 45 RPM de agitación de la botella. La concentración inicial de los reactivos empleados fue al 1%, controlando la fuerza del reactivo bajo el método de titulación con AgNO3, e indicador de KI, y manteniendo la fuerza del reactivo en 0.1. Se emplearon 4 botellas para el desarrollo de las pruebas de cinética, controlando los valores de recuperación por ensayos químicos de absorción atómica de las soluciones, y métodos de ensayos al fuego para relaves, cada 6 horas.
- Pruebas de cinética de lixiviación convencional con cianuro
- Resultados de las pruebas experimentales de lixiviación

Figura 1
Diseño de la investigación para recuperar metales preciosos a partir de relaves de amalgamación

III. RESULTADOS

3.1. Ensayos químicos del relave de amalgamación

Se elaboró un plan de muestreo de un lote de 5 TM de relave del proceso de amalgamación de minerales oxidados, se lograron extraer 50 kg de relave, que fue debidamente rotulado, sellado al vacío y enviado al laboratorio químico metalúrgico. Una muestra representativa de aproximadamente 500 gramos del lote inicial se envió al laboratorio de análisis químico con la finalidad de determinar las leyes de Au, Ag y Hg en la muestra, las cuales se indican en la Tabla 1.

3.2. Microscopia óptica de la muestra relave

Se identificaron especies liberadas de oro con tamaño mínimo de 68 micras y máximo de 112 micras, tal como se observan en las figuras 2, 3, 4 y 5, su distribución volumétrica y grados de liberación se presentan en la Tabla 2. Asimismo, la Tabla 3 representa los enlaces presentes y sus posibilidades de liberación, y el gráfico circular de la Figura 6 denota la distribución porcentual de los enlaces binarios.

Tabla 1

Leyes de Au, Ag y Hg, obtenidas por ensayos químicos del relave de amalgamación

Muestra	Au (g/TM)	Ag (g/TM)	Hg (ppm)
Relave de amalgamación	19.58	159.67	10.53

Nota: Las leyes están expresadas en gramos por tonelada métrica (g/TM) para Au y Ag, y en partes por millón (ppm) para mercurio.

Figura 2

Partículas libres de Au de 112 y 104 micras de longitud; magnetita (mt), hematita (hm) y partículas entrelazadas de magnetita con hematita (mt+hm) y de magnetita con gangas (mt+GGs).

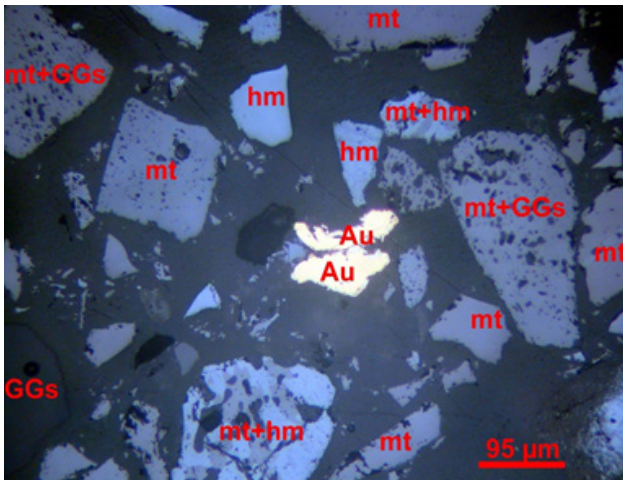


Figura 3

Partícula de Au de 68 micras de longitud, magnetita (mt), hematita (hm) y gangas (GGs); también se observa la partícula entrelazada de magnetita y gangas (mt+GGs).

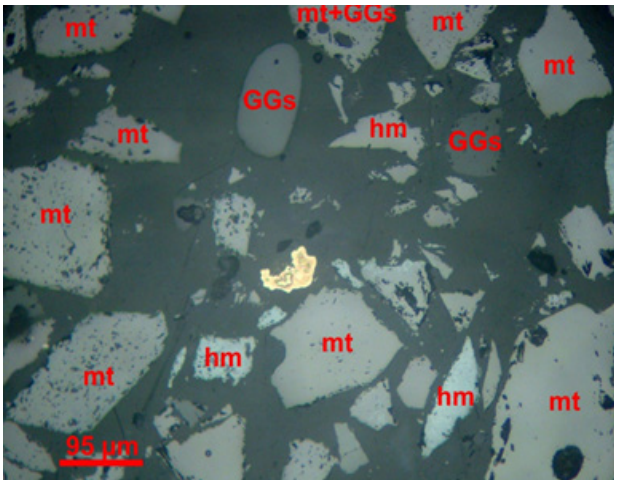


Tabla 2

Distribución volumétrica y grados de liberación de las especies observadas en el microscopio óptico de luz polarizante

Minerales	Volumen (%)	Grado de liberación (%)
Oro	0.14	100.00
Pirita	0.06	100.00
Magnetita	77.05	91.81
Hematita	13.06	84.63
Ilmenita	0.18	62.50
Rutilo	0.24	0.00
Gangas	9.26	88.99
TOTAL	100.00	

Nota: El volumen y los grados de liberación son reportados en porcentaje (%).

Tabla 3

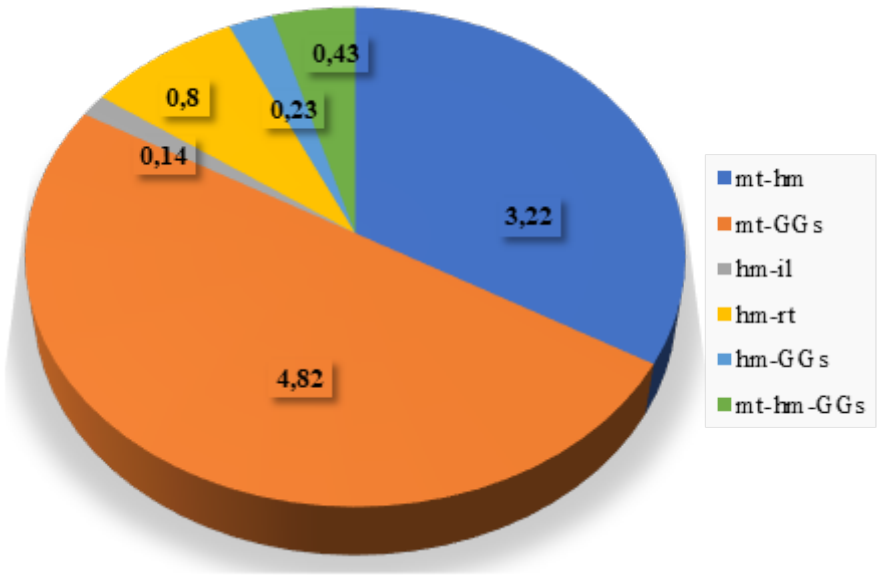
Enlaces presentes y sus posibilidades de liberación completa

Minerales entrelazados	Tipo part.	entr. Dist.	Num Porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		3147	90.35	
mt-hm	1bIV	14	0.40	Moderadamente fácil
	1dII	42	1.21	Imposible
	2aIV	35	1.00	Muy difícil a imposible
	3cI	14	0.40	Imposible
	3cI	7	0.20	Imposible
mt-GGs	1dII	168	4.82	Imposible
hm-il				
hm-rt	3cII	5	0.14	Imposible
	1cII	7	0.20	Imposible
	3bI	7	0.20	Imposible
	3cII	14	0.40	Imposible
hm-GGs	1eII	8	0.23	Muy difícil a imposible
mt-hm-GGs	1dII	15	0.43	Imposible
TOTAL		3483	100.00	

Nota: Las simbologías de la primera columna son: mt=Magnetita, hm=Hematita, il=Ilmenita, rt=Rutilo, y GGs=Gangas; en la segunda columna se observa: 1bIV=Ameboide, 1cII=Gráfico, 1dII=Diseminado, 1eII=Inclusión, 2aIV=Corona, 3bI=Estratificado,3cI, 3cII=Reticular, la cual corresponde al tipo geométrico de entrelazamiento de minerales.

Figura 6

Distribución porcentual de los enlaces binarios



Nota: Gráfico circular de la distribución porcentual de las especies mineralógicas

3.3 Pruebas de cinética de lixiviación en botella con reactivo Sandioss

Los resultados de la cinética de lixiviación se representan para los tiempos de 6, 12, 18 y 24 horas de proceso, tal y como se indica en los balances metalúrgicos de la Tabla 4, así también la gráfica de disolución de oro, plata y mercurio que se representa en la Figura 7, demuestra que se obtuvo la mayor recuperación de Au y Ag en 24 horas, alcanzando valores de 99.25% y 93.14%, respectivamente. Así también los investigadores afirman que el mecanismo de lixiviación aún no está claro. Sin embargo, debido a su baja toxicidad, se ha prestado cada vez más atención a este reactivo, el cual presenta mejor selectividad, cinética y seguridad que el cianuro en el proceso de lixiviación. Se han realizado varios casos exitosos en plantas de oro y se ha confirmado la eficiencia, economía y respeto al medio ambiente de estos lixiviantes (Jie, 2018 , Li et al., 2018a , Li et al., 2018b). Los resultados demuestran una rápida disolución de oro y plata, alcanzado recuperar 95.62% y 90.19%, respectivamente.

3.4 Pruebas de cinética de lixiviación en botella con reactivo Jinchan

Se realizaron pruebas de cinética, de lixiviación en botella, con reactivo Jinchan, bajo las mismas condiciones de operación. Los resultados de las pruebas metalúrgicas demuestran que en el tiempo de 6 horas se logró recuperar 93.13% de oro, asi también, se alcanzó una recuperación máxima en el tiempo de 24 horas, con un valor de 96.31%, con los cuales se ajustó la curva polinómica y(Au-J) = -0.36878(t)2 + 12.109(t) + 10.36, que predice la disolución de oro en un tiempo de 24 horas, la cual presenta un coeficiente de correlación predictivo de 0.8699, demostrando la confiabilidad del modelo matemático, así también, la disolución de plata alcanzó un valor de 86.60% en las primeras 6 horas de proceso, y una recuperación máxima de 91.18% en el tiempo de 24 horas. Con los valores de recuperación de plata se ajustó la ecuación polinómica yAg-J = -0.3384(t)2 + 11.219(t) + 9.6626, la cual presenta un coeficiente de correlación predictivo de 0.8713. Los resultados de las pruebas de cinética de lixiviación con Jinchan se muestra en la Tabla 5, y también la cinética de disolución de Au, Ag y Hg, se representa en la gráfica de la Figura 8.

3.5 Pruebas de cinética de lixiviación convencional

Con la finalidad de evaluar la eficiencia de los reactivos ecológicos con respecto a los procesos tradicionales, se realizaron pruebas de cinética de lixiviación en botella con cianuro, cuyos resultados obtenidos se describen en la Tabla 6, así como también la velocidad de disolución de las especies estudiadas, en la gráfica de la Figura 9.

Tabla 6

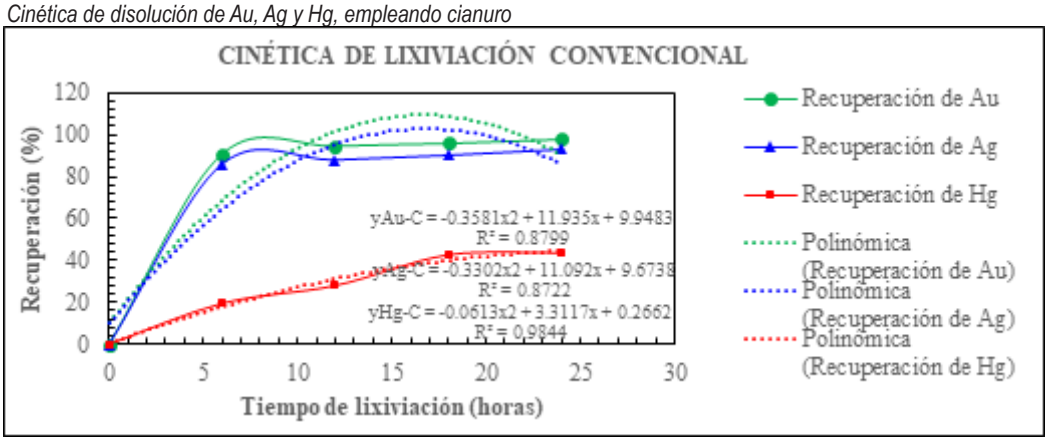
Resultados de la cinética de lixiviación con cianuro

Tiempo (horas)	Componentes	Peso o volumen (g o ml)	Ley			Contenido metálico			Recuperación (%)			Cianuro (Kg/TM)
			Au (g/TM)	Ag (g/TM)	Hg (ppm)	Au	Ag	Hg	Au	Ag	Hg	
6	Sol. Rica	900	5.16	43.09	0.79	4644.00	3878.10	711.00	90.90	86.10	19.52	10.23
	Relave	300	1.55	20.87	9.77	465.00	626.10	2931.00	9.10	13.90	80.48	
12	Sol. Rica	900	5.74	44.19	1.02	5166.00	3977.10	918.00	94.62	88.00	28.00	12.10
	Relave	300	0.98	18.08	7.87	294.00	542.40	2361.00	5.38	12.00	72.00	
18	Sol. Rica	900	6.03	46.75	1.55	5427.00	4207.50	1395.00	95.87	90.24	42.66	15.13
	Relave	300	0.78	15.17	6.25	234.00	455.10	1875.00	4.13	9.76	57.34	
24	Sol. Rica	900	6.55	48.19	1.60	5895.00	4337.10	1440.00	97.76	92.96	43.64	17.83
	Relave	300	0.45	10.95	6.20	135.00	328.50	1860.00	2.24	7.04	56.36	

Nota: Las unidades que se reportan en el balance son: Tiempo = horas, peso = gramos, ley en relave = gramos por toneladas métricas ó partes por millón, ley en solución = miligramos por litro, recuperación = porcentaje, consumo de reactivo =gramos por tonelada métrica.

Figura 9.

Cinética de disolución de Au, Ag y Hg, empleando cianuro



Nota: Curvas de cinética de la disolución de oro, plata y mercurio, con el método convencional, y sus respectivos ajustes de tendencia.

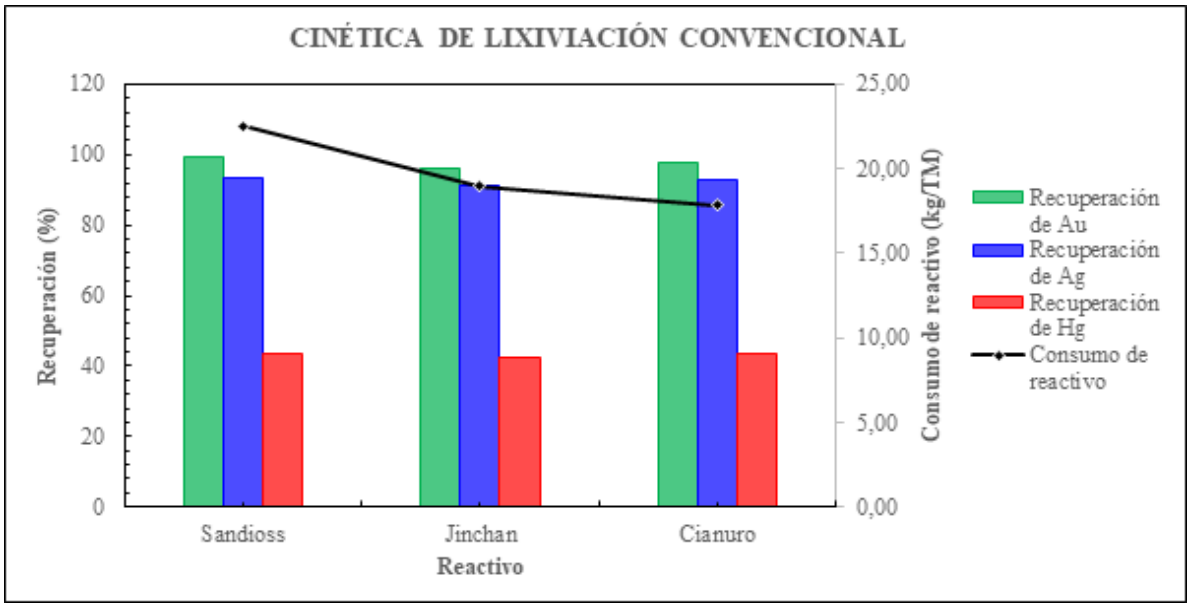
IV. DISCUSIÓN

Los altos valores de recuperación de oro y plata se deben principalmente a la liberación completa de estos metales, los cuales presentaron un grado de liberación de 100%, siendo el Sandioss el reactivo que logró una mayor recuperación con un consumo de 22.56 Kg/TM, por otro lado, el lixiviante Jinchan logró consumir 18.96 Kg/TM, el cual representa una ventaja con respecto al consumo de reactivos. Estos altos consumos se deben principalmente a la alta ley de oro y plata en los relaves de amalgamación, los cuales comparándolos con el reactivo convencional son mayores. Se pudo observar que a las 6 horas del proceso la curva de cinética alcanzó una meseta, con lo cual evidencia lo sustentado por (Yan Zhang et al) en su artículo de revisión de extracción de oro con reactivos ecofriendly. El presente estudio ha demostrado que los reactivos denominados ecológicos presentan una buena performance metalúrgica, perfilándose como sustituto del reactivo convencional, a pesar de esto, se han encontrado pocos artículos que revisen el estado de la investigación de la extracción de oro a partir de minerales/ concentrados de oro u otros materiales que contienen oro mediante la adopción de estos reactivos. Otro vacío en las investigaciones realizadas por distintos autores, es que las patentes de dichos reactivos no presentan la composición detallada de estos lixiviantes, aun así, se ha encontrado tiourea y ferrocianuro, que nos hace suponer que el mecanismo de disolución es igual al proceso de lixiviación con tiourea y cianuro. La disolución de mercurio en todos los procesos realizados en este trabajo no supera el 50% de la disolución, lo que nos lleva a deducir que presenta una cinética mucha más lenta que el oro y la plata; de la misma manera, se evaluó en periodos más largos de lixiviación para ver la disolución de dicho metal, pero la recuperación de este metal no fue un objetivo en la investigación.

El resumen de los valores alcanzados por las distintas pruebas de lixiviación con reactivos ecológicos, y la tecnología tradicional, para recuperar oro y plata, asi como la disolución de mercurio, a partir de los relaves de amalgamación del departamento de Puno, se representan en el gráfico de barras comparativo de la Figura 10.

Figura 10

Gráfico de barras de las recuperaciones para cada reactivo, con sus respectivos consumos



Nota: Las barras muestran la recuperación de oro, plata y mercurio, la línea indica el consumo de reactivo.

V. CONCLUSIONES

- Los resultados de la microscopía óptica de luz polarizante determinaron un tipo de oro libre con un tamaño máximo de 112 micras y mínimo de 68 micras, así también se observaron especies como pirita, magnetita, hematita, ilmenita, rutilo y gangas. El oro se encuentra completamente libre y representa el 0.14% del volumen total de la muestra.

- La lixiviación en botella con reactivo ecológico Sandioss para un tiempo de 24 horas, alcanzó una recuperación de Au de 99,25% y 93.14% de Ag. Se observó que la cinética de lixiviación es violenta para las 6 horas, alcanzando un consumo de 22.56 kg/TM, así también, la disolución de mercurio fue de 43.42%, quedando 6.49 ppm de mercurio en el relave.

- La lixiviación con reactivo Jinchan bajo las mismas condiciones de operación, alcanzó una recuperación de Au de 96.31% y 91.18% de Ag. Se observó que la cinética de lixiviación es violenta para las 6 horas, alcanzando un consumo de 18.96 kg/TM. La

lixiviación de mercurio con Jinchan fue de 42.48%, quedando 6.50 ppm de mercurio en el relave.

- Se recomienda realizar una microscopía electrónica de barrido para la evaluar la concentración de otros elementos y/o compuestos presentes en los relaves de amalgamación, a su vez, estudiar la descomposición de los reactivos en la relavera y evaluar el tiempo de actividad química de estos agentes.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los docentes y personal administrativo de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, por el apoyo correspondiente para el desarrollo del proyecto de investigación.

VII. REFERENCIAS

Arapa, M. (2019). Lixiviación ecológica de minerales auríferos a partir del reactivo gold max para la pequeña minería. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa].

Arias, J., & Covinos, M. (2021). Diseño y metodología de la investigación (Primera ed.). Arequipa, Perú: Enfoques Consulting EIRL. http://hdl.handle.net/20.500.12390/2260

Azizitorghabeh, A., Mahandra, H., Ramsay, J., & Ghahreman, A. (2021). Gold Leaching from an Oxide Ore Using Thiocyanate as a Lixiviant: Process Optimization and Kinetics. ACS Omega, 6(27), 17183-17193. https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00525

Bellotti, M. (2011). Minería a cielo abierto versus glaciares en alerta roja en Argentina. Revista de Derecho de Daños, 1. https://doi.org/https://amsacta.unibo.it/id/eprint/3085

Bugmann, A., Brugger, F., Zongo, T., & Van Der Merwe, A. (2022). "Doing ASGM without mercury is like trying to make omelets without eggs". Understanding the persistence of mercury use among artisanal gold miners in Burkina Faso. Environmental Science & Policy, 133, 87-97. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.009

Eksteen, J., Oraby, E., Tanda, B., Tauetsile, P., Bezuidenhout, G., Newton, T., Trask, F., & Bryan, I. (2018). Towards industrial implementation of glycine-based leach and adsorption technologies for gold-copper ores. Canadian Metallurgical Quarterly, 57(4). https://doi.org/https://doi-org.unmsm.lookproxy.com/10.1080/00084433.2017.1391736

Groza, N., Filceno-Olteanu, A., Panturu, E., Radulescu, R., & Aurelian, F. (2008). Application of the BIOX Process to the Pretreatment of Refractory Sulphide Gold Ores and Concentrates in Order to Increase Au and Ag Recovery Rate in Hydrometallurgical Extraction Process. Chem. Bull. "POLITEHNICA" Univ. (Timişoara), 53(67), 1-2. http://chemicalbulletin.upt.ro/admin/articole/59880art_57(237-240).pdf

Heath, J., Jeffrey, M., Zhang, H., & Rumball, J. (2008). Anaerobic thiosulfate leaching: Development of in situ gold leaching systems. Minerals Engineering, 21(6), 424-433. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.12.006

Ilyas, S., & Lee, J.-c. (2018). Gold Metallurgy and the Environment (1 ed.). Boca Raton: CRC Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315150475

Li, H., Oraby, E., Eksteen, J., & Mali, J. (2022). Extraction of Gold and Copper from Flotation Tailings Using Glycine-Ammonia Solutions in the Presence of Permanganate. Minerals, 12(5), 612. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min12050612

Ljubetic, K., Deen, K., & Lie, W. (2022). Kinetic limitations of gold leaching in ferric chloride media Part II: Potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy. Minerals Engineering, 15. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107433

Olivero, J., Alvarez, N., Alcala, M., & Caballero, K. (2021). Population exposure to lead and mercury in Latin America. Current Opinion in Toxicology, 27, 27-37. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.06.002

Pak, K.-S., Zhang, T.-A., Kim, C.-S., & Kim, G.-H. (2020). Research on chlorination leaching of pressure-oxidized refractory gold concentrate. Hydrometatallurgy, 194. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105325

Quiroz, U., Baena, A., & Rosa-Toro, A. (2021). Use of chlorine electrogenerated from NaCl in acid medium as a proposal for the leaching of alluvial gold. Revista de la Sociedad Química del Perú, 86(4), 439-451. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v86i4.313.

Ray, D., Baniasadi, M., Graves, J., Greenwood, A., & Farnaud, S. (2022). Thiourea Leaching: An Update on a Sustainable Approach for Gold Recovery from E-waste. Journal of Sustainable Metallurgy, 8(2), 597-612. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40831-022-00499-8

Rezaee, M., Saneie, R., Mohammadzadeh, A., Abdollahi, H., Kordloo, M., Rezaee, A., & Vahidi, E. (2023). Eco-friendly recovery of base and precious metals from waste printed circuit boards by step-wise glycine leaching: Process optimization, kinetics modeling, and comparative life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 389. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136016

Romero, J. (2020). Extracción de oro mediante el proceso de lixiviación con el reactivo sandioss del yacimiento minero Chocrocoña, Llusco Chumbivilcas, región Cusco. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad, Cusco].

Taggart, A., & Behre, H. (1945). Handbook of Mineral Dressing, Ores and Industrial Minerals, Volumen 1 (2 ed.). California: John Wiley & Sons, Inc.

Torkaman, P., & Veiga, M. (2023). Comparing cyanidation with amalgamation of a Colombian artisanal gold mining sample: Suggestion of a simplified zinc precipitation process. The Extractive Industries and Society. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101208

Vashist, U., Sadri, F., Choi, Y., & Ghahreman, A. (2022). Systematic study of critical parameters on magnesium saturated thiosulfate gold leaching process; part A: Effect of ammonia and lime for pH adjustments and concentration of magnesium and copper(II). Hydrometallurgy, 213. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105943

Veiga, M., Maxson, P., & Hylander, L. (2006). Origin of mercury in artisanal and small-scale gold mining. J. of Cleaner Production, 14, 436-447.

Wang, H., Wen, S., Han, G., Xu, L., & Feng, Q. (2020). Activation mechanism of lead ions in the flotation of sphalerite depressed with zinc sulfate. Minerals Engineering, 146. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106132

Wang, J., Xie, F., Wang, W., Bai, Y., Fu, Y., & Chang, Y. (2020). Leaching of gold from a free milling gold ore in copper-citrate-thiosulfate solutions at elevated temperatures. Minerals Engineering, 155. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106476

Wu, H., Feng, Y., Huang, W. L., & Liao, S. (2019). The role of glycine in the ammonium thiocyanate leaching of gold. Hydrometallurgy, 185, 111-116. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.01.019

Xie, F., Chen, J., Wang, J., & Wang, W. (2021). Review of gold leaching in thiosulfate-based solutions. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 31(11), 3506-3529. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65745-X

Zhang, Y., Cui, M., Wang, J., Liu, X., & Lyu, X. (2022). A review of gold extraction using alternatives to cyanide: Focus on current status and future prospects of the novel eco-friendly synthetic gold lixiviants. Minerals Engineering, 176. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107336

Contribución de autoría

Conceptualización, Adquisición de fondos, Recursos, Administración del proyecto (Jorge Alberto Ortiz Barreto). Supervisión, Validación, Visualización, Investigación, Metodología (Vidal Aramburú Rojas, Luis Orihuela Salazar). Curación de datos, Software, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición (Julio Romario Gomez Ugarte, Lix Shirley Tafur Figueroa, Wendy Choque Perez, Sharon

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses