



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v5i2.765>

Recibido:2026-03-15

Aceptado:2026-03-29

Publicado:2026-04-15

Mejora de la recuperación de oro en relaves sulfurados refractarios mediante preoxidación con ozono y cianuración

Improving Gold Recovery from Refractory Sulfidic Tailings through Ozone Pretreatment and Cyanidation

Autor:

Magdonio Gelacio Pisco Rabanal¹

magdonio.pisco@unmsm.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0006-0582-2013>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Lima-Perú

Vidal Sixto Aramburú Rojas²

varambur@unmsm.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-5818-8569>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Lima-Perú

Luis Miguel Soto Juscamayta³

lsotoj@unmsm.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0008-7861-8296>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Lima-Perú

Cómo citar

Pisco Rabanal, M. G., Aramburú Rojas, V. S., & Soto Juscamayta, L. M. (2026). Mejora de la recuperación de oro en relaves sulfurados refractarios mediante preoxidación con ozono y cianuración. ASCE MAGAZINE, 5(2),296-316



Resumen

La recuperación de oro a partir de relaves sulfurados refractarios constituye uno de los principales desafíos en el procesamiento metalúrgico de minerales auríferos, debido a que el oro suele encontrarse encapsulado en minerales sulfurados como piritita y arsenopiritita, lo que limita la eficiencia de los procesos convencionales de lixiviación con cianuro. El objetivo es evaluar la mejora de la recuperación de oro mediante la aplicación de un esquema metalúrgico combinado que integra flotación de sulfuros auríferos, peroxidación con ozono y lixiviación con cianuro. La metodología es de diseño experimental factorial, utilizando como población relaves provenientes del procesamiento de minerales sulfurados auríferos de la zona de Quebrada Honda, situada en Peri en el distrito de Caraz, región Ancash. Para el desarrollo del estudio se aplicaron técnicas de caracterización mineralógica mediante microscopía óptica, pruebas de flotación para concentrar los minerales sulfurados portadores de oro, ensayos de oxidación con ozono y pruebas de lixiviación con cianuro, complementadas con análisis estadístico de los resultados mediante ANOVA. Los resultados obtenidos mostraron que el proceso de flotación permitió alcanzar recuperaciones de 92.60 % de Au y 78.70 % de Ag, obteniendo un concentrado con una ley aproximada de 21.08 g Au/TM, mientras que el pretratamiento con ozono evidenció una contribución del 94.71 % del flujo de ozono dentro del modelo experimental. Las pruebas de cianuración del concentrado oxidado obtuvieron máximas recuperaciones de 56.25 % de Au y 35.42 % de Ag en 48 horas de lixiviación. Concluyendo, la combinación de flotación, peroxidación con ozono y cianuración son una alternativa metalúrgica eficaz para mejorar la recuperación de oro en relaves sulfurados refractarios siendo una estrategia factible para el reutilizamiento de relaves mineros con contenido de metales valiosos.

Palabras clave: oro refractario, relaves mineros, oxidación con ozono, cianuración, flotación de sulfuros, hidrometalurgia.



Abstract

The recovery of gold from refractory sulfide tailings is one of the main challenges in the metallurgical processing of gold-bearing ores, as gold is often encapsulated in sulfide minerals such as pyrite and arsenopyrite, which limits the efficiency of conventional cyanide leaching processes. The objective is to evaluate improvements in gold recovery through the application of a combined metallurgical scheme that integrates flotation of gold-bearing sulfides, pre-oxidation with ozone, and cyanide leaching. The methodology is a factorial experimental design, using as the sample tailings from the processing of gold-bearing sulfide minerals in the Quebrada Honda area, located in Peri in the district of Caraz, Ancash region. For the study, mineralogical characterization techniques were applied using optical microscopy, flotation tests to concentrate the gold-bearing sulfide minerals, ozone oxidation tests, and cyanide leaching tests, supplemented by statistical analysis of the results using ANOVA. The results showed that the flotation process achieved recoveries of 92.60% for Au and 78.70% for Ag, yielding a concentrate with a grade of approximately 21.08 g Au/t, while ozone pretreatment accounted for 94.71% of the ozone flux within the experimental model. Cyanidation tests on the oxidized concentrate achieved maximum recoveries of 56.25% Au and 35.42% Ag after 48 hours of leaching. In conclusion, the combination of flotation, pre-oxidation with ozone, and cyanidation is an effective metallurgical alternative for improving gold recovery from refractory sulfide tailings, representing a feasible strategy for the reuse of mining tailings containing valuable metals.

Keywords: refractory gold, mine tailings, ozone oxidation, cyanidation, sulfide flotation, hydrometallurgy.



Introducción

La recuperación de oro a partir de minerales sulfurados constituye uno de los principales desafíos en el procesamiento metalúrgico de metales preciosos (Qin et al., 2021; Soto-Uribe et al., 2023). En numerosos depósitos auríferos, el oro se encuentra finamente diseminado o encapsulado dentro de minerales sulfurados como la pirita y la arsenopirita, lo que dificulta su liberación durante los procesos convencionales de lixiviación con cianuro (Li et al., 2022; Espinoza et al., 2025). Esta mineralización llamada oro refractario baja recuperación de cianuración, por lo que el oro queda encapsulado en la matriz mineral (Ma et al., 2023).

El procesamiento de minerales, refractariedad del oro inicia por la asociación de hierro y arsénico, presentado en forma submicroscópica en la estructura cristalina de los minerales. Esta condición limita el contacto entre el oro y el agente lixivante, reduciendo significativamente la eficiencia del proceso de extracción (Aylmore & Muir, 2001). Como consecuencia, el tratamiento de estos minerales requiere la aplicación de métodos de pretratamiento oxidativo que permitan alterar o destruir la matriz sulfurada para facilitar la liberación del oro.

Diversos métodos han sido desarrollados para el tratamiento de minerales auríferos refractarios, entre los que destacan el tostado, la oxidación a presión y la biooxidación. Sin embargo, estos procesos presentan ciertas limitaciones relacionadas con los costos operativos, el consumo energético o los impactos ambientales asociados a la generación de emisiones y residuos (Piervandi, 2023; Wang et al., 2018). En este contexto, la oxidación química mediante ozono ha surgido como una alternativa prometedora debido a su elevado potencial oxidante, que permite promover la descomposición de los sulfuros presentes en el mineral y favorecer la exposición del oro a la solución cianurada (Piervandi, 2023).

El ozono por su alto poder oxidante, emplea en procesos hidrometalúrgicos para activarse con los minerales sulfurados, ayudando la ruptura de su estructura y desatando el oro encapsulado, mejorando la eficiencia de la lixiviación (Bazhko & Yahorava, 2017).

El incremento del valor del oro y la optimización de los recursos impulsan el procesamiento de relaves mineros, a pesar de los residuos que aun contienen metales valiosos no recuperados e las etapas primeras (Multani et al., 2019). Los relaves de flotación se sulfuros contiene oro asociado a



los minerales representando una oportunidad para recuperar por medio de tecnologías metalúrgicas más eficientes.

La caracterización mineralógica y metalúrgica de los relaves es fundamental para determinar su distribución, liberación y asociación del oro con minerales presentes. El conocimiento de estas características permite definir estrategias de procesamiento adecuadas que incluyan etapas de concentración y tratamientos de oxidación que favorezcan la recuperación del metal valioso (Lemos et al., 2021; Vega-González et al., 2022).

El presente artículo tiene como objetivo evaluar la mejora de la recuperación de oro a partir de relaves sulfurados refractarios mediante un proceso combinado de flotación, peroxidación con ozono y cianuración. Se realizó la caracterización mineralógica de relaves de Caraz (Ancash-Perú) identificando los minerales asociados al oro y evaluando su comportamiento en el proceso metalúrgico.

Esta evaluación permite evaluar la caracterización mineralógica que influye en la recuperación del oro y analizar el uso de ozono como agente oxidante para optimizar la cianuración. Asimismo, los resultados obtenidos aportan información relevante para el desarrollo de alternativas tecnológicas orientadas al aprovechamiento sostenible de relaves mineros y a la optimización de los procesos hidrometalúrgicos aplicados a minerales auríferos refractarios.

Minerales auríferos refractarios: concepto y relevancia

Los minerales auríferos refractarios representan una categoría importante dentro de los recursos minerales de oro, caracterizada por presentar bajas recuperaciones mediante los procesos convencionales de cianuración. Esta condición se debe principalmente a que el oro se encuentra asociado o encapsulado dentro de minerales sulfurados, lo que impide su liberación durante las etapas de molienda y lixiviación (Aylmore & Muir, 2001).

Desde el punto de vista metalúrgico, un mineral se considera refractario cuando la recuperación de oro mediante cianuración directa es inferior al 70–75 %. Esta situación ocurre frecuentemente cuando el oro se encuentra finamente diseminado dentro de minerales como la pirita, arsenopirita o pirrotita, donde la estructura cristalina del sulfuro actúa como una barrera que impide la interacción entre el oro y el cianuro (Adams, 2016).



La mineralogía en distintos estudios influye directamente al comportamiento metalúrgico en factores como el oro, su liberación y la asociación de mineral que afectan su recuperación, por ello el análisis mineralógico es crucial para definir estrategias de procesamiento eficientes (Zhou et al., 2019).

Tratamiento de minerales sulfurados auríferos

El procesamiento de minerales auríferos sulfurados generalmente requiere la aplicación de procesos combinados que permitan concentrar los minerales portadores de oro y posteriormente liberar el metal mediante tratamientos de oxidación. Una de las etapas más utilizadas en este tipo de minerales es la flotación, la cual permite concentrar los sulfuros auríferos presentes en el mineral (Bulut et al., 2019).

La flotación es un proceso fisicoquímico que separa los minerales según las propiedades superficiales, las partículas hidrofóbicas se compactaban a burbujas de aire y ascienden formando una espuma rica en minerales valiosos (Wills & Finch, 2016).

En minerales auríferos asociados a sulfuros, la flotación permite concentrar las especies como pirita y arsenopirita que tiene oro. Este proceso reduce el volumen de material que posteriormente debe ser tratado mediante lixiviación, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del proceso metalúrgico.

Peroxidación con ozono en minerales sulfurados

La oxidación previa de los minerales sulfurados constituye una estrategia ampliamente utilizada para mejorar la recuperación de oro en minerales refractarios. Este proceso tiene como objetivo alterar la estructura de los sulfuros que encapsulan el oro, permitiendo su liberación y facilitando su posterior disolución durante la cianuración (Xu et al., 2020).

El ozono, por su alto contenido de oxidante se utiliza en la hidrometalúrgica para reaccionar con minerales sulfurados, generando especies oxidadas que vuelven frágil su estructura (Piervandi, 2023).

El ozono se destaca por la oxidación y el poder de oxidante, su rápida descomposición en oxígeno y menor impacto ambiental frente a diferentes agentes. Estas características han motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a evaluar su aplicación en el tratamiento de minerales auríferos refractarios (Bazhko & Yavorava, 2017).



Importancia del reaprovechamiento de relaves mineros

La reprocesamiento de relaves mineros ha adquirido una creciente relevancia en la industria minera debido a la necesidad de optimizar el uso de los recursos minerales y reducir los impactos ambientales asociados a la actividad minera. Los relaves albergan metales valiosos que no fueron recuperados en los procesos de beneficio inicial (Lottermoser, 2019).

En varios casos, los relaves tienen sulfuros con otro en su estructura, permitiendo aplicar tecnologías que recuperen estos metales (Kinnunen & Kaksonen, 2019). La recuperación de metales relaves mejora la optimización de recursos y disminuye el impacto ambiental en los residuos mientras. La recuperación de metales a partir de relaves no solo contribuye a mejorar la eficiencia del aprovechamiento de los recursos minerales, sino que también permite reducir el impacto ambiental asociado a la acumulación de residuos mineros (Adiansyah et al., 2015).

Material y métodos

Tipo y diseño de estudio

La presente investigación corresponde a un estudio experimental aplicado de laboratorio, orientado a evaluar el comportamiento metalúrgico de relaves sulfurados auríferos mediante diferentes etapas de procesamiento. El diseño experimental permitió analizar la influencia de variables operativas en la recuperación de oro durante las etapas de flotación, oxidación con ozono y lixiviación con cianuro. Este enfoque experimental facilita la evaluación controlada de las condiciones de operación y la determinación de los factores que influyen en la eficiencia del proceso metalúrgico (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

El estudio se desarrolló bajo un diseño factorial experimental, el cual permitió analizar el efecto de variables como el flujo de ozono y el tiempo de oxidación sobre la recuperación de oro durante el proceso de cianuración. Este tipo de diseño es ampliamente utilizado en investigaciones metalúrgicas para optimizar condiciones de operación y establecer relaciones entre variables independientes y dependientes en los procesos de beneficio de minerales (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).



Población y muestra

La población del estudio estuvo conformada por los relaves provenientes del procesamiento de minerales sulfurados polimetálicos auríferos de la zona de Quebrada Honda, ubicada en el distrito de Caraz, región Ancash, Perú. Estos relaves presentan contenidos de oro y plata asociados principalmente a minerales sulfurados como pirita y arsenopirita, los cuales constituyen las principales especies portadoras del metal valioso (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

La muestra utilizada en la investigación se obtuvo mediante muestreo representativo del depósito de relaves, siguiendo procedimientos de homogenización y reducción de tamaño con el objetivo de garantizar la representatividad del material analizado. Posteriormente, las muestras fueron acondicionadas mediante secado, cuarteo y molienda para obtener una muestra compuesta destinada a los análisis mineralógicos y las pruebas metalúrgicas desarrolladas en el laboratorio.

Instrumento de recolección de datos

Para la obtención de la información experimental se emplearon técnicas de caracterización mineralógica y pruebas metalúrgicas de laboratorio (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). La caracterización mineralógica se ejecuto por medio de la microscopia óptica identificando las especies que están presentes, su distribución y grado de liberación del oro.

Además, se realizó el análisis químico que determinen las leyes de oro y plata permitiendo evaluar el poder de la recuperación del material aplicado en la presente investigación.

Procedimiento

El procedimiento experimental se desarrolló en varias etapas consecutivas. En primer lugar, se realizó la caracterización mineralógica del mineral de cabeza, evaluando diferentes fracciones granulométricas mediante microscopía óptica para determinar la asociación del oro con los minerales sulfurados presentes en la muestra.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de molienda y flotación de los relaves, con el objetivo de concentrar los sulfuros auríferos presentes en el material. Las pruebas brindaron la obtención de concentrado del contenido de oro y plata en etapas posteriores, luego se sometió a la oxidación con ozono bajo diferentes condiciones para finalizar a la lixiviación con cianuro y evaluar la recuperación de metales y cinética del proceso.



Análisis de datos

Los resultados obtenidos durante las pruebas metalúrgicas fueron analizados mediante balances metalúrgicos y análisis estadístico, utilizando hojas de cálculo y el software estadístico Minitab 19. Este análisis permitió evaluar la influencia de las variables experimentales sobre la recuperación de oro y plata durante las diferentes etapas del proceso.

Asimismo, se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) y ecuaciones de regresión para determinar la significancia estadística de los factores evaluados y establecer las relaciones entre las variables independientes y las variables dependientes del estudio.

Consideraciones experimentales

Durante el desarrollo de los ensayos metalúrgicos se mantuvieron condiciones controladas de operación, tales como granulometría, porcentaje de sólidos, pH de la pulpa, velocidad de agitación y tiempo de proceso. Estas condiciones permitieron garantizar la reproducibilidad de los resultados experimentales obtenidos durante el desarrollo de la investigación.

Las pruebas se realizaron en equipos de laboratorio utilizados para el procesamiento experimental de minerales, empleando reactivos metalúrgicos adecuados para los procesos de flotación, oxidación y cianuración.

Limitaciones

El presente estudio se desarrolló a escala de laboratorio, utilizando muestras representativas de relaves provenientes de una zona específica de explotación minera. Por lo tanto, los resultados obtenidos reflejan las condiciones particulares del material analizado y de los parámetros experimentales evaluados durante el desarrollo de la investigación.

Sin embargo, los resultados constituyen una base importante para futuras investigaciones orientadas a la optimización del proceso y a la evaluación de la aplicación del pretratamiento con ozono en el procesamiento de relaves auríferos a mayor escala.



Análisis de Resultados con Representaciones Gráficas

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en la investigación titulada “Influencia de la caracterización del relave de flotación del mineral sulfurado polimetálico para recuperar oro mediante lixiviación del concentrado oxidado con ozono en Caraz – Ancash”. El análisis integra la información proveniente de la caracterización mineralógica, las pruebas de flotación de los relaves y las pruebas de oxidación con ozono aplicadas al concentrado obtenido. Las representaciones gráficas y tablas permiten visualizar el comportamiento metalúrgico del material, así como la influencia de las variables evaluadas sobre la recuperación de los metales valiosos.

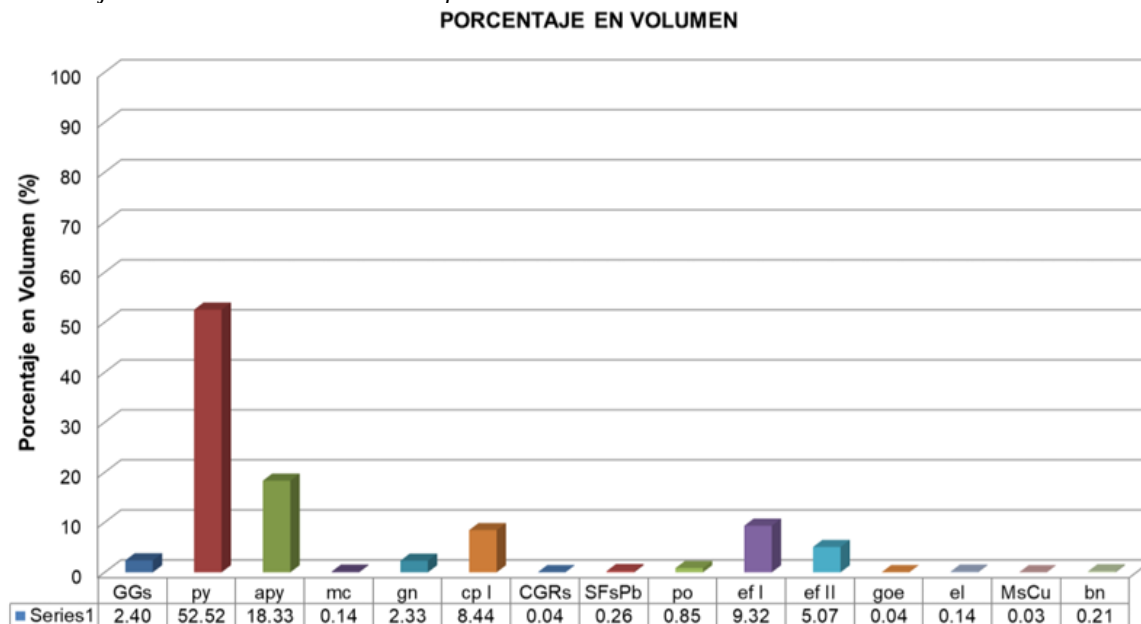
Caracterización mineralógica del relave

El análisis mineralógico realizado mediante microscopía óptica permitió identificar las especies minerales presentes en el relave y evaluar su grado de liberación. Los resultados muestran que el oro se encuentra asociado principalmente a minerales sulfurados como pirita y arsenopirita, presentándose en forma de electrum.

Los porcentajes volumétricos de los minerales presentes en la muestra se observan en la Figura 1, donde se evidencia la predominancia de minerales sulfurados en la muestra analizada.

Figura 1

Porcentajes en volumen de los minerales presentes en la muestra a malla +100

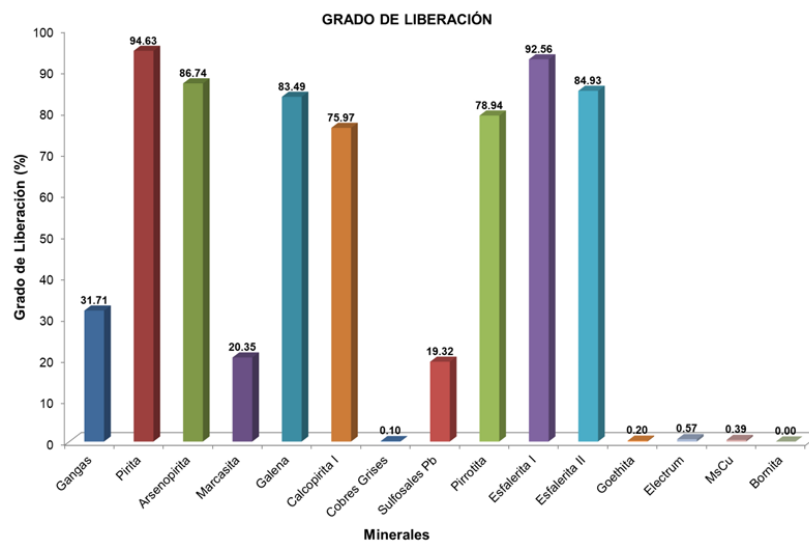


La figura muestra la distribución volumétrica de las especies minerales presentes en la muestra. Evidenciándose el predominio de sulfuros, de modo significativo la pirita y arsenopirita, principales portadores de oro en relave, explicando su carácter refractario y la necesidad de un pretratamiento oxidativo que mejore su recuperación.

Del mismo modo, el nivel de liberación de los minerales que se encuentran presentes se identifica en la Figura 2, en la cual se observa que el oro tiene bajos grados de liberación en dimensiones de partícula respectivamente gruesos.

Figura 2

Representación de los grados de liberación de los minerales presentes a malla +100

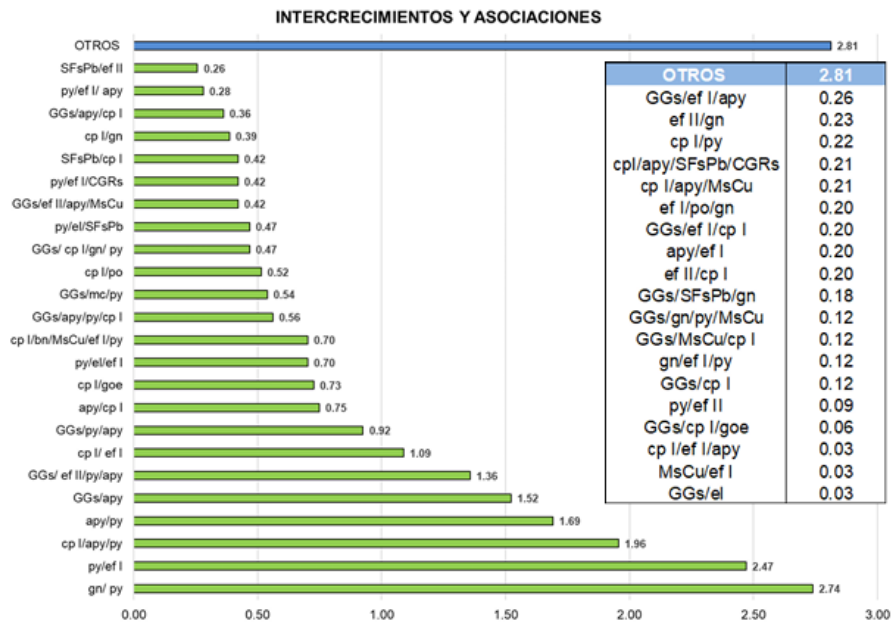


El análisis mineralógico se complementa con la identificación de los tipos de intercrecimiento mineral presentes en la muestra, los cuales se muestran en la Figura 3. Estos resultados indican que el oro se encuentra principalmente encapsulado en minerales sulfurados, lo que explica el comportamiento refractario del material.



Figura 3

Tipos de intercrecimientos a malla +100

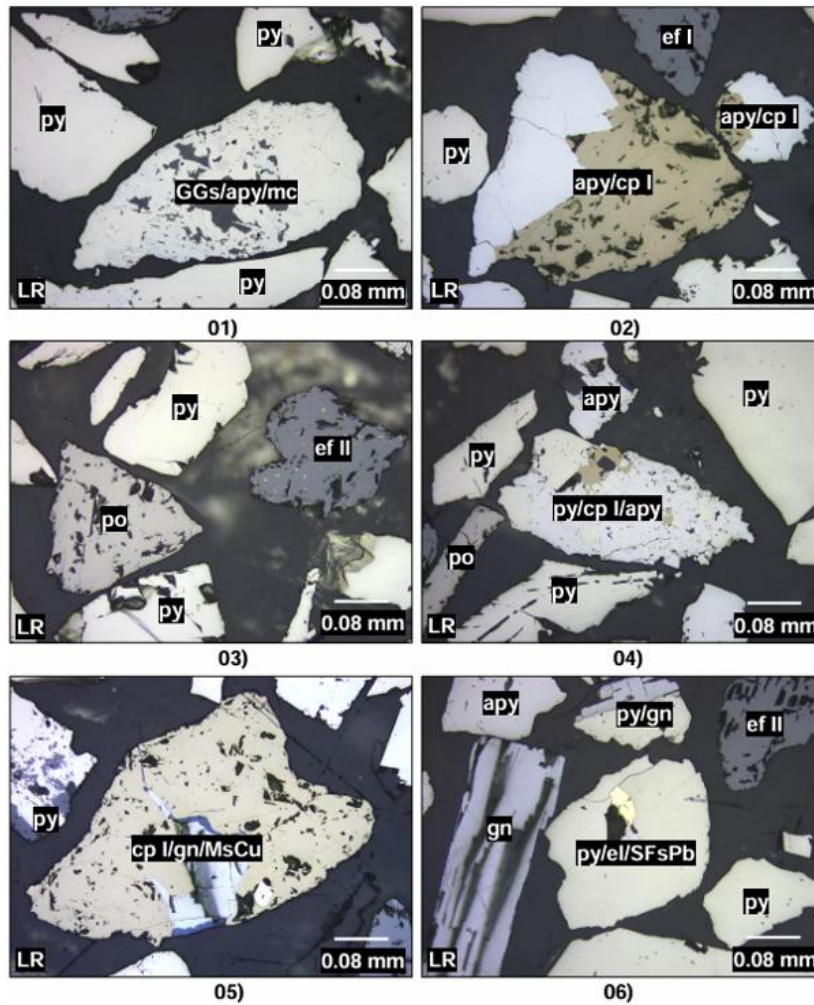


La presencia de intercrecimientos entre minerales sulfurados y ganga sugiere que el oro se encuentra íntimamente asociado a la pirita y arsenopirita. Este tipo de asociación mineralógica es característico de los minerales auríferos refractarios y dificulta la liberación del oro durante las etapas de molienda y lixiviación.

Las fotomicrografías obtenidas mediante microscopía óptica se presentan en la Figura 4, donde se observa la asociación del electrum con la pirita y arsenopirita, confirmando la presencia de oro dentro de la matriz sulfurada.

Figura 4

Fotomicrografías de la muestra a malla +100



Resultados de las pruebas de flotación

Con base en la caracterización mineralógica del material, se realizaron pruebas experimentales de flotación con el objetivo de concentrar los minerales sulfurados portadores de oro presentes en los relaves.

Las condiciones de operación utilizadas en las pruebas de flotación se presentan en la Tabla 1, donde se describen los parámetros operativos de la etapa rougher.

**Tabla 1***Condiciones de operación de la flotación Rougher*

Parámetro	Valor
Porcentaje de sólidos	35%
Volumen de la celda	4 litros
pH	Natural
CuSO ₄	Según diseño experimental
Z-6	Según diseño experimental
D-250	20 g/TM
Tiempo de acondicionamiento	5 minutos
Tiempo de flotación	10 minutos

El diseño experimental aplicado a las pruebas de flotación se muestra en la Tabla 2, en la cual se presentan las combinaciones de reactivos y variables operativas evaluadas durante los ensayos.

Tabla 2*Condiciones de operación de la flotación Rougher*

OrdenEst	OrdenCorrida	PTCentral	Bloques	CuSO ₄ (g/TM)	Z-6(g/TM)
1	1	1	1	200	50
2	2	1	1	400	50
3	3	1	1	200	100
4	4	1	1	400	100
5	5	1	1	200	50
6	6	1	1	400	50
7	7	1	1	200	100
8	8	1	1	400	100

Los resultados obtenidos muestran que el proceso de flotación permitió concentrar eficientemente los minerales sulfurados auríferos presentes en los relaves. El análisis estadístico de la recuperación de oro se presenta en la Tabla 3, donde se muestra la varianza asociada al proceso de recuperación.

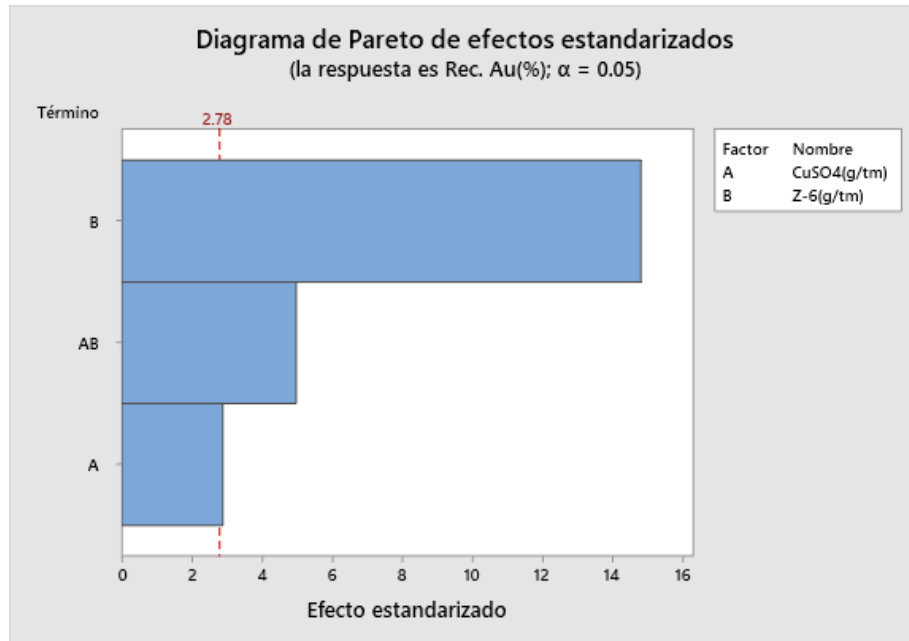
Tabla 3*Varianza de la recuperación de Au*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	467.374	98.44%	467.374	155.791	84.23	0
Lineal	2	421.582	88.80%	421.582	210.791	113.97	0
CuSO ₄ (g/TM)	1	15.457	3.26%	15.457	15.457	8.36	0.045
Z-6(g/TM)	1	406.125	85.54%	406.125	406.125	219.58	0
Interacciones dobles	1	45.792	9.65%	45.792	45.792	24.76	0.008
CuSO ₄ (g/TM)*Z-6(g/TM)	1	45.792	9.65%	45.792	45.792	24.76	0.008
Error	4	7.398	1.56%	7.398	1.85		
Total	7	474.773	100.00%				

Asimismo, el comportamiento de las variables evaluadas en el proceso de flotación se representa mediante el diagrama de Pareto de la recuperación de oro mostrado en la Figura 5, donde se observa la influencia de las variables operativas en el proceso de concentración.

Figura 5

Pareto de la recuperación de Au



Los resultados obtenidos indican que el proceso de flotación permitió alcanzar una recuperación de oro de 92.60 % y una recuperación de plata de 78.70 %, obteniendo un concentrado con una ley aproximada de 21.08 g Au/TM y 15.7 Oz Ag/TC.

Resultados del pretratamiento con ozono

Posteriormente, el concentrado obtenido en la etapa de flotación fue sometido a pruebas de oxidación con ozono, con el objetivo de evaluar su influencia en la recuperación del oro durante el proceso de cianuración.

El diseño experimental utilizado para evaluar las condiciones de oxidación se presenta en la Tabla 4, donde se describen las combinaciones de flujo de ozono y tiempo de oxidación consideradas en los ensayos.



Tabla 4

Diseño de pruebas de oxidación con Ozono

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Flujo de Ozono (mg/lit)	Tiempo de Oxidación (horas)
1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	2
3	3	1	1	1	3
4	4	1	1	1	4
5	5	1	1	2	1
6	6	1	1	2	2
7	7	1	1	2	3
8	8	1	1	2	4
9	9	1	1	3	1
10	10	1	1	3	2
11	11	1	1	3	3
12	12	1	1	3	4
13	13	1	1	4	1
14	14	1	1	4	2
15	15	1	1	4	3
16	16	1	1	4	4
17	17	1	1	1	1
18	18	1	1	1	2
19	19	1	1	1	3
20	20	1	1	1	4
21	21	1	1	2	1
22	22	1	1	2	2
23	23	1	1	2	3
24	24	1	1	2	4
25	25	1	1	3	1
26	26	1	1	3	2
27	27	1	1	3	3
28	28	1	1	3	4
29	29	1	1	4	1
30	30	1	1	4	2
31	31	1	1	4	3
32	32	1	1	4	4

En la tabla 5, se identifica el análisis y varianza en la recuperación del oro con pretratamiento, mostrando la influencia de las variables en el proceso de oxidación.

Tabla 5

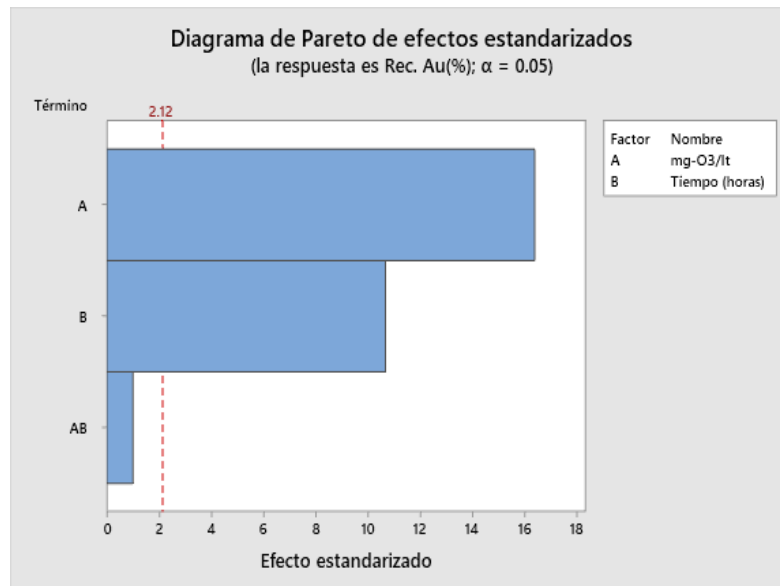
Varianza de la recuperación de Au con el pretratamiento

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	3903.73	99.57%	3903.73	260.25	244.15	0
Lineal	6	3891.62	99.26%	3891.62	648.6	608.47	0
mg-O ₃ /lt	3	3713.53	94.71%	3713.53	1237.84	1161.25	0
Tiempo (horas)	3	178.09	4.54%	178.09	59.36	55.69	0
Interacciones de 2 términos	9	12.11	0.31%	12.11	1.35	1.26	0.328
mg-O ₃ /lt *Tiempo (horas)	9	12.11%	.31%	12.11	1.35	1.26	0.328
Error	16	17.06	0.43%	17.06	1.07		
Total	31	3920.79	100.00%				

El diagrama de Pareto correspondiente a la recuperación de oro con pretratamiento se muestra en la Figura 6, donde se observa que el flujo de ozono constituye la variable de mayor influencia en el proceso.

Figura 6

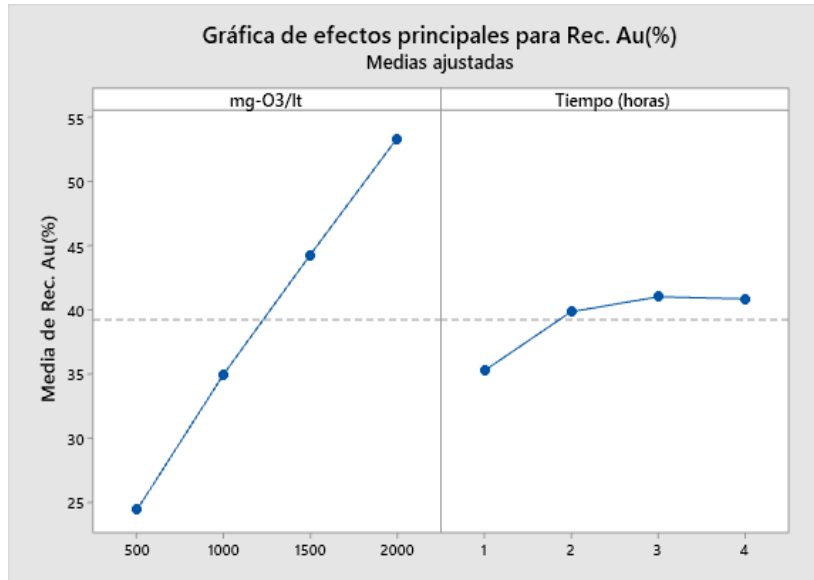
Pareto de la recuperación de Au con pretratamiento



Asimismo, los efectos principales de las variables evaluadas se representan en la Figura 7, donde se observa que el incremento del flujo de ozono favorece la oxidación de los sulfuros presentes en el concentrado.

Figura 7

Efectos principales de la recuperación de Au con pretratamiento



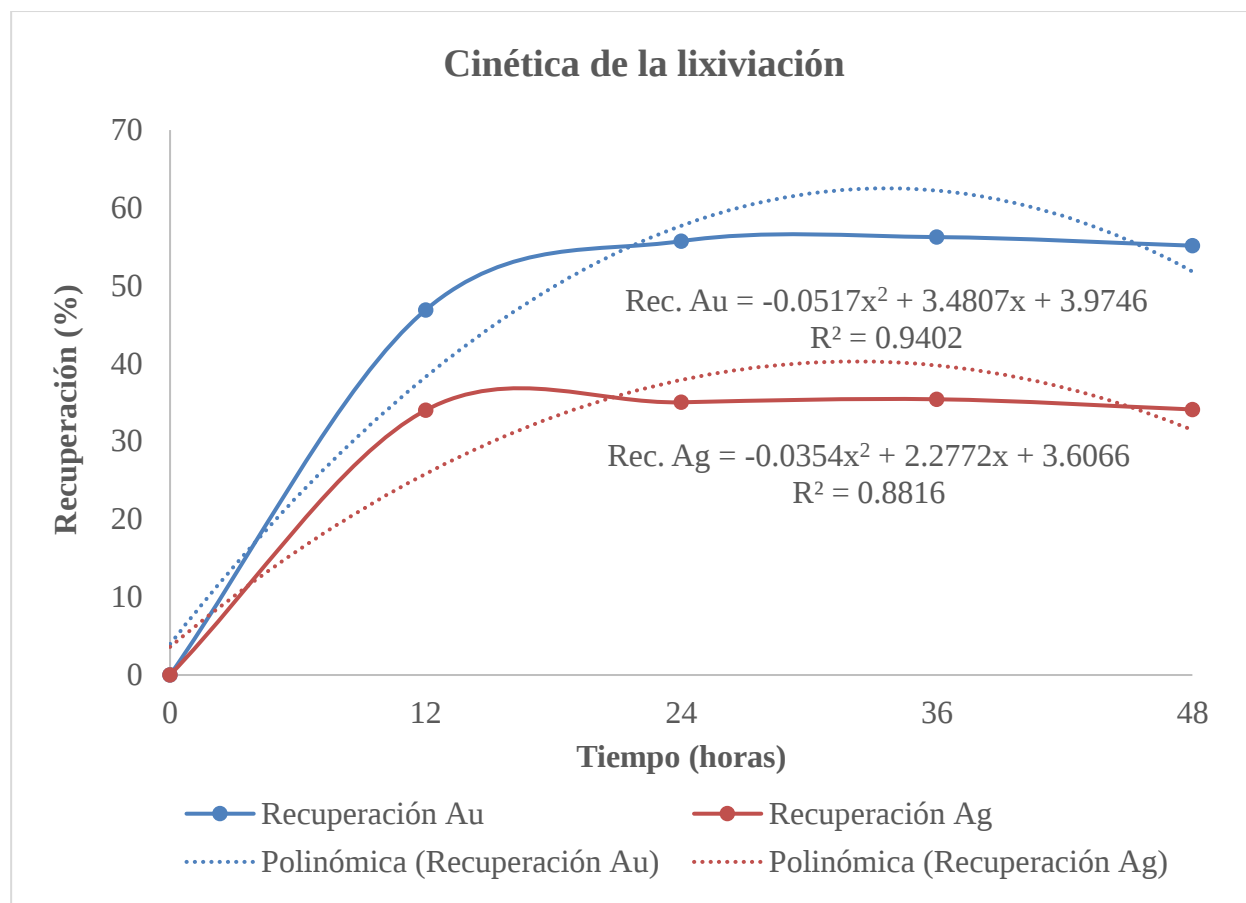
Estos resultados evidencian que el flujo de ozono fue la variable que presentó mayor contribución al proceso de recuperación de oro, alcanzando una contribución aproximada de 94.71 % en el modelo experimental.

Cinética de lixiviación

Finalmente, se evaluó la cinética de lixiviación del oro en el concentrado sometido a pretratamiento oxidativo. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 8, donde se observa el comportamiento de la recuperación del oro en función del tiempo de lixiviación.

Figura 8

Cinética de la lixiviación en función de su recuperación



Los resultados evidencian la recuperación del oro con el tiempo de lixiviación alcanzando el 53.25% de Au, 35.42% Ag en las 48 horas confirmando el pretratamiento de ozono con una liberación de oro sulfuroso y eficiencia de cianuración.

Discusión e interpretación

Los resultados confirman que los estudiantes de Enfermería experimentan violencia de estructural durante las prácticas clínicas intrahospitalarias. La violencia simbólica es la más frecuente, manifestándose en trato desigual, exclusión e invisibilización del trabajo femenino, reproduciendo estructuras jerárquicas y patriarcales (Bonino, 2008; Lagarde, 2015).

La violencia física, el hostigamiento y el acoso tienen baja incidencia reportada, aunque podrían estar subrepresentadas por miedo o ausencia de canales de denuncia. Para Galtung (1969), los sistemas de los hospitales evidencian una violencia directa y estructural al limitar las oportunidades, Bourdieu (2001) señala que a violencia simbólica legitima esta desigualdad,



mientras Luhmann (1995) menciona la reproducción social, bajo la perspectiva de Watson (2008) destaca el entorno clínico jerárquico afecta el cuidado y el bienestar.

Conclusión

El presente estudio permitió demostrar que la recuperación de oro en relaves sulfurados refractarios está fuertemente condicionada por la naturaleza mineralógica del material, particularmente por la presencia de minerales sulfurados como pirita y arsenopirita que encapsulan el oro dentro de su estructura cristalina. La caracterización mineralógica realizada evidenció que el oro se encuentra principalmente asociado a estos sulfuros en forma de electrum, lo que explica el comportamiento refractario del relave y las limitaciones de los procesos convencionales de lixiviación directa.

Los resultados experimentales confirmaron que la aplicación de un esquema metalúrgico integrado que combina flotación de sulfuros auríferos, peroxidación con ozono y lixiviación con cianuro constituye una alternativa efectiva para mejorar la recuperación de oro en este tipo de materiales. La fase de flotación obtuvo una concentración eficiente de minerales que tiene oro, recuperando 1 95.62% de Au y el 78.70% de Ag, evidenciando su relevancia como proceso previo al tratamiento hidrometalúrgico.

Por otro lado, el pretratamiento oxidativo con ozono señaló un efecto significativo de liberación de cogiendo los sulfuros, habiendo que el flujo de ozono la variable más influyente 94.71% en el proceso, confirmando la capacidad de oxidante modificando su estructura de los minerales facilita la exposición del oro a la lixiviación.

Las pruebas de cianuración del concentrado previamente oxidado obtuvieron la recuperación del 536.25% de oro y el 35.42% de plata, señalaron un graba mejora frente a los minerales refractarios sin tratamiento, confirmando la oxidación con ozono aumentando la eficiencia de lixiviación al facilitar la liberación del metal precioso.

En fin el estudio evidencia que al comprometer la mineralogía del relave y aplicar a los procesos metalúrgicos combinados es primordial optimizando la recuperación del oro em materiales sulfurados refractarios. En este sentido, el uso de ozono como agente oxidante representa una alternativa tecnológica prometedora para el tratamiento de concentrados sulfurados y para el reaprovechamiento de relaves mineros que aún contienen cantidades significativas de metales valiosos.



Referencias

- Adams, M. D. (2016). *Gold ore processing: Project development and operations* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16489-2>
- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management. *Journal of Cleaner Production*, 108, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.139>
- Aylmore, M. G., & Muir, D. M. (2001). Thiosulfate leaching of gold—A review. *Minerals Engineering*, 14(2), 135–174. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00172-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00172-2)
- Bazhko, V., & Yavorova, V. (2017). Evaluation of ozonation technology for gold recovery and cyanide management during processing of a double refractory gold ore. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(8), 709–715. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n8a6>
- Bulut, G., Yenial, U., & Emiroğlu, M. (2019). Beneficiation of refractory gold ores containing sulfide minerals by flotation. *Minerals Engineering*, 142, 105894. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105894>
- Espinoza-Martínez, A. M., et al. (2025). Gold and silver recovery from a refractory pyritic concentrate. *Minerals*, 15(12), 1260. <https://doi.org/10.3390/min15121260>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education. <https://www.mheducation.com.mx/metodologia-de-la-investigacion-las-rutas-cuantitativa-cualitativa-y-mixta-9781456260965-latam>
- Kinnunen, P., & Kaksonen, A. H. (2019). Towards circular economy in mining: Opportunities and challenges for tailings reprocessing. *Minerals Engineering*, 130, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.009>
- Lemos, M., Valente, T., Reis, P. M., Fonseca, R., Delbem, I., Ventura, J., & Magalhães, M. (2021). Mineralogical and geochemical characterization of gold mining tailings and their potential to generate acid mine drainage (Minas Gerais, Brazil). *Minerals*, 11(1), 39. <https://doi.org/10.3390/min11010039>
- Li, J., Yang, H., & Zhao, R. (2022). Mineralogical characteristics and recovery process optimization analysis of a refractory gold ore with gold particles mainly encapsulated in pyrite and arsenopyrite. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 82(4), 125941. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125941>
- Lottermoser, B. G. (2019). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97120-6>
- Ma, L., Liu, Q., Feng, Q., & Zhang, G. (2023). Mineral phase evolution during oxidation roasting of refractory gold ore and its effect on gold leaching. *Minerals*, 13(4), 558. <https://doi.org/10.3390/min13040558>



- Multani, R. S., Waters, K. E., & Becker, M. (2019). Flotation recovery–by–size comparison of pyrrhotite in a nickel–copper sulfide ore. *Minerals Engineering*, 132, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.021>
- Piervandi, Z. (2023). Pretreatment of refractory gold minerals by ozonation before the cyanidation process: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109013. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109013>
- Qin, H., Guo, X., Tian, Q., Yu, D., & Zhang, L. (2021). Recovery of gold from sulfide refractory gold ore: Oxidation roasting pretreatment and gold extraction. *Minerals Engineering*, 164, 106822. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106822>
- Soto-Urbe, J. C., Castillo, J., & Cifuentes, L. (2023). Gold extraction from a refractory sulfide concentrate by combined oxidative pretreatment and cyanidation. *Minerals*, 13(1), 116. <https://doi.org/10.3390/min13010116>
- Vega-González, J. A., Zavaleta-Gutiérrez, N. E., & Quispe-Cueva, J. A. (2022). Characterization of gold-bearing tailings by diagnostic leaching for reprocessing by flotation and leaching. *Journal of Sciences and Engineering*, 6(1), 20–27. <https://doi.org/10.32829/sej.v6i1.167>
- Wang, G., Xie, S., Liu, X., Wu, Y., Liu, Y., & Zeng, T. (2018). Bio-oxidation of a high-sulfur and high-arsenic refractory gold concentrate using a two-stage process. *Minerals Engineering*, 120, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.013>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16363-1>
- Xu, B., Yang, Y., Li, Q., & Li, G. (2020). A review of pretreatment technologies for refractory gold ores and concentrates. *Minerals Engineering*, 151, 106350. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106350>
- Zhou, J., Gu, G., Xu, Y., Li, L., & Yang, X. (2019). Mineralogical characterization and gold extraction from refractory gold ores containing arsenopyrite and pyrite. *Hydrometallurgy*, 186, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.03.012>

Agradecimiento: N/A

Nota: El artículo no es producto de una publicación anterior.