

Caracterización y recuperación de oro y plata de minerales de Zamora Chinchipe, Ecuador

Characterization and recovery of gold and silver from ores of Zamora Chinchipe, Ecuador.

Juan Carlos Quintuña Espín¹, Sixto Vidal Aramburú Rojas²

- ¹. Investigador independiente. Loja - Ecuador
jcquintuna@hotmail.com
- ². Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima - Perú
varamburur@unmsm.edu.pe

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: : 21-09-2025

Fecha de aceptación: 02-09-2026

Resumen

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) en Ecuador, utiliza la amalgamación con mercurio como método predominante para la recuperación de oro. Su amplia utilización responde principalmente a su facilidad de implementación, bajos costos de operación y escaso requerimiento de equipamiento especializado. El propósito de esta investigación es la caracterización mineralógica y la recuperación de oro y plata de minerales de la zona Sur de Ecuador con la aplicación combinada de concentración gravimétrica centrífuga y flotación. El mineral sulfurado se caracterizó mediante microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX), identificando oro libre y asociado con pirita, esfalerita y galena. La concentración se realizó con un equipo Falcon L40 y los ensayos de flotación en celdas Denver D12. La recuperación global combinada (gravimetría 16,77 % + flotación 70,93 %) fue de 87,7 % Au y 57,82 % Ag, evidenciando la viabilidad técnica y ambiental del proceso propuesto para la pequeña minería.

Palabras clave: Alternativa al mercurio, beneficio de minerales, metales preciosos, pequeña minería, recuperación metalúrgica.

Abstract

Artisanal and small-scale mining (ASM) in Ecuador primarily uses mercury amalgamation to recover gold. Its widespread use stems mainly from its ease of implementation, low operating costs, and minimal need for specialized equipment. The purpose of this research is the mineralogical characterization and recovery of gold and silver from ores in southern Ecuador using a combined application of centrifugal gravity concentration and flotation. The sulfide ore was characterized by optical microscopy, X-ray diffraction (XRD), and X-ray fluorescence (XRF), identifying free gold and gold associated with pyrite, sphalerite, and galena. Concentration was performed using a Falcon L40 concentrator, and flotation tests were conducted in Denver D12 cells. The overall combined recovery (gravity concentration 16,77 % + flotation 70,93 %) was 87,7 % Au and 57,82 % Ag, demonstrating the technical and environmental viability of the proposed process for small-scale mining.

Keywords: Alternative to mercury, mineral processing, precious metals, small-scale mining, metallurgical recovery.

1. INTRODUCCIÓN

La explotación de minerales con contenidos de oro y plata en pequeña y mediana escala sigue representando un desafío tanto en términos económicos como ambientales. En este contexto, la técnica convencional de amalgamación representa el 20 % de la producción mundial de oro y el número de trabajadores en este sector asciende a 16 millones de personas en unos 80 países [1]. La amalgamación es un proceso de fácil aplicación que presenta bajas tasas de recuperación y libera compuestos tóxicos al medio ambiente cuando se calienta. Los compuestos liberados de la amalgama son considerados indestructibles y recirculan a través de los diversos ecosistemas, afectando suelos, cuerpos de agua y cadenas tróficas; sus efectos, han sido ampliamente documentados, evidenciando la acumulación de mercurio en el ambiente y su impacto en comunidades cercanas a zonas mineras [2-4].

La provincia de Zamora Chinchipe, en Ecuador, alberga depósitos auríferos del tipo aluvial y coluvial, los cuales se han formado por el arrastre del oro asociado a los yacimientos hidrotermales, debido a los factores meteorológicos de agua, aire y erosión de los suelos [5]. La región sur del Ecuador es reconocida por su riqueza mineral, lo que ha causado que experimente un crecimiento significativo de la minería artesanal y de pequeña escala. En la minería artesanal, la amalgamación es una de las técnicas más utilizadas para la recuperación de oro [6]; sin embargo, la técnica de amalgamación con mercurio resulta ineficiente cuando el oro se encuentra asociado a minerales sulfurados como pirita, arsenopirita y calcopirita [7, 8].

Entre las alternativas a la amalgamación se encuentran procesos como la concentración gravimétrica y la flotación por espumas, los cuales han cobrado relevancia, teniendo en cuenta que se busca una minería sostenible [9, 10]. En los últimos años los equipos de concentración gravimétrica han cobrado importancia, siendo bastante eficientes cuando las partículas de oro son relativamente gruesas; sin embargo, este proceso ha sido mejorado con la aplicación de una fuerza centrífuga que permite recuperar partículas de metales preciosos de tamaño ultrafino, siendo los equipos Falcon y Knelson los más utilizados a nivel industrial en países con potencial aurífero [11-13]. Cuando el oro y la plata están asociados a minerales sulfurados, la flotación se presenta como una alternativa eficiente, logrando concentrar las partículas

valiosas mediante la adición de reactivos específicos, que aumentan el carácter hidrofóbico de las partículas sulfuradas; no obstante, la aplicación efectiva de estos métodos requiere un conocimiento detallado de la composición mineralógica del mineral a procesar. La caracterización mineralógica juega un rol fundamental, ya que permite determinar la naturaleza y distribución de los metales valiosos en la mena [14]. Dentro de la caracterización mineralógica, la microscopía óptica es uno de los métodos más empleados para identificar metales preciosos, debido a su bajo costo y capacidad para identificar la liberación de estos metales [15].

Diversos estudios han demostrado la efectividad de la concentración centrífuga gravimétrica y la flotación en la recuperación de oro y plata. Aslam, et al. [16] en el 2022 analizaron la eficiencia de la concentración gravimétrica, flotación y cianuración en la minería artesanal de Kenia, concluyendo que la combinación de un concentrador Knelson y flotación permitió alcanzar una recuperación del 95,64 %, reduciendo la necesidad de cianuro. Huu Hoang, et al. [17] en el 2022 evaluaron el uso de celdas neumáticas Imhoflot™ en la flotación de partículas finas de oro, logrando una recuperación del 65 % - 68 % para tamaños menores a 20 μm , gracias a la generación de burbujas ultrafinas y alta eficiencia de colisión. Cuadros Vera y Moris Lopez [18] en el 2023 demostraron que la preconcentración y el uso de concentradores centrífugos gravimétricos como Falcon y espirales mejoró la recuperación de oro en aluviales en la provincia del Cusco, sustentando que alcanzaron una ley final de 15 OzAu/t en el concentrado, con una recuperación del 60 %.

La importancia de la caracterización mineralógica y la combinación de técnicas adecuadas para maximizar la recuperación de metales preciosos en operaciones de pequeña y mediana escala, motivó a los autores a realizar el presente estudio. Este, tiene como objetivo evaluar la recuperación de oro y plata en la provincia de Zamora Chinchipe, en Ecuador, empleando procesos de gravimetría y flotación, teniendo en cuenta la importancia de caracterizar muestras representativas de los lotes de mineral a procesar; además, los procesos propuestos pretenden mejorar el desarrollo económico social de las comunidades mineras en el país.

2. DESARROLLO

2.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo cuantitativo y cualitativo. Se aplica un enfoque cuantitativo basado en balances metalúrgicos y análisis estadísticos, complementado con un enfoque cualitativo que considera la mineralogía del yacimiento. El diseño es experimental aplicado, empleando conocimientos de geometalurgia en pruebas de concentración gravimétrica y flotación de relaves de minerales sulfurados en la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador.

El objetivo general de esta investigación es evaluar la recuperación de oro y plata de minerales sulfurados provenientes de la provincia de Zamora Chinchipe mediante la combinación de concentración gravimétrica y flotación, como alternativa técnica al proceso tradicional de amalgamación con mercurio. A este objetivo general contribuyen los siguientes objetivos específicos: realizar la caracterización mineralógica y el análisis químico del mineral sulfurado; evaluar la recuperación mediante concentración gravimétrica Falcon L40; determinar la recuperación de Au y Ag mediante flotación de los relaves gravimétricos; y, analizar estadísticamente la influencia de las variables operacionales.

La pregunta de investigación para este estudio fue ¿La combinación de concentración gravimétrica y flotación permite una recuperación superior al 80 % de oro y plata a partir de minerales sulfurados provenientes de la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador?

2.2 MUESTRA Y MUESTREO

Se trabajó con 70 kg de minerales sulfurados explotados por pequeños mineros de Zamora Chinchipe. La muestra fue homogeneizada y cuarteada mediante el método de roleo para obtener una fracción representativa.

2.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Ensayo químico: el contenido de oro se analizó por el método *Fire assay*, para lo cual se fundió la muestra usando óxido de plomo, sílice y bórax, la mezcla se fundió en un horno a más de 1050 °C, luego se obtuvo un regulo de plomo que se copeló para obtener el dore. La plata y otros metales se eliminaron del dore mediante ataque químico, en la fase final se pesó y se obtuvo el resultado. El contenido de Cu, As, Pb y Zn se determinó por vía húmeda, para lo cual se realizó una digestión de las muestras en soluciones ácidas y los analitos se determinaron en un espectroscopio de absorción atómica (AA).

Caracterización mineralógica: la identificación de las especies minerales, distribución y grado de liberación, presencia de oro libre y oro asociado a sulfuros (pirita, esfalerita, galena y calcopirita) se determinaron mediante técnicas de microscopía óptica de luz polarizante, difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX). El análisis modal a 500X del mineral de cabeza, con una granulometría del 65 % - 200 malla se analizó utilizando un microscopio óptico de luz polarizante. Los análisis de difracción de rayos X se realizaron utilizando un difractómetro D8 Advance con tubo de cobalto.

Pruebas de concentración centrífuga gravimétrica: se realizaron ensayos en el concentrador centrífugo Falcon L40, evaluando diferentes granulometrías y condiciones operativas (densidad de pulpa, fuerza G, presión de agua y agitación). La Tabla 1 muestra las condiciones operativas utilizadas considerando la mineralogía de la muestra.

Tabla 1: Condiciones de operacionales de la concentración con el Falcon L40

Parámetro	Valor
Densidad de pulpa, g/L	1 200
Agitación de pulpa, rpm	1 50
Fuerza G's	60
Presión del agua, PSI	3
Motor de Frecuencia, Hz	60

La evaluación del proceso se centró en dos variables principales: la recuperación y la ley de oro (Au) y plata (Ag) obtenidas en los concentrados gravimétricos.

Pruebas de flotación: los relaves de gravimetría fueron procesados en una celda de flotación Denver D12. La Tabla 2 muestra los parámetros de la prueba de flotación. Durante las pruebas de flotación se evaluó el efecto de las dosificaciones de CuSO₄, AR-1242 y AR-404 sobre la recuperación y la ley del concentrado de oro y plata. Para ello, se empleó un diseño factorial completo 2³, considerando tres factores a dos niveles y dos réplicas de las ocho combinaciones experimentales, para un total de 16 corridas experimentales. El análisis de los resultados se realizó mediante ANOVA para determinar la significancia estadística de los efectos principales y sus interacciones. Las concentraciones evaluadas fueron 100 y 200 g/t para CuSO₄, 20 y 60 g/t para el ditiofosfato AR-1242 (AR-1242) y 10 y 30 g/t para ditiofosfato AR-404 (AR-404).

Tabla 2: Parámetros pruebas de flotación.

Parámetro	Valor
Peso de muestra, g	1 000
RPM Rougher	1 200
RPM Scavenger	900
Flujo de aire Rougher, lt/sg	10
Flujo de aire Scavenger, lt/sg	5
Porcentaje de sólidos, %	40
pH	Natural = 6,5
CuSO ₄	Según diseño
Z-6, g/TM	100
AR-404	Según diseño
AR-1242	Según diseño
D-250, g/TM	30
Tiempo de acondicionamiento, min	5
Tiempo de flotación Rougher, min	7
Tiempo de flotación Scavenger, min	3

Evaluación y Análisis: la evaluación se realizó mediante balances metalúrgicos. La interpretación de datos se realizó con software especializados y mediante balances metalúrgicos. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto estadísticamente significativo de las dosificaciones de CuSO₄, AR-1242 y AR-404; así como, de sus interacciones sobre la recuperación de oro y plata obtenida en el proceso de flotación

Software Utilizados: los datos se recogieron en una hoja de Microsoft Excel y se analizaron con “Minitab 19.1.0”.

Limitaciones del Estudio: en primer lugar, la variabilidad mineralógica del yacimiento evaluado, representa una limitación clave, ya que las fluctuaciones en la composición de la mena pueden influir de manera directa en el comportamiento metalúrgico y, por ende, comprometer la replicabilidad exacta de los resultados a escala global. En segundo lugar, existieron restricciones logísticas y operativas en el acceso a volúmenes mayores de muestra, lo que circunscribió las pruebas experimentales a una escala representativa, pero limitada.

3. RESULTADOS

3.1 ENSAYO QUÍMICO

La determinación de la composición por elemento del mineral de cabeza se realizó mediante el ensayo por vía seca para las leyes de Au y Ag y por vía húmeda para las leyes de Cu, As, Pb, y Zn. La Tabla 3 muestra los resultados de los ensayos químicos.

Tabla 3: Composición de los elementos existentes

Au (g/TM)	Ag (g/TM)	Cu (%)	As (%)	Pb (%)	Zn (%)
11,95	198,95	0,71	0,53	1,33	5,78

3.2 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Microscopía Óptica. La identificación de minerales asociados al Au y Ag, así como la evaluación de su liberación, distribución, grado y potencial de separación se realizó con un microscopio óptico de luz polarizante. La Tabla 4 muestra los minerales identificados en una muestra representativa de 13 gramos.

Tabla 4: Especies mineralógicas detectadas por microscopio óptico

Minerales	Volumen (%)	Liberación (%)
Oro	0,00	0,00
Esfalerita	11,24	76,10
Calcopirita	0,63	70,18
Galena	2,79	75,52
Tennantita	0,11	0,00
Pirita	59,71	98,02
Arsenopirita	1,39	55,82
Pirrotita	0,01	0,00
Marcasita	0,04	0,00
Gangas	24,07	90,91
Total	99,99	

La Fig. 1 muestra las micrografías obtenidas con el microscopio óptico de luz polarizante.

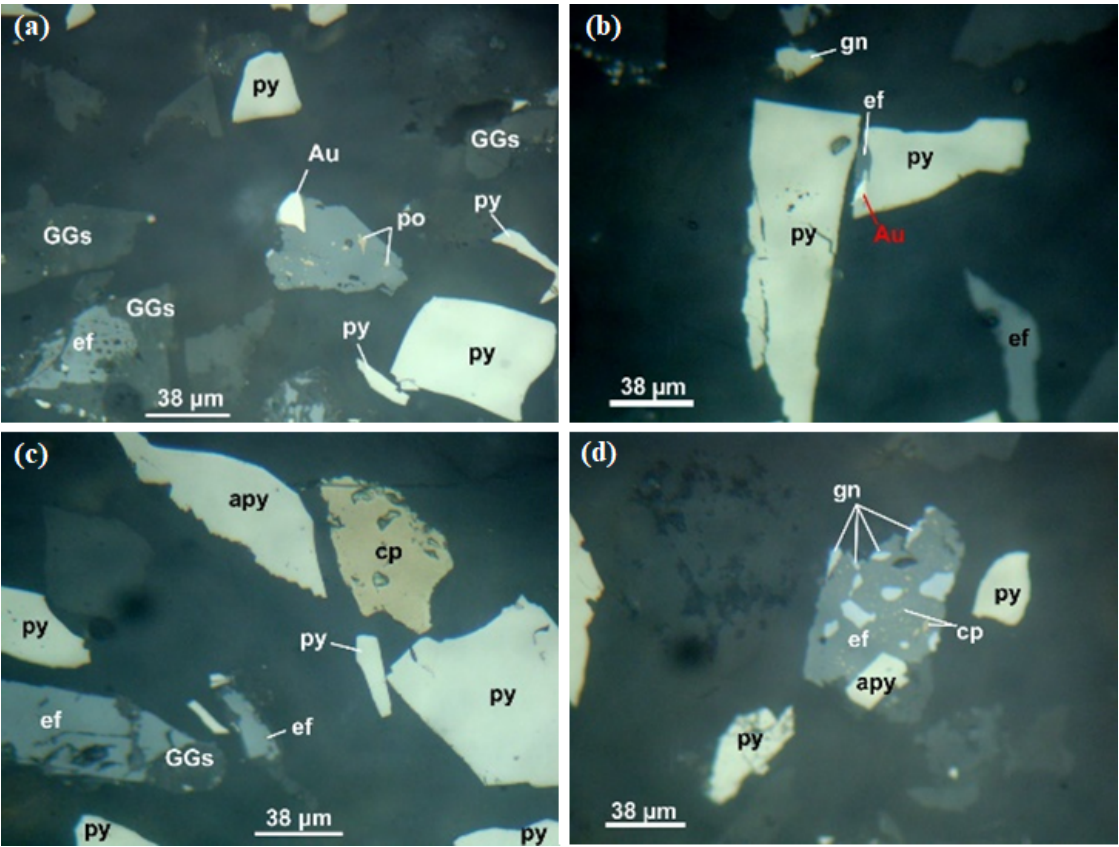


Figura 1: Micrografías: (a) Oro (Au) (26 μm) entrelazado con esfalerita (ef) y pirrotita (po); (b) Oro (16 μm) entrelazado con esfalerita y pirita (py); (c) Minerales libres: calcopirita (cp), esfalerita, pirita y arsenopirita (apy); (d) Pirita libre y esfalerita entrelazada con galena (gn) y arsenopirita. GGs: ganga.

Difracción de Rayos X: la identificación de las fases cristalinas del mineral se realizó utilizando difracción de rayos X. Los resultados (Tabla 5) indicaron que la rodocrosita y la pirita son los minerales predominantes, además de identificar cuarzo, moscovita, ortoclasa, piroxmangita, whitlockita, braunita, estaurolita, rankinita y azurita como parte de la ganga

Tabla 5: Especies mineralógicas detectadas por Difracción de Rayos X

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Carbonato (Rodocrosita)	MnCO ₃	29,5

Pirita	FeS ₂	24,3
Cuarzo	SiO ₂	15,6
Moscovita (Sericita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F)2	12,7
Esfalerita	(Zn, Fe) S	5,1
Feldespato K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	3,9
Piroxmangita	MnSiO ₃	3,4
Whitlockita	Ca ₉ MnH (PO ₄) ₇	2,0
Braunita	CaMn ⁺³ ₁₄ SiO ₂₄	1,4
Estaurolita	(Fe ²⁺ , Mg) ₂ Al ₉ (Si, Al) ₄ O ₂₀ (O, OH) ₄	< L.D.
Galena	PbS	< L.D.
Rankinita	Ca ₃ Si ₂ O ₇	< L.D.
Azurita	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	< L.D.

L.D.: Limite de detección

La Fig. 2 muestra el difractograma de una muestra típica.

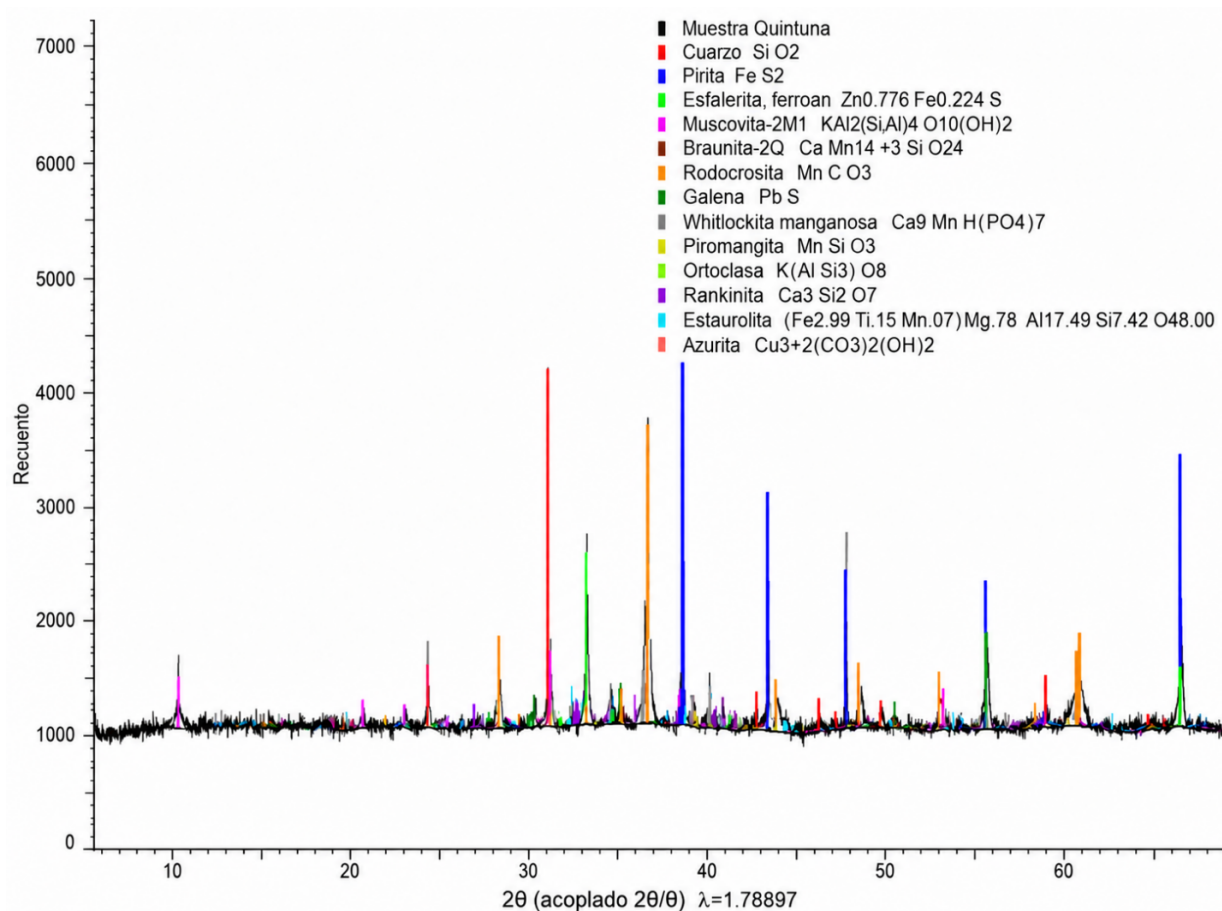


Figura 2: Difractograma de las especies mineralógicas detectadas por DRX.

Fluorescencia de Rayos X: Para correlacionar la concentración de elementos en la muestra de mineral de cabeza se realizó el análisis, identificando una mayor presencia de MnO, SiO₂, SO₃ y Fe₂O₃, según lo mostrado en la Tabla 6. Los resultados de XRF confirmaron la relación con el análisis de difracción de rayos X.

Tabla 6: Concentración de las especies detectadas por Fluorescencia de Rayos X

Óxidos	Concentración (%)
MgO	0,16
Al ₂ O ₃	9,46
SiO ₂	21,40
P ₂ O ₅	0,05
SO ₃	24,56
K ₂ O	1,70
CaO	2,00
TiO ₂	0,13
Cr ₂ O ₃	0,01
MnO	21,84
Fe ₂ O ₃	13,89
CuO	0,07
ZnO	3,21

Ga ₂ O ₃	0,01
As ₂ O ₃	0,36
Rb ₂ O	0,01
BaO	0,11
La ₂ O ₃	0,12
HfO ₂	0,01
Ta ₂ O ₅	0,01
PbO	0,88
Total	99,99

3.3 PRUEBAS DE CONCENTRACIÓN CENTRÍFUGA GRAVIMÉTRICA

Los mejores resultados (Tabla 7) de concentración gravimétrica se obtuvieron con una granulometría de 50 % -200 malla, logrando recuperar 16,77 % de Au y 18.01 % de Ag, con leyes de 63,86 Au g/t y 980,24 Ag g/t, y una razón de concentración de 30,65.

Tabla 7: Pruebas de centrifuga-gravimétrica

Granulometría	Rec. Au (%)	Ley Au (g/t)	Rec. Ag (%)	Ley Ag (g/t)
40 % - 200 Malla	9,37	45,24	11,61	820,14

45 % - 200 Malla	12,38	58,20	13,52	910,51
50 % - 200 Malla	16,77	63,86	18,01	980,24
55 % - 200 Malla	13,86	54,11	15,16	857,44
60 % - 200 Malla	12,64	50,29	14,64	851,67

La Fig. 3 muestra los resultados de las leyes de oro y plata en el concentrado y las diferentes granulometrías.

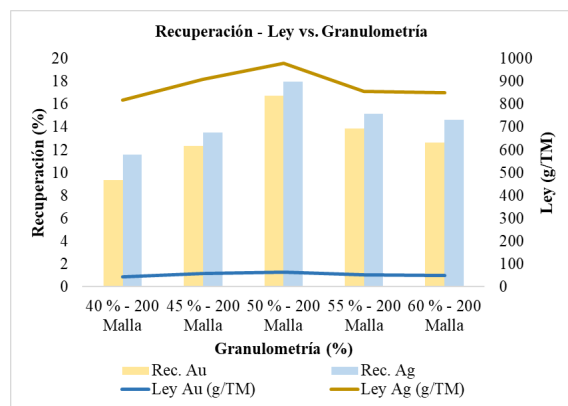


Figura 3: Comparativa de resultados de la concentración centrífuga-gravimétrica.

3.4 PRUEBAS DE FLOTACIÓN

Las pruebas de flotación se realizaron utilizando una celda Denver D12. Se evaluaron los efectos de CuSO_4 (100–300 g/t), AR-1242 (20–60 g/t) y AR-404 (10–30 g/t). La prueba más eficiente logró recuperar un 90.71 % de Au y 70.10 % de Ag, con concentrados de 45.24 Au g/t y 391.26 Ag g/t. Para esta prueba, se emplearon 300 g/t de CuSO_4 , 60 g/t de AR-1242 y 10 g/t de AR-404, correspondientes a la prueba número 4 del desarrollo experimental, como se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8: Pruebas de flotación

Orden	CuSO_4	AR-1242	AR-404	Rec. Au (%)	Ley Au (g/t)	Rec. Ag (g/t)	Ley Ag (g/t)
1	100	20	10	72,50	38,56	45,41	250,54
2	300	20	10	85,49	39,27	52,06	320,47
3	100	60	10	88,94	40,64	60,44	350,14
4	300	60	10	90,71	45,24	70,10	391,26
5	100	20	30	80,72	37,94	48,96	304,57
6	300	20	30	78,18	39,98	55,68	351,11
7	100	60	30	84,11	40,10	60,13	351,24
8	300	60	30	90,54	41,24	69,77	384,55
9	100	20	10	74,51	36,44	44,03	241,33
10	300	20	10	86,63	35,61	53,41	320,47
11	100	60	10	89,06	37,87	59,83	350,14
12	300	60	10	89,40	44,01	68,13	380,45
13	100	20	30	78,43	34,87	45,51	294,12
14	300	20	30	75,71	37,44	51,50	340,12
15	100	60	30	85,08	40,55	57,17	344,12
16	300	60	30	89,48	41,27	71,00	400,17

Análisis de la varianza para la recuperación de Au:

La Fig. 4 presenta el diagrama de Pareto de los efectos

estandarizados sobre la recuperación de Au, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. La línea vertical de referencia, correspondiente a un efecto estandarizado aproximado de 2,31, permite identificar los factores e interacciones estadísticamente significativos. El AR-1242 (factor B) presentó el mayor efecto sobre la recuperación de oro, con un valor estandarizado cercano a 16, lo que evidencia que su dosificación constituye la variable de mayor influencia en el proceso de flotación. Le siguieron la interacción triple CuSO_4 –AR-1242–AR-404 (ABC), el efecto principal del CuSO_4 (A), la interacción CuSO_4 –AR-404 (AC) y el efecto principal del AR-404 (C), cuyos valores superaron el límite de significancia. En contraste, las interacciones CuSO_4 –AR-1242 (AB) y AR-1242–AR-404 (BC) no superaron la línea de referencia, por lo que su influencia individual no fue estadísticamente significativa dentro del intervalo experimental evaluado. Estos resultados indican que la recuperación de Au depende principalmente de la dosificación de AR-1242, aunque también está condicionada por el efecto activador del CuSO_4 , el aporte del AR-404 y la interacción conjunta de los tres reactivos.

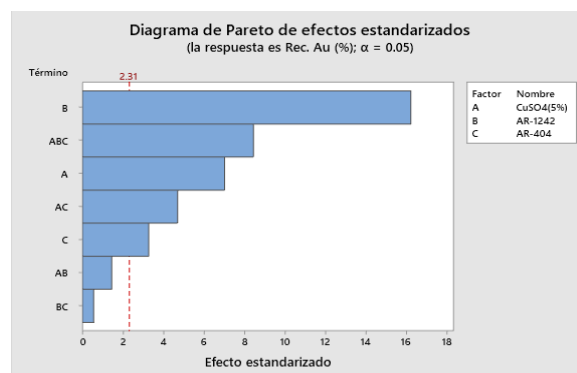


Figura 4: Gráfica de Pareto para la recuperación de Au.

La Ecuación 1 representa el modelo matemático para predecir la recuperación en porcentaje de Au (Rec.Au) en la flotación de relaves gravimétricos, con un coeficiente de correlación del 92,52 %, validando su confiabilidad en la Tabla 9.

Ecuación 1

$$\begin{aligned} \text{Rec. Au (\%)} = & 44,68 + 0,1542x_1 + 0,7846x_2 + 1,192x_3 \\ & - 0,002664x_1x_2 - 0,006274x_1x_3 \\ & - 0,02536x_2x_3 + 0,000123x_1x_2x_3 \end{aligned}$$

Donde, x_1 es CuSO_4 , x_2 es AR1242 y x_3 es AR404.

Tabla 9: Resumen del modelo de la recuperación de Au

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (predictivo)	AICc	BIC
1,16	98,13 %	96,49 %	43,11	92,52 %	87,08	64,04

S: error estándar de la regresión; PRESS: Suma de cuadrados del error de predicción; AICc: Criterio de Información de Akaike corregido; BIC: Criterio de Información Bayesiano.

Análisis de la varianza para la recuperación de Ag: la Fig. 5 presenta el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados para la recuperación de Ag. Se observa que el reactivo **AR-1242 (factor B)** presenta el mayor efecto estandarizado y supera ampliamente la línea de referencia correspondiente al nivel de significancia ($\alpha = 0,05$), evidenciando que es la variable con mayor influencia sobre la recuperación de plata. En segundo lugar, la interacción **ABC ($\text{CuSO}_4 \times \text{AR-1242} \times \text{AR-404}$)** también muestra un efecto significativo, seguida del efecto principal de **CuSO_4 (factor A)**. En contraste, las interacciones **AB**, **BC** y **AC**, así como el efecto principal de **AR-404 (factor C)**, presentan valores inferiores al límite de significancia, indicando que su contribución individual a la recuperación de Ag es menor dentro del intervalo experimental evaluado. Estos resultados demuestran que la dosificación del colector **AR-1242** constituye el factor de mayor incidencia en la recuperación de plata, mientras que las demás variables e interacciones ejercen una influencia secundaria bajo las condiciones analizadas.

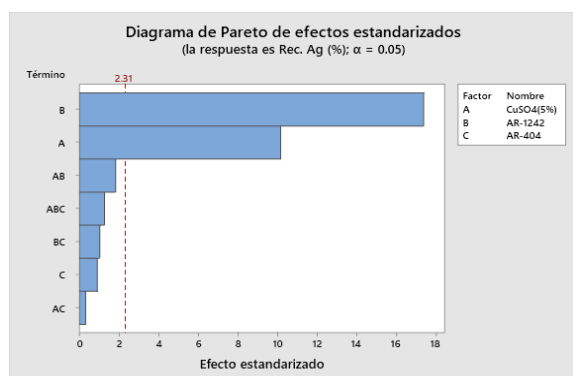


Figura 5: Gráfica de Pareto para la recuperación de Ag.

La Ecuación 2 estima la recuperación de Ag (Rec.Ag) en porcentaje en la flotación, con un coeficiente de correlación del 92,40 %, según la Tabla 10.

Ecuación 2

$$\begin{aligned} \text{Rec. Ag (\%)} = & 30,01 + 0,04732x_1 + 0,451x_2 + 0,322x_3 \\ & - 0,000156x_1x_2 - 0,000966x_1x_3 \\ & - 0,00777x_2x_3 + 0,000028x_1x_2x_3 \end{aligned}$$

Donde, x_1 es CuSO_4 , x_2 es AR1242 y x_3 es AR404

Tabla 10: Resumen del modelo de la recuperación de Ag.

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (predictivo)	AICc	BIC
1,72575	98,10 %	96,44 %	95,303	92,40 %	99,78	76,73

S: error estándar de la regresión; PRESS: Suma de cuadrados del error de predicción; AICc: Criterio de Información de Akaike corregido; BIC Criterio de Información Bayesiano.

Si bien, la mejor prueba de flotación alcanzó 90,7 % Au y 70,1% Ag, la recuperación total, considerando gravimetría y flotación en conjunto, se estabilizó en 87,72 % Au y 57,82 % Ag, lo que representa un valor promedio más realista para condiciones de operación en planta.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian la viabilidad de combinar la concentración gravimétrica centrífuga con la flotación para mejorar significativamente la recuperación de metales preciosos en minerales sulfurados de Zamora. Los ensayos de microscopía óptica en una muestra de mineral sulfurado de la provincia de Zamora Chinchipe identificaron la presencia de Au asociado con esfalerita-pirrotita (0,02 %) y esfalerita-pirita (0,03 %). La caracterización mineralógica determinó que la pirita (59,71 %) es el mineral dominante, seguido de la esfalerita (11,24 %), galena (2,79 %) y calcopirita (0,63 %), con una ganga del 24,07 %, complementada con rodocrosita (29,5 %) y cuarzo (15,6 %), según difracción de rayos X.

Para determinar la ley del mineral, se realizaron ensayos por vía seca, obteniendo 11,95 Au g/t y 198,95 Ag g/t, además de 0,71 % Cu, 0,53 % As, 1,33 % Pb y 5,78 % Zn por vía húmeda. Se realizaron pruebas de concentración centrífuga gravimétrica, logrando una mayor recuperación a 50 % y malla -200, con concentrados de 63,86 Au g/t y 980,24 Ag g/t.

Posteriormente, los relaves se procesaron por flotación en una celda Denver D12, alcanzando recuperaciones de 70,93 % de Au y 39,29 % de Ag, con concentrados de 45,24 Au g/t y 391,26 Ag g/t, utilizando CuSO_4 , AR-1242, AR-404 y D-250. La dosificación de CuSO_4 activó los minerales sulfurados, facilitando la flotación con colectores específicos [19].

En el estudio realizado por Aslam, et al. [16] se empleó un método similar para recuperar partículas gruesas mediante un concentrador Knelson, seguido de la flotación de finos utilizando una celda Imhoflot. Sin embargo, en su investigación se usaron reactivos como sosa cáustica, silicato de sodio y colectores del tipo xantato y ditiófosfatos, compuestos que presentan similitudes con los empleados en este trabajo. Además, la caracterización de los valores metálicos se realizó mediante microscopía óptica de luz reflejada. A diferencia de dicho estudio, esta investigación propone un equipo de flotación específico con el objetivo de mejorar la recuperación, lo que se traduce en valores

significativamente superiores en comparación con los reportados por estos autores.

El análisis de varianza aplicado a la recuperación y calidad del concentrado de oro y plata reveló que el ditiofosfato AR-1242 tuvo el mayor impacto, seguido por la dosificación de sulfato de cobre. Es importante señalar que en el proceso de flotación el sulfato de cobre realiza la función de activador, en la fase final de flotación, donde se encuentran minerales de transición de sulfuros a óxidos. Por otro lado, el AR-1242 y AR-404 son colectores secundarios siendo el Z-6 colector primario. Además, el AR-1242 también actúa como espumante, favoreciendo la estabilidad y selectividad del colchón de espuma [20]. Los modelos obtenidos mostraron una alta correlación con los valores de recuperación de ambos metales, y las pruebas más eficientes de gravimetría y flotación permitieron obtener productos con leyes superiores a 1 Oz-Au/Tc.

Más allá de la eficiencia metalúrgica, la principal ventaja de esta propuesta radica en su impacto ambiental y económico. Frente a la amalgamación con mercurio, que libera compuestos tóxicos y conlleva pérdidas económicas en relaves, la combinación gravimetría-flotación reduce la dependencia de sustancias contaminantes y permite a los mineros artesanales recuperar hasta cinco veces más oro del mismo volumen de mineral procesado. En términos prácticos, para los mineros de Zamora Chinchipe, una recuperación cercana al 90 % significa un incremento sustancial en ingresos, mejorando la rentabilidad y contribuyendo a la sostenibilidad social y económica de las comunidades locales.

Estos resultados demuestran la viabilidad técnica del proceso, basado en metodologías ambientalmente sostenibles, con potencial beneficio para la minería aurífera de pequeña escala en la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador.

Sin embargo, este estudio presenta algunas limitaciones. La variabilidad mineralógica de los yacimientos puede afectar la replicabilidad de los resultados, y el acceso limitado a mayores volúmenes de muestra restringió la validación a escala piloto. Además, aunque el Falcon L40 y las celdas Denver son equipos de laboratorio ampliamente utilizados, su implementación a escala comunitaria requiere adaptación tecnológica y capacitación de los mineros.

De cara a trabajos futuros, se recomienda ampliar las pruebas con microscopía electrónica para caracterizar

con mayor precisión la distribución del oro y la plata; así como, desarrollar un modelo geometalúrgico que permita estimar las reservas auroargentíferas de Zamora. Igualmente, sería pertinente evaluar el escalamiento industrial de estas tecnologías, incorporando análisis de costo-beneficio y estudios de ciclo de vida para consolidar su aporte en la transición hacia una minería artesanal más limpia y eficiente.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La microscopía óptica del mineral sulfurado de cabeza identificó trazas de oro libre asociado a ef-po (esfalerita-pirrotita) con enlaces imposibles de liberar y ef-py (esfalerita-pirita) con enlaces moderadamente fáciles de liberar, ambas con distribuciones volumétricas del 0,02 %; además, determinó distribuciones de 11,24 % de ef, 2,79 % de gn, 0,63 % de cp, 59,71 % de py, y 24,07 % de GGs gangas. El análisis XRD de una muestra representativa identificó la presencia de la ganga como principales componentes a: rodocrosita y cuarzo, con distribuciones de 29,5 % y 15,6 %, respectivamente, como especies de ganga.

Las pruebas metalúrgicas de concentración centrífuga gravimétrica determinaron la mayor recuperación de Au y Ag a una granulometría de 50 % - 200 Malla, alcanzando recuperaciones de 16,77 % de Au, y 18,01 % de Ag, con una calidad del concentrado de 63,86 Au g/t, y 980,24 Ag g/t, presentando una ratio de 30,65.

La mejor prueba de flotación de los relaves de concentración gravimétrica a una granulometría de 50 % - 200 malla, determinó una recuperación de 70,93 % de Au y 39,81 % de Ag, y las leyes fueron del concentrado de 45,24 Au g/t, y 391,26 Ag g/t, con un consumo de 300 g/t de CuSO₄, 60 g AR-1242, y 10 g de AR-404, valores que corresponden a la prueba 4 del diseño de estadístico.

Las pruebas confirmaron la viabilidad de las técnicas combinadas gravimetría-flotación, con una recuperación global de 87,72 % para Au y 57,82 % para Ag. Bajo condiciones óptimas de flotación, se alcanzaron valores máximos de 90,7 % Au y 70,1 % Ag, lo cual evidencia el potencial del proceso bajo parámetros controlados.

5.2. RECOMENDACIONES

Caracterización Avanzada: Realizar microscopía electrónica de barrido (SEM) en el mineral de cabeza para determinar con precisión la distribución del Au y Ag, e identificar fases minerales portadoras de valores metálicos.

Modelamiento Geometalúrgico: Desarrollar un modelo geometalúrgico integral del yacimiento que optimice la estimación y previsión del comportamiento de las reservas de minerales auroargentíferos de la mina estudiada en la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Bugmann, F. Brugger, T. Zongo, and A. van der Merwe, "“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," *Environ. Sci. Policy*, vol. 133, pp. 87-97, 2022/07/01/ 2022, doi: 10.1016/j.envsci.2022.03.009.
- [2] S. Ilyas and J.-C. Lee, *Gold Metallurgy and the Environment*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [3] J. Olivero-Verbel, N. Alvarez-Ortega, M. Alcala-Orozco, and K. Caballero-Gallardo, "Population exposure to lead and mercury in Latin America," *Curr. Opin. Toxicol.*, vol. 27, pp. 27-37, 2021/09/01/ 2021, doi: 10.1016/j.cotox.2021.06.002.
- [4] M. M. Veiga, P. A. Maxson, and L. D. Hylander, "Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining," *J. Clean. Prod.*, vol. 14, no. 3, pp. 436-447, 2006/01/01/ 2006, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.08.010.
- [5] G. Frækaland Vangsnes, "The meanings of mining: A perspective on the regulation of artisanal and small-scale gold mining in southern Ecuador," *Extr. Ind. Soc.*, vol. 5, no. 2, pp. 317-326, 2018/04/01/ 2018, doi: 10.1016/j.exis.2018.01.003.
- [6] J. Jonkman and M. de Theije, "Amalgamation: Social, technological, and legal entanglements in small-scale gold-mining regions in Colombia and Suriname," *Geoforum*, vol. 128, pp. 202-212, 2022/01/01/ 2022, doi: 10.1016/j.geoforum.2021.10.017.
- [7] P. C. Velásquez-López, M. M. Veiga, and K. Hall, "Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 3, pp. 226-232, 2010/02/01/ 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.10.010.
- [8] S. Leary, R. H. Sillitoe, P. W. Stewart, K. J. Roa, and B. E. Nicolson, "Discovery, Geology, and Origin of the Fruta del Norte Epithermal Gold-Silver Deposit, Southeastern Ecuador," *Econ. Geol.*, vol. 111, no. 5, pp. 1043-1072, 2016, doi: 10.2113/econgeo.111.5.1043.
- [9] I. Park, "Advances in Selective Flotation and Leaching Process in Metallurgy," *Metals*, vol. 12, no. 1, p. 144, doi: 10.3390/met12010144.
- [10] R. Vysyaraju, A. K. Pukkella, and S. Subramanian, "Enhanced gravity closed spiral classifier: Experimental investigation," *Adv. Powder Technol.*, vol. 33, no. 10, p. 103743, 2022/10/01/ 2022, doi: 10.1016/j.appt.2022.103743.
- [11] Q. Dehaine, Y. Foucaud, J. S. Kroll-Rabotin, and L. O. Filippov, "Experimental investigation into the kinetics of Falcon UF concentration: Implications for fluid dynamic-based modelling," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 215, pp. 590-601, 2019/05/15/ 2019, doi: 10.1016/j.seppur.2019.01.048.
- [12] Q. Chen, H. Yang, L. Tong, Z. Liu, G. Chen, and J. Wang, "Analysis of the operating mechanism of a Knelson concentrator," *Miner. Eng.*, vol. 158, p. 106547, 2020/11/01/ 2020, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106547.
- [13] J. Quituña, V. Sanmartín, D. González, and N. E. X. Juan. (2016) Una alternativa limpia para los procesos productivos de la minería artesanal, distrito minero Chinapintaza, sector La Pangui. *Minería: Minería y energía*. 40-43.
- [14] E. Matio, A. S. de Freitas, G. R. Moreira, and T. L. de Sousa, "Sulphide Mineral-Bearing Gold Flotation at Bench and Pilot Scale from a Refractory Gold Ore," in *Proceedings of the 62nd Conference of Metallurgists, COM 2023*, Cham, 20 October 2023: Springer Nature Switzerland, pp. 579-585, doi: 10.1007/978-3-031-38141-6_79.
- [15] B. De Castro, M. Benzaazoua, A. Chopard, and B. Plante, "Automated mineralogical characterization using optical microscopy: Review and recommendations," *Miner. Eng.*, vol. 189, p. 107896, 2022/11/01/ 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107896.
- [16] I. N. Aslam, N. Orcon, B. Klein, and P. N. Alam, "Optimizing Gold Recovery of Artisanal Mining: A Lesson Learned from Kenya," *J. Rekayasa Kim. Lingkungan*, vol. 17, no. 1, pp. 44-52, 2022, doi: 10.23955/rkl.v17i1.23223.
- [17] D. Huu Hoang *et al.*, "Recovery of fine gold loss to tailings using advanced reactor pneumatic flotation ImhoflotTM," *Miner. Eng.*, vol. 184, p. 107649, 2022/06/30/ 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107649.
- [18] V. M. Cuadros Vera and K. L. Moris Lopez, "Caracterización del mineral aurífero para la evaluación de técnicas de recuperación de oro del

proyecto Minero-Metalúrgico Ocongate – Quispicanchis Cusco," Licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2023.

- [19] M. Chibesa, F. Nakhaei, and L. Alagha, "Surface Chemistry and Activation of Pyrite in Flotation: Enhancing Critical Minerals Recovery," *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, pp. 1-23, doi: 10.1080/08827508.2025.2518970.
- [20] P. Pawliszak, B. H. Bradshaw-Hajek, W. Skinner, D. A. Beattie, and M. Krasowska, "Frothers in flotation: A review of performance and function in the context of chemical classification," *Miner. Eng.*, vol. 207, p. 108567, 2024/02/01/ 2024, doi: 10.1016/j.mineng.2023.108567.