

Influencia minerográfica en la recuperación de oro en los procesos metalúrgicos de la Minera Qero's Gold de Paucartambo- Cusco

Mineragraphic influence on the recovery of gold in the metallurgical processes of Minera Qero's Gold de Paubustamantecartambo- Cusco

Alvaro Fernando Soto Mayorga ¹, Juan José Leguía Letellier ², Julio Danilo Bustamante Jaen ³

Recibido: 01/07/2020 - Aprobado: 30/10/2020 - Publicado: 30/11/2020

RESUMEN

Los estudios minerográficos permitieron seleccionar el proceso metalúrgico más adecuado para una óptima recuperación de oro, cuya caracterización tanto microscópica y macroscópica, permitió experimentar pruebas metalúrgicas en moliendabilidad, cianuración en botellas, concentración centrífuga, flotación *rougher*. Como resultado de estas pruebas metalúrgicas en el mineral base permitió una recuperación del 94.48% en flotación selectiva con una mezcla (*blending*) de 36% de veta Inkaracay y 64% de veta mina Sanca 2.

Palabras claves: Minerografía; flotación; cianuración; oro.

ABSTRACT

Mineragraphic studies allowed selecting the most suitable metallurgical process for optimal gold recovery, whose characterization both microscopic and macroscopic, allowed to undergo metallurgical tests on grinding, bottle cyanidation, centrifugal concentration, rougher flotation. As a result of these metallurgical tests on the base mineral, it allowed a 94.48% recovery in selective flotation with a blending of 36% Inkaracay vein and 64% Mina Sanca 2 vein.

Keywords: Mineragraphic; flotation; cyanidation; gold.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minería, Metalúrgica y Geográfica. Lima-Perú.

Autor para correspondencia: fernando_45_94@hotmail.com

2 Ingeniero Metalurgista. E-mail: juanleguia@huajayrumi.pe

3 Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica. Cusco-Peru, E-mail: daniilo-bj@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú existen depósitos orogénicos, los que son explotados de manera informal y poco organizada. Qero's Gold se sitúa en la provincia de Paucartambo en la región del Cusco, forma parte de la Cordillera Oriental en cuya geología se originan yacimientos cordilleranos, también conocido como filones de cuarzo, vetas en zonas de cizalla, yacimientos mesotermiales, yacimientos orogénicos, los cuales tienen como peculiaridad principal presentar poco volumen y una ley alta (hasta kg/T) (Acosta, 2012).

Diversos estudios evidencian la utilidad de la aplicación de los estudios mineragráficos dentro de las operaciones unitarias en metalurgia y se plantea etapas de preconcentración para optimizar la recuperación de oro diseminado con presencia de cuarzo y la flotación selectiva de oro en menas auríferas (Audebaud, 1973), (Quispe, 2018).

El presente trabajo buscó un proceso metalúrgico adecuado para mejorar la recuperación del oro en base a la minerografía. Para lo cual se realizó una caracterización mineralógica y pruebas metalúrgicas de moliendabilidad, concentración gravimétrica, flotación *rougher* y lixiviación por agitación en botellas (Azareño, 2009).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El mineral del yacimiento de oro de Qero's Gold, inicialmente se sometió a un muestreo no probabilístico de tipo intencionado, seleccionando ocho kilos de muestra para análisis químico de cabeza, concentrado y relave. Siete kilos de muestras de mena y concentrado para análisis mineragráficos microscópico y macroscópico; para el estudio de textura, asociaciones mineralógicas, tamaño de grano, etc. Trecientos kilos de muestra para pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio tanto en mineral como concentrado.

2.1. Materiales y equipos

- Chancadora de mandíbulas.
- Molino de bolas.
- Celda de flotación.
- Concentrador centrifugo Falco F-140.
- Columnas de lixiviación.
- Microscopio electrónico de barrido.
- Microscopio de luz polarizada.
- Difractómetro.

2.2. Caracterización mineragráfica

Sirve para el análisis de minerales opacos utilizando un microscopio polarizante de reflexión o luz reflejada o luz incidente a diferencia de la mineralogía óptica donde se utiliza el microscopio de luz transmitida y para el trabajo de investigación.

Al caracterizar mineragráficamente cada muestra, se identifican las especies mineralógicas y se determina el grado de liberación de cada especie. Toda esta información ayudará a obtener información aplicable a la optimización de las pruebas metalúrgicas

Actualmente, la principal herramienta para el análisis de la superficie radicular es el uso de la microscopía electrónica de barrido (MEB), es un instrumento que permite la observación y análisis de las superficies de materiales orgánicos e inorgánicos (Estrada et al., 2009). Así mismo se aplicó la microscopía electrónica de barrido para la identificación y verificación de la presencia de oro en solución sólida con los sulfuros o minerales submicroscópicos de oro, debido a que la recuperación metalúrgica es muy variable y no se puede percibir a simple vista ni con el microscopio de luz polarizada, que minerales están perjudicando la recuperación en el concentrador centrifugo, tampoco se puede determinar el porcentaje de oro libre presente en el concentrado y mucho menos la cantidad de mineral de oro que queda atrapado en la matriz de cuarzo-pirita.

Se usa las siguientes abreviaciones al observar en el microscopio: cuarzo (Qz), pirita (py), goethita (goe), gangas (GGs), oro (Au), arsenopirita (aspy), sulfosal (sul), calcopirita (cpy), hematita (he), *electrum* (el) y arsenopirita (apy). Para las pruebas metalúrgicas malla (m)

2.3. Pruebas metalúrgicas

Se efectuó una preparación mecánica de las muestras para obtener 100% - 10 m Tyler, para posteriormente obtener una muestra representativa mediante homogenizado y cuarteo, posteriormente se formaron los compósitos de trabajo a los que etiquetamos como muestra 1, 2 y 3. Se realizó una caracterización de la cabeza mediante análisis químico, se prosiguió con las pruebas de moliendabilidad en un molino de bolas estándar de laboratorio de 8"x 10" a un porcentaje de sólidos de 66%. Las pruebas de concentración gravimétrica se realizaron mediante el equipo Falcón L-40 a una fuerza de gravedad de 98 G y una presión de agua de 1.5 PSI, adicionalmente se utilizó 10 kg de muestra con granulometría de 65% -200m y un flujo de alimentación de 1800 ml/min. La lixiviación por agitación en botellas se realiza a un pH entre 10.5 – 11.0, con 30% de sólidos, 2 kg de mineral con 85% -m200, la fuerza de cianuro es 1500 ppm. La flotación *rougher* a 32% de sólidos, con mineral a un tamaño de 65% -200m y 85% -m200, los reactivos empleados en las pruebas de flotación fueron el CuSO₄ como agente activador de los sulfuros presentes, el A-404 como colector específico de las especies portadoras de Au, Z-11 como colector secundario y MIBC como espumante.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Mineralización

Se presenta la veta Inkaracay con un afloramiento aproximado de 130 m, la cual tiene una potencia que varía entre 15 y 20 cm, cuya profundidad de la veta llega a los 60 cm, el ensamble es Qz-Py-Ca-Au se observa carbonatos (ankerita) así como oro grueso y fino en las microfracturas de la pirita, y oro en forma diseminada en el cuarzo lechoso con una ley promedio de promedio 20 g/T.

La veta Mina Sanca 2 presenta un afloramiento de más de 350 m, con una potencia en promedio de 17 cm, el ensamble es Qz-Py-Ca-Au, se aprecia oro grueso en forma de oro nativo atrapado dentro en una matriz de cuarzo gris (Figura 1), también se presenta como laminas en el contacto cuarzo y pizarra, el oro fino se muestra como relleno en las micro fracturas de la pirita, mientras que el oro fino diseminado en el cuarzo, presenta una ley en promedio de 45 g/T.

La zona de *stockwork* corresponde a una estructura mineralizada con presencia de varias familias de vetillas de cuarzo lechoso; las venillas predominantes tienen una dirección SE-NO, el ensamble en la roca es de tipo Qz-Py-Apy-Au-Ag presenta alta piritización, el mineral

encapsulado esta entre cuarzo y pirita, algunas venillas superan los 250 g/T obteniendo así una explotación en global un área de 1,000 m² aproximadamente con una ley de 8 g/T teniendo una mineralización probada de 40,000 T a 15 m de profundidad y mineralización probable 120 m en profundidad.

3.2. Análisis mineralógico de grados de liberación

3.2.1 Veta Inkaracay

Las microfotografías de la Figura 2a muestran partículas libres de arsenopirita (apy) al 89.17% en grado de liberación, así como grano mixto binario de oro nativo (Au), Pirita (Py), Goetita (Goe) y ganga (GGs). Así como presencia de calcopirita (Cp) incrustada en la ganga.

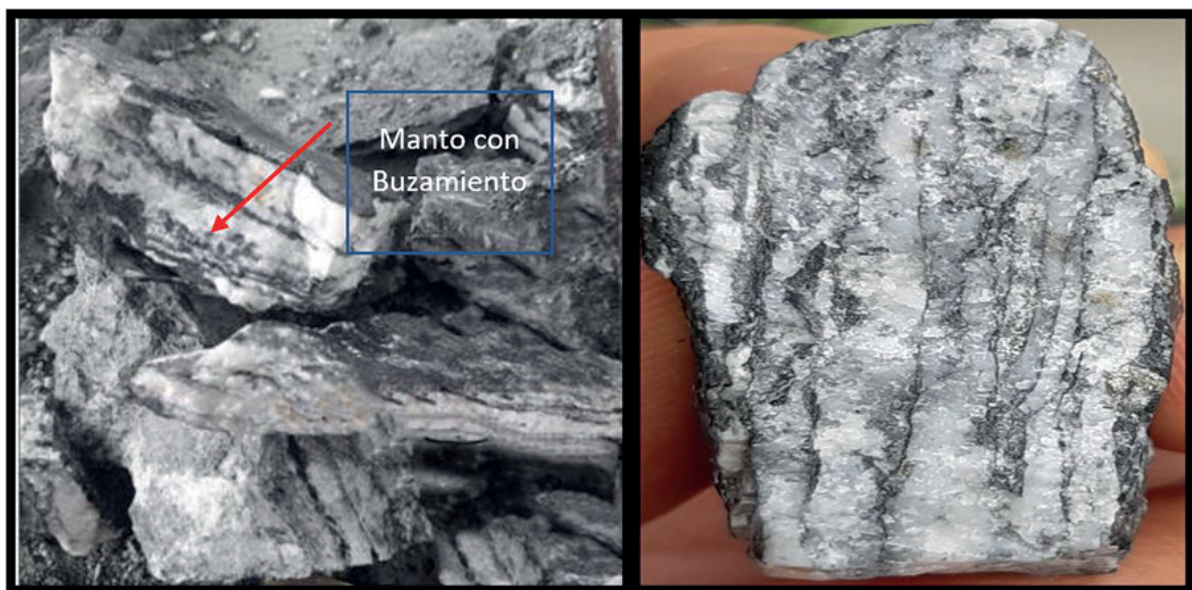


Figura 1. Zona con diseminación de Oro en venillas en diversas direcciones

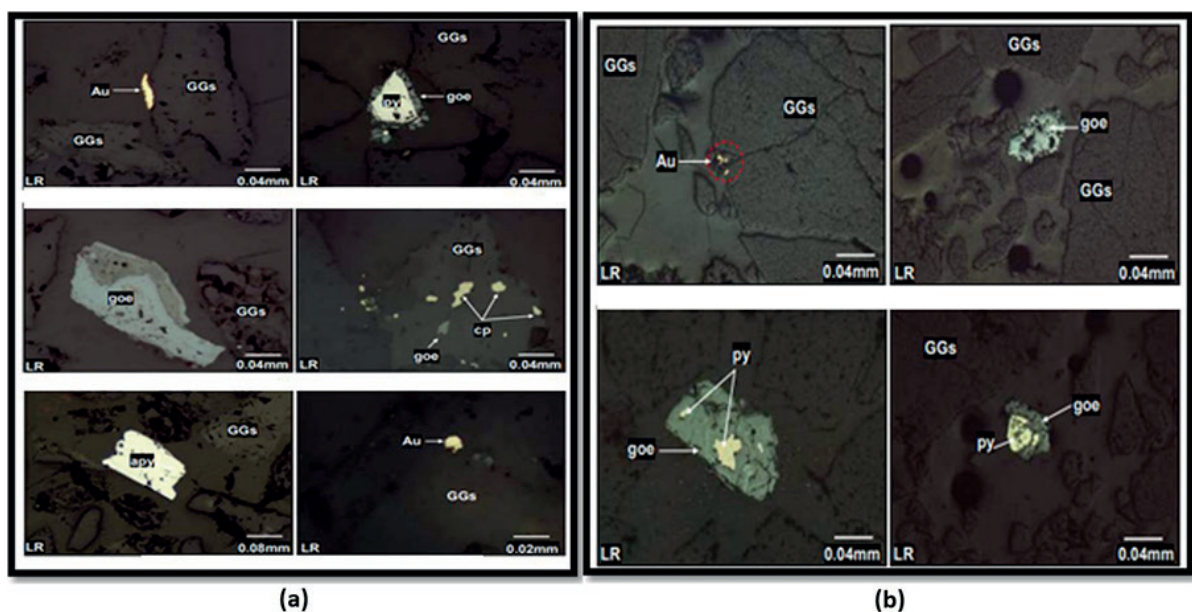


Figura 2. Microfotografía grado de liberación Veta Inkaracay a malla +100

Por otro lado, en la Figura 2b presentan grano mixto binario de gangas no metálicas y oro nativo (GGs-Au). Al igual que granos libres de minerales de gangas no metálicos (GGs) y goethita (Goe). Como también granos mixtos binarios de pirita y goethita.

3.2.2 Veta Mina Sanca 2

De la misma manera se realizó un análisis mineralógico para la Veta Mina Sanca 2, se puede deducir que en la microfotografía de la figura 3, se aprecia trazas de oro con un grado de liberación de oro mínimo 76.49% no tiene una buena separación con referencia a sus gangas 99.91% podemos ver uniones con goetitas al 93.76% en grado de liberación.

También se puede apreciar que cuanto más molido este el mineral tendrá un mayor grado de liberación esto a

una malla -200 en la microfotografía se ve al oro separado de sus gangas.

3.3. Análisis por difracción de Rayos X

La difracción de rayos X realizados a las muestras de las vetas Inkaraccay y Mina Sanca, se observa la presencia de cuarzo, muscovita, dolomita, pirita, albita, apatito, cuarzo, clinocloro y rutilo (Figura 4 y 5).

3.4. Análisis por microscopía electrónica de barrido

Se estudia al concentrado de oro gravimétrico a fin de identificar presencia de oro en solución sólida con los sulfuros o minerales submicroscópicos de oro.

En la Figura 6a se observa aproximadamente un 20% de presencia de pirita, trazas de *electrum* mineral de oro y

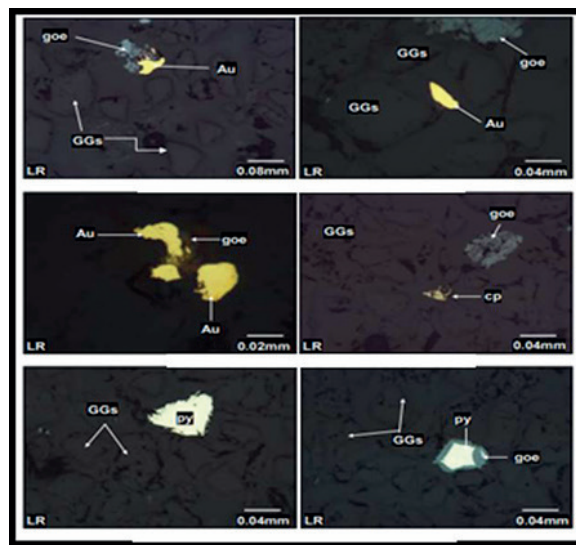


Figura 3. Microfotografía grado de liberación Veta Mina Sanca 2 malla -200

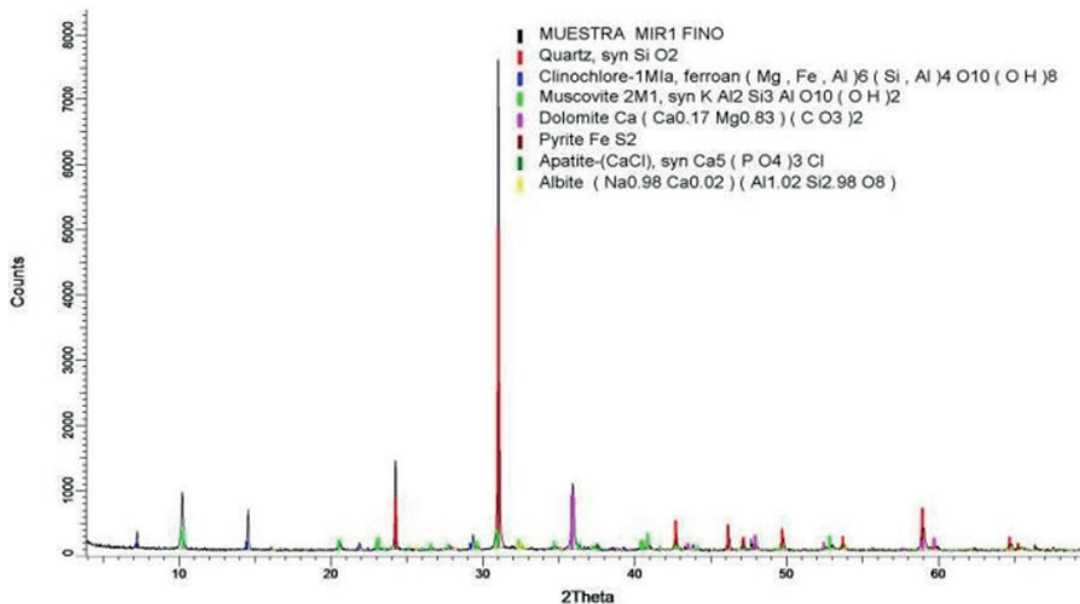


Figura 4. Difractograma de la Muestra MIR 1 Veta Inkaraccay

plata, así como presencia de arsenopirita en el concentrado gravimétrico, la parte grisácea corresponde a granos de cuarzo con tamaños menores a 300 µm.

En la Figura 6b al aplicar un zoom en el microscopio electrónico de barrido al oro podemos ver inclusiones de pirita lo cual conlleva a un encapsulamiento de pirita dentro de una matriz de cuarzo; el mineral de oro presente como *electrum* forma el 93% de oro y 7% de plata.

3.5. Composición mineralógica del concentrado

Mediante el uso del microscopio electrónico de barrido, se determina la composición porcentual de los minerales presentes en la muestra (Tabla 1), donde la especie de interés de estudio es el oro y representa el 0.1% en volumen de la muestra en trazas de *electrum*.

Tabla 1. Composición Mineralógica Porcentual

Minerales	Porcentaje
Cuarzo	63%
Pirita	18%
Calcita	6%
Arsenopirita	5%
Hematita	4%
Especies menores	
Alumina	2%
Sulfosal	1.6%
esfalerita	0.1%
electrum	0.1%

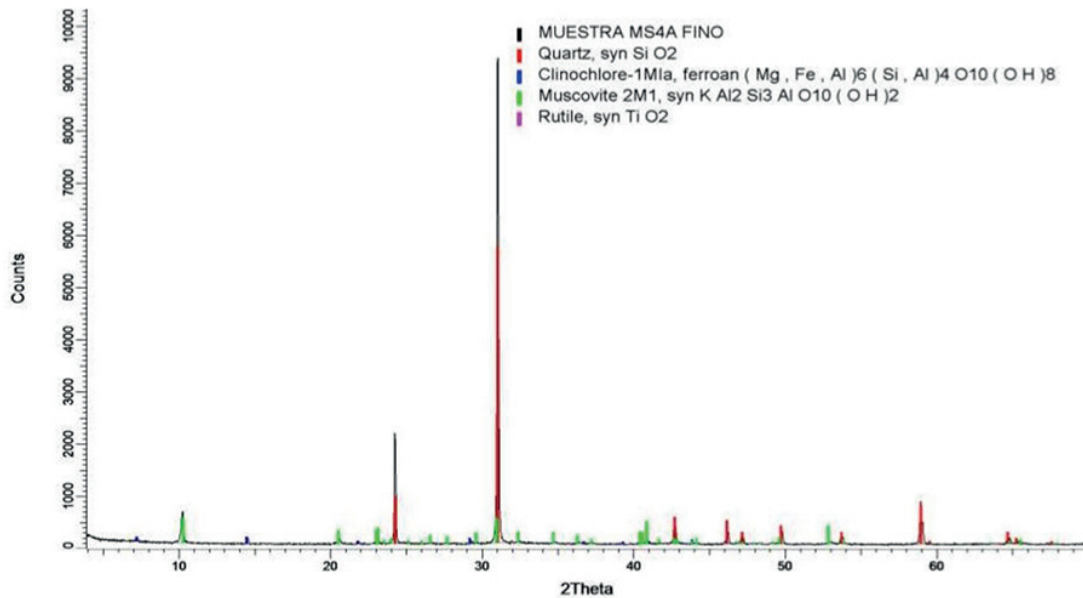


Figura 5. Difractograma de la Muestra MS 4 Veta Mina Sanca 2

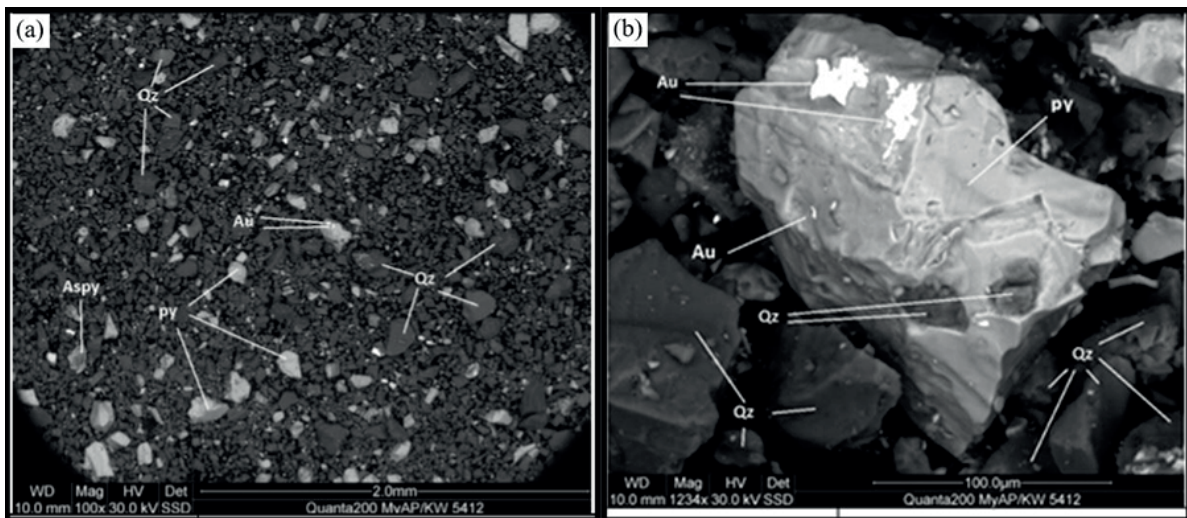


Figura 6. Muestra un grano de pirita a 150 µm con inclusiones de 20 µm y 2 µm de oro en forma de *electrum* así como inclusiones de cuarzo

3.6. Análisis metalúrgico

3.6.1 Porcentaje de mezcla o blending mineralógico

Esta tabla 2 muestra el porcentaje respectivo de mezcla (*blending*), que están codificadas como muestra 1, 2 y 3, utilizados para el análisis de moliendabilidad, concentración gravimétrica, flotación *rougher* y lixiviación directa.

Tabla 2. Codificación, peso de las muestras para los respectivos procesos metalúrgicos y porcentaje de mezcla o *blending*

	Código	Peso (kg)	Porcentaje (%)
Muestra - 1	V. Inkaracay	28	63.64%
	V. Mina San. 2	16	36.36%
Muestra - 2	V. Inkaracay	18	36.00%
	V. Mina San. 2	32	64.00%
Muestra - 3	V. Inkaracay	28	49.12%
	V. Mina San. 2	29	50.88%

En la tabla 3 se observa el análisis químico de cabeza del mineral para el respectivo balance metalúrgico.

Tabla 3. Análisis químico de cabeza

Código de muestras	Leyes			
	Au (g/T)	Ag (g/T)	Fe (%)	As (%)
Muestra -1	0.16	<0.5	4.15	0.15
Muestra -2	2.92	<0.5	3.47	0.06
Muestra -3	1.95	<0.5	5.06	0.12

3.6.2 Moliendabilidad

Los resultados de las pruebas de moliendabilidad, donde a mayor tiempo de residencia en el molino se logra un mayor grado de liberación, y se obtiene una liberación de 65% -200 malla en un tiempo promedio de 19.37 minutos con una granulometría óptima de 100 micrones.

Tabla 4. Resultados de la prueba de moliendabilidad

Código de Muestras	Resumen Tiempo Molienda		
	% -m200	Tiempo (min)	P80 (µm)
Muestra -1	65	16.40	110
	85	29.50	65
Muestra -2	65	31.20	100
	85	43.60	68
Muestra -3	65	17.50	115
	85	27.60	67

3.6.3 Concentración Gravimétrica

Se aplica la concentración gravimétrica ya que es un método adecuado para separar y concentrar oro grueso libre, también por su alto peso específico. Se realizaron dos pruebas de concentración gravimétrica en Falcon L-40, con las muestras denominadas Muestra -2 y Muestra -3.

En la tabla 5 se observa un bajo porcentaje de recuperación por el método de concentración gravimétrica solo recuperando oro grueso a medio y no el oro fino.

Tabla 5. Concentración Gravimétrica

Muestra	Ley (g/t)		Recuperación (%)	
	Au	Ag	Au	Ag
Conc. Grav. - Muestra -2	89.78	7	49.19	13.40
Conc. Grav. - Muestra -3	132	7.7	58.61	14.63

3.6.4 Lixiviación por agitación en botellas

La Figura 7 muestra el porcentaje de recuperación de oro y plata con respecto a un tiempo de 72 horas, donde la baja recuperación de oro y plata (menor que 19%) está relacionado al efecto *preg-robbing*, este efecto ocurre en presencia de carbón, la muestra utilizada presenta un contenido de 1.12% de carbón, además es de tipo refractario al proceso de lixiviación debido a que el oro se encuentra

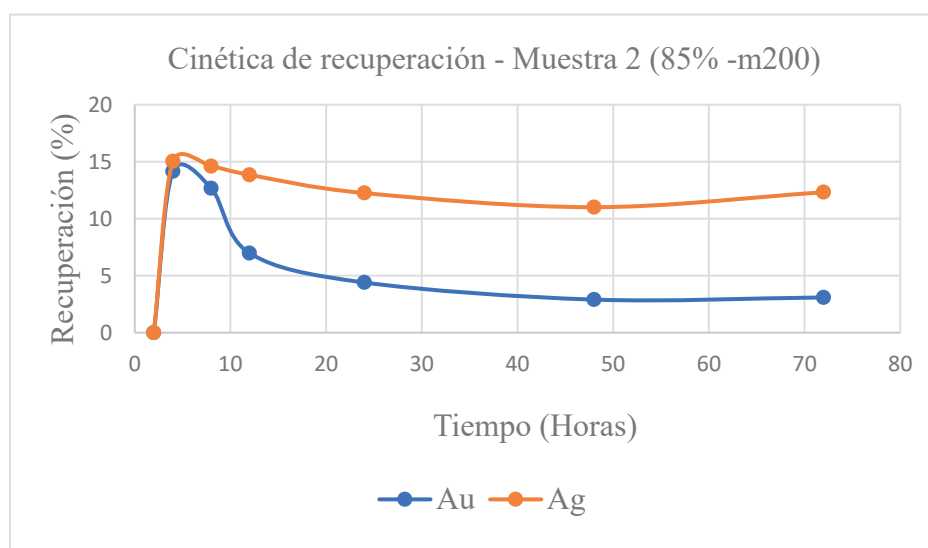


Figura 7. Cinética de recuperación - Muestra 2 (85% -m200)

ocluído en una matriz de pirita y presenta contenidos de arsenopirita, este tipo de contenidos con lleva a un consumo del cianuro que es 2 Kg/T a las 72 horas como efecto adverso la recuperación de oro. (Figura 8).

3.6.5 Flotación rougher

En la tabla 6 para llegar a una recuperación del 95.54% de oro se debe trabajar con una granulometría de 85% - 200 m a un pH de 7.7 para evitar la flotación de pirita en lugar del oro, como reactivos para la flotación se utilizó al CuSO₄ para deprimir la pirita, colector primario al A-404 y colector secundario Z-11, así como espumante al MIBC

VII. DISCUSION

Con el uso de la minerografía para tener una caracterización del mineral más profundo y fidedigno, se derivó a ejecutar un análisis microscópico tanto de luz polarizada como la microscopia electrónica de barrido, con lo cual se pudo observar en las asociaciones mineralógicas un encapsamiento de oro en una matriz de cuarzo y pirita, presencia de material carbonáceos, sulfosales de cobre y plomo las cuales impiden que la liberación del material valioso sea buena, parte de las gangas que son perjudiciales en el proceso metalúrgico son las arsenopiritas que actúan como cianicidas al igual que el manto de 107 piedra pizarra que cubre la matriz de cuarzo gris y que por su dureza

impide que la liberación del metal valioso en molienda no sea la más adecuada.

Se determinó que el proceso metalúrgico más adecuado para el tipo de mineral trabajado es la flotación selectiva con una mezcla (*blending*) de 36% mineral de veta Inkaracay y 64% de mineral veta Mina Sanca 2, a una granulometría de 100 μ m, un porcentaje de solidos de 34% y a un pH ligeramente alcalino de 7.9, se brinda las condiciones de acondicionamiento necesario para obtener un concentrado de oro al 95.54% en recuperación.

VIII. CONCLUSIONES

- Según la minerografía con el uso del microscopio de luz polarizada, el oro se encuentra entre los tamaños de 10 a 60 micras con un grado de liberación del 80%; y entre los tamaños de 20 a 30 micras el oro se encuentra en intercrecimiento con el cuarzo, goethita, pirita y arsenopirita.
- Al caracterizar el mineral con el uso de un microscopio electrónico de barrido (MEB), se demuestra que la composición del *electrum* es de 92.99% de Au y 7.01% de Ag, la Pirita y la Arsenopirita contienen oro en su red cristalina con tamaños de oro de hasta 2 micras

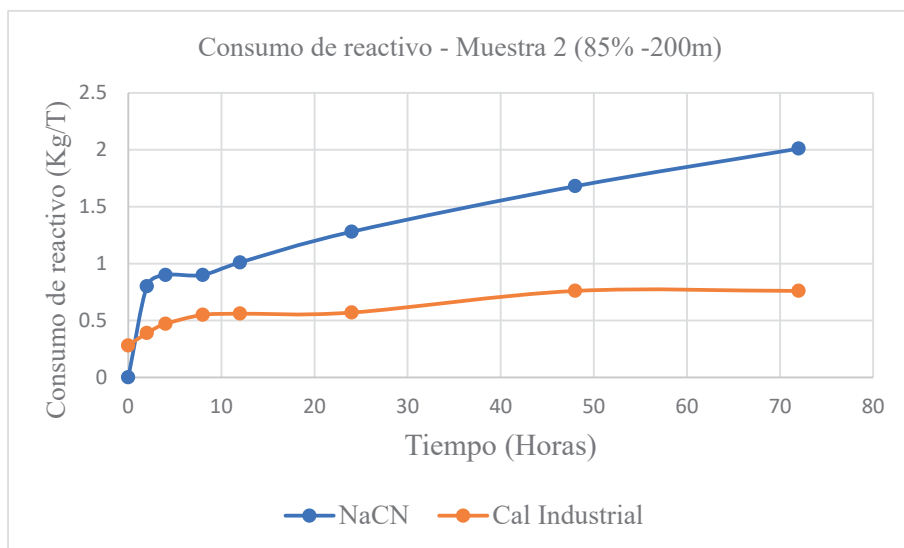


Figura 8. Consumo de reactivo – Muestra 2 (85% -200m).

Tabla 6. Balance metalúrgico flotación Ro – Muestra- 2 (85% -m200)

Productos	Peso		Ley			Recuperaciones (%)			
	(%)	(g/t)	Au	Ag	As	Au	Ag	As	Fe
Conc. Ro. (P01)	5.14	57.30	9.50	0.87	26.98	95.54	50.74	88.75	39.23
Relave	94.86	0.15	<0.50	0.01	2.27	4.46	49.26	11.25	60.77
Cab. Calculada	100.00	3.08	0.96	0.05	3.54	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		2.91	<0.50	0.06	3.47				

- Se determinó que el mejor procedimiento metalúrgico para obtener alta recuperación de oro es la flotación selectiva debido a sus características y condiciones del mineral; se puede concluir también que la granulometría repercute de manera directa debido a que se tuvo mejor porcentaje de recuperación a una granulometría más fina 85% -200m a diferencia de una granulometría de 65% -200m. logrando un 95.54% de recuperación que implica una mejora significativa en el proceso.

IX. REFERENCIAS

- Acosta, H. et. A. (2012). Recuperación de oro y plata de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 10(19), 28–37. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/503>
- Audebaud, E. (1973). Geología de los cuadrángulos de Ocongate y Sicuani, hojas 28-t y 29-t. *Repositorio Institucional INGEMMET*, 72. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/143>
- Azareño, A. et. A. (2009). Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 12(24), 49–55. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/356>
- Estrada, W., Rodríguez, J., & Solís, J. (2009). Recubrimientos delgados obtenidos por procedimientos físico-químicos. In *Universidad Nacional de Ingeniería. Editorial Universitaria*. <https://docplayer.es/170554751-Recubrimientos-delgados-obtenidos-por-procedimientos-fisico-quimicos-primera-edicion-digital-enero-lima-peru.html>
- Quispe, V. (2018). Estudio minerográfico y determinación microscópica del grado de liberación de los minerales sulfurados de cobre. In *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa* (Issue Ley 29497). <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6724>