

Análisis de la caracterización mineralógica de los pórfidos de cobre como soporte a los procesos de flotación

Analysis of the mineralogical characterization of copper porphyries as a support for flotation processes

Guillermo Kenneth Iriarte Dávila¹, Madeleine Guillen Gómez², Edmundo Abdul Alfaro Delgado³

Recibido: 05/01/2022 - Aprobado: 14/09/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

La industria minera de los yacimientos tipo pórfidos de cobre, procesan minerales complejos y de baja ley relacionados al batolito de Andahuaylas - Yauri. Uno de los problemas relacionados a esta práctica, es el tipo de mineral, perjudicando el tratamiento minero – metalúrgico que incide en el consumo de energía excesiva y en la recuperación crítica de minerales económicos. La investigación tiene como objetivo analizar la caracterización mineralógica; luego contrastar el comportamiento de los minerales en el proceso de flotación de minerales en los yacimientos de pórfidos de cobre y con ello implementar mejoras a la recuperación de minerales. Las técnicas utilizadas son la difracción de rayos X, microscopía óptica-electrónica y análisis químico. Otorgaron una confiabilidad y un soporte para determinar cualitativa y cuantitativamente las fases minerales que ocasionan problemas en la flotación de minerales de cobre. La conclusión principal es que la caracterización mineralógica abarca actividades que utilizan una mejor comprensión de las propiedades del mineral y los residuos, que impactan positiva o negativamente en el valor del producto.

Palabras claves: cobre, flotación, mineralogía, microscopía, recuperación.

ABSTRACT

The mining industry of porphyry copper deposits process complex and low-grade minerals (Romero Toledo et al., 2017). One of the problems related to this practice, is the type of mineral, harming the mining - metallurgical treatment that affects the consumption of excessive energy and the critical recovery of economic minerals (Mudd, 2010). The objective of the research was to analyze the mineralogical characterization; then to contrast the behavior of the minerals in the process of flotation of minerals in the porphyry deposits of copper and with it to implement improvements (Díaz Villena, 2017). The techniques used were X-ray diffraction, optical-electronic microscopy (Manzaneda Cabala, 2010) and chemical analysis. They provided reliability and support to determine qualitatively and quantitatively the mineral phases that cause problems in the flotation of copper minerals (Donoso Droguett, 2020). The main conclusion is that mineralogical characterization encompasses activities that utilize a better understanding of the properties of the ore and residues, which impact positively or negatively on the value of the product.

Keywords: copper, flotation, mineralogy, microscopy, recovery.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, E.P. Geometalurgia. Lima, Perú
Ingeniera Industrial. Autor para correspondencia: guillermo.iriarte@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-4366>

2 Universidad Nacional de San Agustín. Lima, Perú
Docente Investigador REGINA, Ingeniería Geológica. E-mail: mguillen@unsa.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8181-8581>

3 Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima, Perú
Docente Investigador. E-mail: ealfaro@puccp.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5331-1388>

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de beneficios de minerales de cobre deben ser evaluados en forma rutinaria y continuamente para obtener resultados eficientes. La caracterización mineralógica se ha convertido en un proceso de diagnóstico teniendo en cuenta tres grandes procesos como son: Identificación de los minerales, cuantificación de los minerales y por último las razones de las dificultades en la flotación de los minerales económicos (Sarquis, 2012).

Un deficiente conocimiento de la caracterización mineralógica tiene como resultado un inadecuado procesamiento de menas, presentando una molienda excesiva e innecesaria y con ella costos que debieron ser evitados, mientras que una molienda insuficiente conducirá a una deficiente liberación de minerales económicos (Zumaran Ferrofin, 2017). La investigación propuesta aborda la aplicación de conceptos teóricos y considera la existencia de diferentes enfoques: modelos de análisis, optimización y consolidación de información teórica. La investigación tiene como objetivo analizar la caracterización mineralógica; luego contrastar el comportamiento de los minerales en el proceso de flotación de minerales en los yacimientos de pórfidos de cobre y con ello implementar mejoras a la recuperación de minerales (Díaz Villena, 2017).

II. MÉTODOS

En un programa de muestreo, se necesita resolver inicialmente cuántas muestras son necesarias para los diferentes ensayos y técnicas involucradas en el desarrollo de un estudio confiable. Si el número de muestras es demasiado pequeño, el modelo puede ser inexacto o incluso defectuoso (Torres Guerra et al., 2021).

El tamaño y la selección de las muestras es aplicado según los datos geológicos acompañados de la experiencia interna de los procesos de beneficio y yacimientos minerales, de las cuales se determinó que sería 35 muestras. Se realizaron observaciones macroscópicas con esto se determinó el tipo de roca. A continuación, se muestrearon 15 kg de sondaje y se realizaron los siguientes estudios:

- Mineralogía para caracterización Minerales por Qemscan.
- Mineralogía para caracterización microscópica óptica y electrónica.
- Análisis por difracción de rayos X de polvo
- Pruebas metalúrgicas de Flotación.

Con la planificación de los estudios se establecieron los objetivos de la prueba y, por lo tanto, la información requerida de los resultados (por ejemplo, calibres, ensayos, tasas de flotación y tratamiento de productos, etc. (Espinoza S. et al., 2021). Conociendo la información que se requiere, la prueba se planifica con respecto a lo siguiente:

- Tipo y tamaño de celda que se utilizará

- Peso de la muestra de alimento requerido para cada prueba
- Calidad y cantidad de agua a utilizar
- Densidad de flotación, etc.
- Reactivos de flotación

Todos los reactivos que se utilizarán durante la prueba deben prepararse con las concentraciones requeridas antes de comenzar. La frescura de algunos reactivos es importante. Cuanto más diluido sea el reactivo, más precisa será la tasa de adición, pero mayor será la adición de volumen a la celda (Castro Andrade & Calderón Celis, 2021).

2.1. Programa QA/QC

Los errores son aditivos en toda la cadena de valor del muestreo y generan pérdidas tanto monetarias como intangibles. El objetivo es recoger muestras representativas para describir con precisión el material en cuestión. La recogida de muestras va seguida de una reducción de la masa y del tamaño del fragmento para proporcionar una submuestra para el ensayo. Todo este proceso puede ser particularmente difícil en el entorno de bajo grado (por ejemplo, los metales preciosos) y puede requerir protocolos especiales.

III. RESULTADOS

El propósito de la investigación es analizar la relación de la caracterización de las especies mineralógicas, el grado de liberación, tamaño de grano y asociaciones por análisis (Microscopía óptica-electrónica) y realizar un análisis de los resultados de caracterización mineralógica que influyen en la flotación de pórfidos de cobre y determinar las consecuencias en la recuperación de minerales (Pérez Barnuevo, 2014).

Se obtuvo 35 muestras de sondajes diamantinos con diferente litología para realizar los diferentes análisis. Las muestras se trabajaron de la siguiente forma: 15 kg. para pruebas metalúrgicas de las cuales se seleccionó 1kg para análisis de Qemscan (análisis de cabeza-relaves) y también se seleccionó una muestra para análisis de microscopía óptica y difracción de rayos X.

Se tomó una fracción de mineral representativa, (debidamente homogeneizada y cuarteada, en el divisor rotatorio) para efectuar el análisis químico. Se verifica la homogeneidad de cuarteo con envío de muestras duplicadas. A cada una de las muestras se analizaron los siguientes elementos: Cu, Fe, Mo, Ag; Au; cobre secuencial, cobre soluble en ácido cítrico, azufre total, insolubles (ver Tabla 1).

En el histograma se puede observar que existen dos poblaciones, la primera de baja ley y la segunda de alta ley (ver Figura 1).

3.1. Análisis de las Pruebas de Flotación Cinética Rougher

Las pruebas de flotación cinética Rougher se orientaron a definir las curvas cinéticas de flotación de cada una de las 35

Tabla 1. Resultados de análisis químico

N°	Identificación Muestras	Cu %	Fe %	Ag g/t	Au g/t	S_Total %	Cu_Ox %	Cu_SS %	Cu_CN %	Cu_R %
1	200848003	0.66	2.18	3.25	0.01	0.85	0.04	0.02	0.17	0.43
2	200837001	0.66	2.55	1.52	0.15	0.47	0.05	0.05	0.24	0.35
3	200837004	0.67	2.60	1.18	0.05	0.44	0.07	0.07	0.32	0.25
4	200837007	0.23	2.44	0.56	0.04	0.15	0.04	0.03	0.14	0.07
5	200839003	0.42	2.53	1.39	0.06	0.57	0.02	0.02	0.06	0.35
6	200840006	0.51	3.37	1.06	0.02	0.71	0.03	0.03	0.10	0.35
7	200841003	0.39	2.75	0.68	0.04	0.26	0.04	0.03	0.17	0.17
8	200841005	1.04	2.69	2.52	0.06	1.20	0.06	0.05	0.21	0.72
9	200843002	0.63	2.58	1.63	0.04	0.49	0.05	0.05	0.17	0.37
10	200843007	0.57	2.84	1.21	0.15	0.46	0.05	0.04	0.17	0.32
11	200844006	0.75	2.84	1.22	0.10	0.76	0.04	0.04	0.16	0.50
12	200845003	1.37	3.08	3.61	0.25	1.29	0.05	0.03	0.24	1.04
13	200845007	0.54	3.38	2.26	0.09	0.98	0.03	0.03	0.13	0.36
14	200847007	0.31	1.05	0.78	0.16	0.16	0.04	0.02	0.24	0.05
15	200845005	0.13	3.85	0.33	0.01	0.23	0.06	0.03	0.03	0.07
16	200847002	0.14	1.72	0.26	0.01	0.13	0.05	0.03	0.04	0.07
17	200847004	0.12	2.22	0.26	0.02	1.14	0.00	0.00	0.01	0.11
18	200849002	0.20	2.03	0.52	0.01	0.42	0.01	0.01	0.01	0.18
19	200835001	0.17	1.37	0.30	0.01	0.16	0.02	0.01	0.03	0.12
20	200836002	0.22	2.50	0.48	0.02	0.14	0.03	0.03	0.13	0.07
21	200836005	0.16	1.76	0.17	0.01	0.27	0.01	0.00	0.01	0.15
22	200836006	0.33	3.31	1.64	0.03	0.35	0.01	0.01	0.02	0.28
23	200838002	0.16	3.78	0.22	<0.005	0.36	0.02	0.02	0.06	0.07
24	200838003	0.16	2.77	0.99	0.03	0.97	0.01	0.00	0.02	0.13
25	200838004	0.15	3.14	0.56	0.01	0.24	0.01	0.00	0.01	0.14
26	200840003	0.28	3.72	1.68	0.03	2.10	0.01	0.01	0.03	0.23
27	200842004	0.29	2.90	0.82	0.04	0.23	0.03	0.02	0.11	0.14
28	200843005	0.24	2.50	0.66	0.02	0.29	0.01	0.01	0.03	0.19
29	200846007	0.19	3.07	0.39	0.04	0.42	0.02	0.01	0.06	0.12
30	200848006	0.28	2.92	0.59	0.05	0.15	0.04	0.03	0.19	0.06
31	200850001	0.28	1.44	0.29	0.01	0.34	0.02	0.01	0.02	0.24
32	200850002	0.45	16.11	0.75	0.01	0.66	0.02	0.02	0.16	0.25
33	200836001	0.17	6.40	0.15	<0.005	0.46	0.00	0.00	0.01	0.15
34	200837002	0.21	13.91	0.46	<0.005	6.31	0.00	0.01	0.02	0.17
35	200835003	0.82	6.46	3.57	0.03	1.07	0.05	0.09	0.66	0.05
	Promedio	0.40	3.56	1.08	0.05	0.72	0.03	0.02	0.12	0.24
	Max	1.37	16.11	3.61	0.25	6.31	0.07	0.09	0.66	1.04
	Min	0.12	1.05	0.15	0.01	0.13	0.00	0.00	0.01	0.05

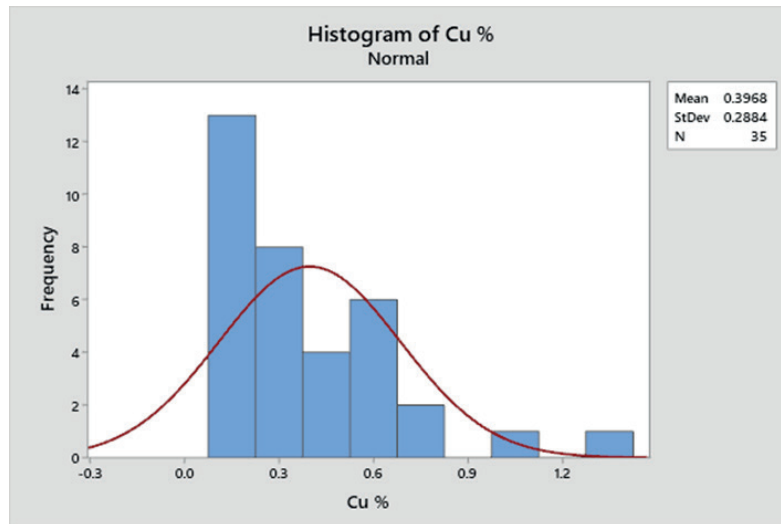


Figura 1. Histograma de análisis químico cobre

muestras y las recuperaciones metálicas correspondientes de los minerales de cobre. Es decir, definir el tiempo adecuado para lograr la recuperación metálica en el proceso de flotación.

Las pruebas se realizaron a un tiempo de 16 minutos de flotación, considerando como tiempos de medición: 1', 2', 4', 8', 10', 16'. Siendo esta última en donde se obtiene la mayor recuperación.

Durante el desarrollo de las pruebas, se observaron diferentes respuestas metalúrgicas; es así que se tomó nota de condiciones que podrían ser asociadas al comportamiento metalúrgico de cada muestra y que dificulta la recuperación de los minerales de cobre.

Según la tabla, los resultados obtenidos la media de ley de cobre está en 0.3968%, la recuperación de cobre esta 83.95% mientras que la recuperación de plata esta 73.57% y la recuperación de oro está en 62.00%, en base a los resultados de optimización la recuperación de cobre mejoro a 87.17% en promedio (Tabla 2).

Las pruebas de flotación de limpiezas, realizadas en esquema de circuito abierto, (TCA); se realizaron para identificar la calidad de los concentrados de las 35 muestras, que se obtienen con tres etapas de limpieza.

Para cada una de las pruebas de flotación Cleaner, se procedió según el esquema que se describe en la Figura 2. Es importante recalcar que se trata de evaluaciones de limpieza en circuito abierto, lo que implica que los relaves de cada una de las tres etapas, no retorna al proceso de limpieza.

Los concentrados obtenidos en la tercera limpieza fueron analizados por; cobre, hierro.

Durante el desarrollo de las pruebas, se observaron diferentes respuestas metalúrgicas y se anotaron los posibles factores que condicionan la calidad del concentrado.

La calidad de los concentrados ha sido afectada principalmente por las asociaciones de las menas de cobre con los minerales de hierro y otras gangas. En menor frecuencia la calidad de los concentrados ha sido afectada por el contenido de arcillas, que causan problemas de dilución de concentrados.

En las pruebas de flotación de limpieza; se registraron un gran número de muestras, donde solo se emplearía una etapa de limpieza para obtener concentrado final, con ley de cobre alrededor de 30 %. Sin embargo, también se registraron muestras que van a requerir necesariamente de tres etapas de limpiezas para obtener valores alrededor de 30% de cobre. Del conjunto de muestras evaluadas, existen alrededor de 11 muestras, que posiblemente presenten asociaciones muy complejas, entre los minerales de cobre y los minerales de hierro, que no permiten obtener un concentrado final superior a 20 % de ley de cobre. En las gráficas inferiores, se observa relaciones de presencia de cobre secundario, (soluble en cianuro), en el mineral de cabeza, vs. los contenidos de cobre y de hierro en los concentrados obtenidos. En la Figura 3 las muestras en la que se supera el 30% de Cu, en el concentrado final, se explica por la presencia de mayor cantidad de Cu secundario en la muestra de cabeza; a su vez, el contenido de hierro en estos concentrados es bajo; lo que contribuye para alcanzar más alto grado de Cu.

Otro factor muy importante en las características del concentrado es la presencia de arcillas. Por lo general los contenidos de estas oscilan entre cada muestra. En la gran mayoría se denota que a menor contenido de arcillas en la cabeza mayor probabilidad de obtener leyes superiores a 30 % de Cu; y esto se torna más notorio cuando hay presencia de Montmorillonita. En la Etapa de limpieza, para minimizar la presencia de las arcillas, se trabajó a un % de sólidos de 15% y un paleteo de 15 paletes/min.

Con respecto al factor *mass pull* obtenido, la flotación en laboratorio se realiza bajo un paleteo estándar, de 21

Tabla 2. Estadística de las muestras investigadas

Variable	N	Media	SE Mean	StDev	Mínimo	Mediana	Máximo
Cu %	35	0.3968	0.0488	0.2884	0.1188	0.2788	1.3734
Rec_Cu, %	35	83.95	1.43	8.48	58.35	85.96	94.68
Rec_Ag,	35	73.57	3.17	18.78	23.62	75.67	99.40
Rec_Au	35	62.99	3.15	18.62	18.70	69.72	95.41
Rec Maximo (%)	35	87.17	1.40	8.27	59.00	89.35	98.66
TOT_ARCILLAS	35	6.595	0.254	1.503	3.924	6.445	10.179
TOT_CARBNATOS	35	8.94	1.52	9.00	2.41	6.04	47.11
TOT_CLORITA	35	4.062	0.450	2.665	0.436	3.755	13.722

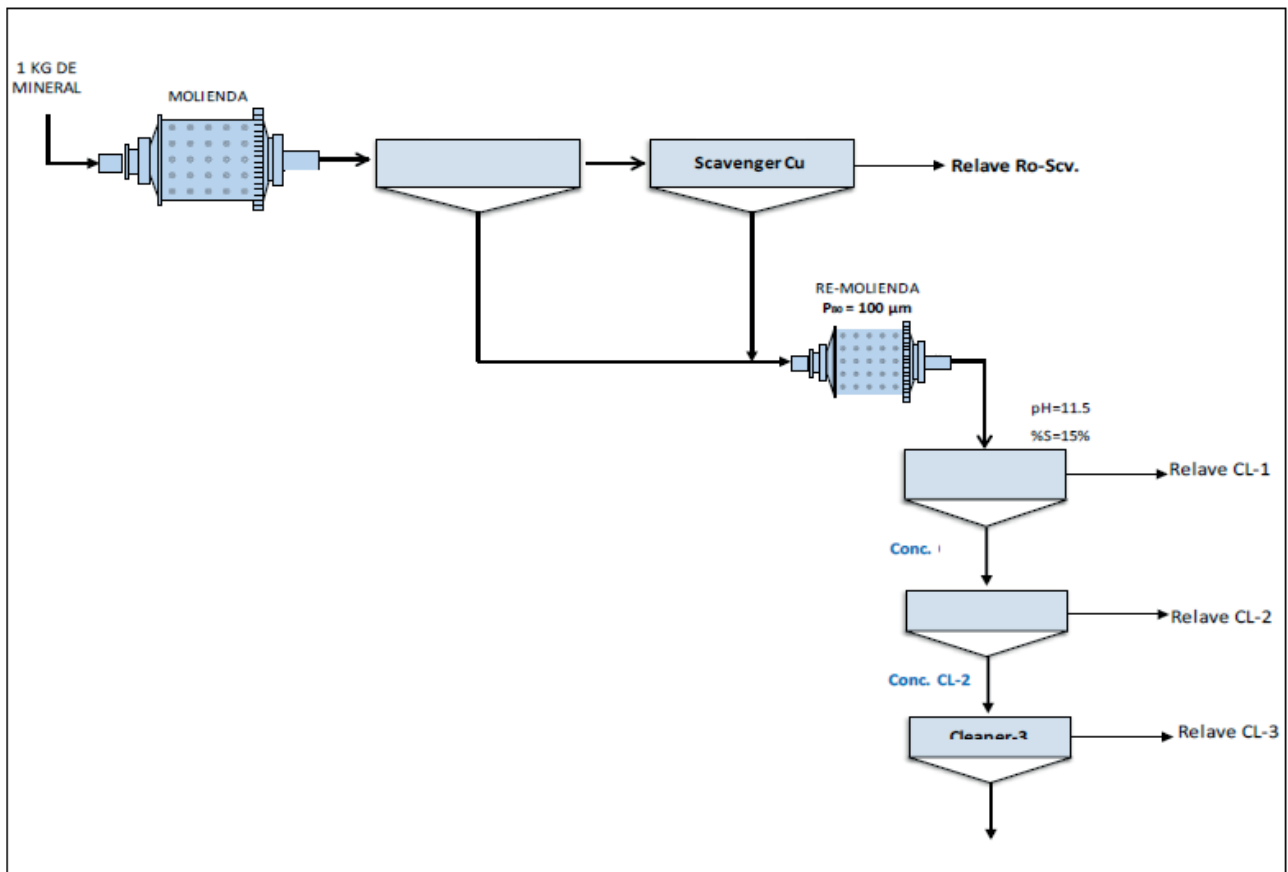


Figura 2. Esquema de proceso para Pruebas de Flotación Cleaner (TCA)

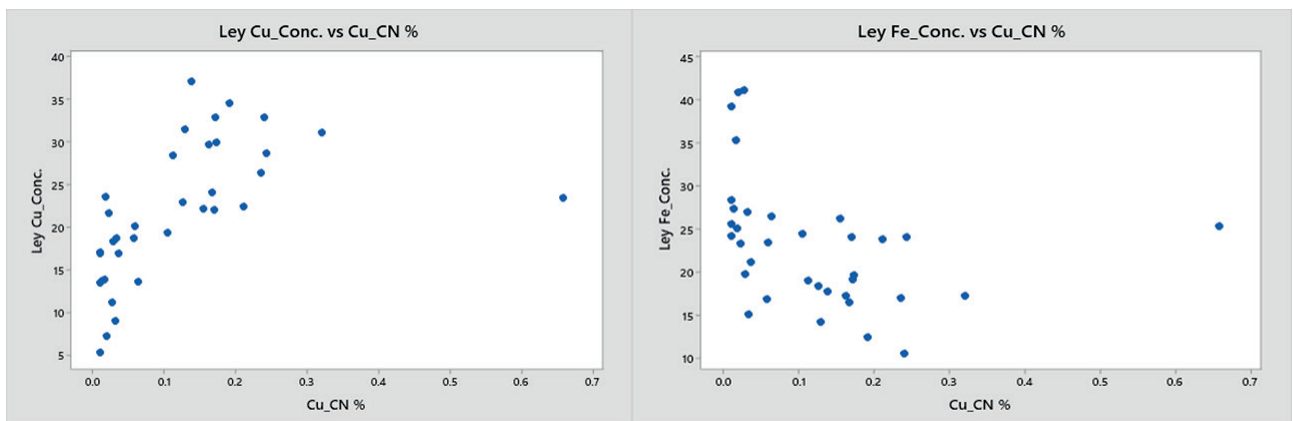


Figura 3. Izq: Ley cobre Concentrado VS Cu CN %, Der: Ley hierro Concentrado VS Cu CN %.

paletteo/min. Esta operación es constante para toda muestra con lo que se busca extraer toda especie mineralizada tratando de no ser muy selectiva; sin embargo, en las etapas de limpieza se pone énfasis en ser selectivos. A continuación, se describe algunos factores que pueden influir en el *mass pull*.

- Si el contenido de hierro en la cabeza es alto, con respecto al cobre, existe la posibilidad de que la pirita flote de forma natural o por asociación a minerales de cobre; esto se denota en las muestras que tienen leyes inferiores a 30 % donde la ley de hierro supera más del 20%.
- La presencia de carbonatos influye en la estabilidad de las espumas y genera un mayor consumo de espumante. Durante las flotaciones se observó que cuando hay presencia de carbonatos las espumas se agotan en los 5 min iniciales; luego, en estos casos, se observó al estereoscopio que parte del cobre (primario y/o secundario) quedaba en el relave, con la consecuente recuperación baja. Es por tal motivo que la dosis de espumante se trabajó alrededor de 20 a 25 g/t para mantener la estabilidad de las espumas y permitir la flotabilidad de las especies de Cu.
- Cabe mencionar que los minerales de cobre secundarios presentan una cinética de flotación más lenta por lo que se requiere tener un colchón de espumas estable para su extracción.
- La dosis de colector Z-11, se acondicionó de acuerdo con los contenidos de Cu en la cabeza (ver Tabla 3); ello contribuye en la recuperación de Cu, pero también contribuye a la flotabilidad

natural de las arcillas y de la pirita; esto se torna más difícil aun cuando existe la presencia de montmorillonita que tienen la propiedad de expandirse generando, afectando negativamente a la flotación.

Tabla 3. Rango de cobre –colector Z-11

Rango Cu	g/t
0.6 - 0.7	25
0.7 - 0.8	29
0.8 - 0.9	33
0.9 - 1.0	38
1.0 - 1.1	42
1.1 - 1.2	46
1.2 - 1.3	50
1.3 - 1.4	54
1.4 - 1.5	58

- Así, cada muestra manifiesta su respuesta metalúrgica a su propia condición geológica– mineralógica.

En el caso de la recuperación del oro y la plata esta tiene una correlación directa con la recuperación del cobre. La recuperación promedio de cobre fue 83.95, de la plata fue 73.57 g/t (ver Figura 4) y el oro fue de 62.99 g/t (ver Figura 5).

Valor coeficiente	Fuerza de asociación
0,1 < r < 0,3	pequeña correlación
0,3 < r < 0,5	correlación media / moderada
r > 0,5	correlación grande / fuerte

Pairwise Pearson Correlations Rec Cu vs Rec Ag

Sample 1	Sample 2	Correlation	95% CI for p	P-Value
Rec Ag, %	Rec Cu, %	0.700	(0.478, 0.838)	0.000

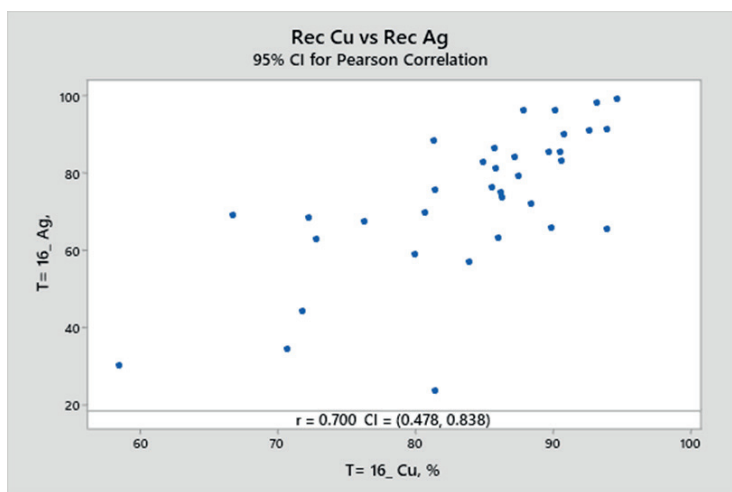


Figura 4. Correlación de Rec. Cu vs Rec Ag

Pairwise Pearson Correlations

Sample 1	Sample 2	Correlation	95% CI for ρ	P-Value
Rec Au	Rec Cu, %	0.543	(0.256, 0.742)	0.001

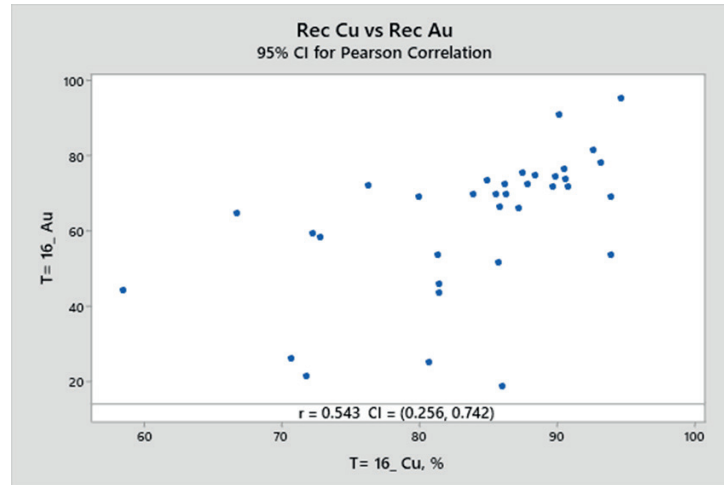


Figura 5. Correlación Rec. Cu vs Rec. Au

En el caso de las recuperaciones de cobre se establecieron cuatro grupos: <80; 81 a 85; 86 a 90; >90.

Análisis de Recuperaciones <80%

Se observa que las recuperaciones menores a 80%, la presencia de óxidos de cobre, arcillas como montmorillonita, y carbonatos (calcita principalmente y dolomita) y cloritas que afecta la recuperación de minerales de cobre. Las recuperaciones promedio fueron de 71.06% a 75.30%, teniendo una variación de 4.24%. (Ver Tabla 4)

En la Figura 6, el análisis modal de la muestra 200845005 podemos observar a modo de ejemplo que la baja recuperación está relacionada a la baja ley de cobre, a la clorita y al mineral encapsulado (ver Figura 7).

Análisis de Recuperaciones 80% a 85%

Las recuperaciones promedio fueron de 83.66% a 83.44%, teniendo una variación de 2.79% (ver Tabla 5). Para el caso de las recuperaciones bajas estas están relacionadas con dolomita (figura 8), arcillas están en 9% y las cloritas en 4%.

Análisis de Recuperaciones 86% a 90%

Las recuperaciones promedio fueron de 88.73% a 91.89%, teniendo una variación de 3.16% (ver Tabla 6). Se mejora la recuperación mediante la adición de colector secundario y glicol.

Como podemos ver en la Tabla 7 de la muestra 200845003, aún existe mineral en el relave que podía ser recuperado, pero este se encuentra en la fracción fina.

Análisis de Recuperaciones >91%

Las recuperaciones promedio fueron de 93.65% a 96.28%, teniendo una variación de 3.16% (ver Tabla 8).

Las pruebas de optimización (Figura 9) a partir de los resultados de caracterización mineralógica, resultaron positivas en promedio se optimizó un 3.22%, es decir de 83.95% Rec Cu a 87.17%.

IV. DISCUSIÓN

Se ha realizado la investigación en donde se relacionó la caracterización mineral semicuantitativa con modelos predictivos. Las relaciones mineralógicas pueden influir en el proceso de flotación (Tungpalan et al., 2015), así como diferentes clasificaciones texturales están asociadas a los grados de liberación de un mineral, caracterizado con las curvas de distribución (Lund et al., 2015), (Evans et al., 2015), que finalmente afecta al proceso de conminución de minerales y flotación del fino (Negreiros García & Obando Florian, 2019). Para el proceso de conminución, diferentes índices pueden ser modelados para describir la dureza y fragmentación de la roca (Alruiz et al., 2009) por ejemplo, el Índice de Bond para molinos de bolas (Tavares et al., 2012), (Tavares & Kallembach, 2013), proceso previo a la flotación de minerales sulfurados. Conocer la geometurgia asociada a diferentes minerales permite relacionar los procesos de flotación de manera más efectiva (Solomon et al., 2011).

Durante los procesos que se realizan a cabo en cada etapa demanda una caracterización mineralógica diferente y específica (BHP Billiton, 2020). Los minerales que componen la ganga y características de liberación de la

Tabla 4. Recuperación menor a 80%

Identificación de Muestra		Cu %	Rec. Estándar Cu, (%)	Rec. máximo Cu (%)	VAR %
200845005	Diorita	0.13	58.35	59.00	0.65
200847002	Pórfido	0.14	72.77	74.22	1.45
200836002	Pórfido	0.22	79.94	83.01	3.07
200838002	Skarn/Endoskarn	0.16	66.62	71.94	5.32
200843005	Diorita	0.24	76.20	78.24	2.04
200836001	Skarn/Endoskarn	0.17	71.76	78.13	6.38
200837002	Skarn	0.21	70.66	80.01	9.36
200835003	Skarn/Endoskarn	0.82	72.15	77.84	5.68

Modal Full	Composición Química	ATA-077_C26_3930
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	0.11
Chalcocite	Cu_2S	0.02
Bornite	Cu_5FeS_4	0.00
Enargite	Cu_3AsS_4	0.00
Tennantite	$Cu_{12}As_4S_{13}$	0.00
Tetrahedrite	$(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$	0.00
Other Cu Minerals	-	0.01
Pyrite	FeS_2	0.60
Fe Oxides	-	1.49
Molybdenite	MoS_2	0.00
Sphalerite	ZnS	0.00
Galena	PbS	0.00
Other Sulphides	-	0.00
Quartz	SiO_2	0.07
Plagioclase	$Na(AlSi_3O_8)$ a $Ca(Al_2Si_2O_8)$	43.63
Albite	$Na(AlSi_3O_8)$	21.13
Other Silicates	-	2.77
Amphibole	composición variada	11.39
Apatite	$Ca_5(PO_4)_3(Cl/F/OH)$	0.14
K-Feldspar	$(K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8$	7.19
Ankerite	$Ca(Fe^{2+},Mg)(CO_3)_2$	0.56
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	0.00
Siderite	$FeCO_3$	0.20
Calcite	$CaCO_3$	4.31
Muscovite	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	0.15
Chlorite	$Mg_5Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8$	4.35
Biotite	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	1.87
Gypsum/Anhydrite	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	0.00
Others	-	0.02
Total		100.00

Figura 6. Análisis Modal, muestra 200845005



Figura 7. Imagen Qemscan para la muestra 200845005. Mineral de cobre (amarillo) encapsulado en Plagioclasa (lila) y clorita (verde)

Tabla 5. Recuperación menor a 80% a 85%

Identificación de Muestra		Cu %	Rec. Estándar Cu, (%)	Rec. máximo Cu (%)	VAR %
200839003	Diorita	0.42	85.75	88.40	2.65
200840006	Diorita	0.51	81.27	84.70	3.44
200844006	Diorita	0.75	84.88	87.63	2.75
200845007	Diorita	0.54	85.84	88.59	2.75
200835001	Diorita	0.17	81.40	82.68	1.28
200836005	Diorita	0.16	83.85	86.60	2.75
200836006	Diorita	0.33	81.40	84.50	3.10
200838003	Pórfido	0.16	85.56	90.83	5.27
200838004	Diorita	0.15	80.68	83.34	2.65
200850002	Skarn	0.45	85.96	87.16	1.21

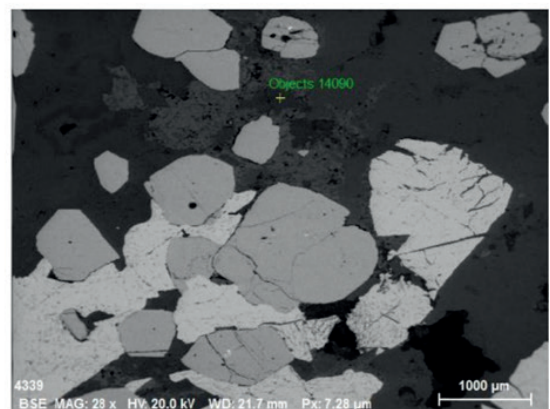
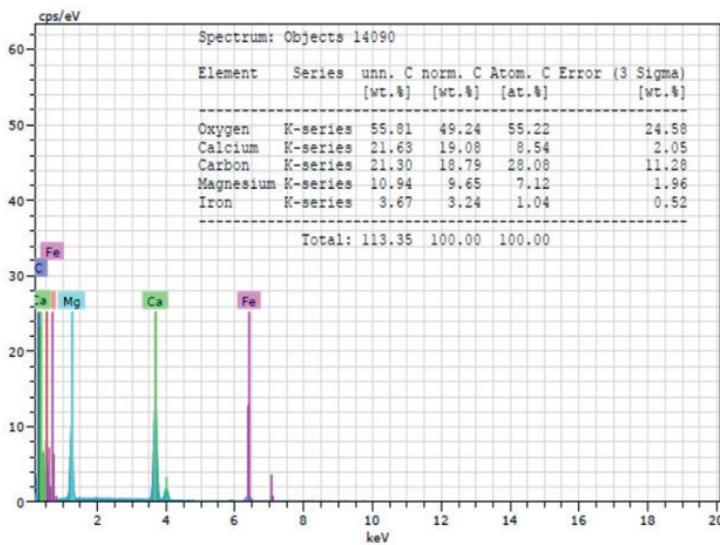


Figura 8. Imagen de microscopio electrónico para la determinación de los carbonatos (dolomita).

Tabla 6. Recuperación menor a 86% a 90%

Identificación de Muestra		Cu %	Rec. Estándar Cu, (%)	Rec. máximo Cu (%)	VAR %
200837001	Diorita	0.66	86.25	89.59	3.34
200837004	Diorita	0.67	86.15	89.42	3.27
200841003	Diorita	0.39	90.82	93.08	2.26
200841005	Diorita	1.04	87.46	90.39	2.93
200843002	Diorita	0.63	87.23	91.80	4.57
200843007	Pórfido	0.57	90.61	94.59	3.99
200845003	Stockwork	1.37	90.48	96.12	5.64
200847004	Stockwork	0.12	88.38	91.50	3.12
200849002	Pórfido	0.20	89.83	93.49	3.66
200842004	Pórfido	0.29	89.66	91.37	1.71
200846007	Pórfido	0.19	87.81	89.35	1.54
200848006	Pórfido	0.28	90.11	91.99	1.88

Tabla 7. Grado de liberación en la muestra de relave 20845003

	Normalized Cu sulphides Liberation	Size [µm]							Global
		>=240	>= 212 < 240 µm	>= 150 < 212 µm	>= 106 < 150 µm	>= 75 < 106 µm	>= 53 < 75 µm	>= 35 < 53 µm	
Free	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.57	90.07	79.83	10.62
Liberated	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.25	0.00	0.00	0.69
Midds	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.61	2.97	0.36
Sub-Midds	0.00	0.00	21.23	0.00	0.00	0.00	0.00	14.32	3.14
Locked	100.00	100.00	78.77	100.00	100.0	6.18	1.32	2.88	85.19
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla 8. Recuperación mayor >91%

Identificación de Muestra		Cu %	R. Estándar Cu, (%)	Rec. máximo Cu (%)	VAR %
200848003	Pórfido	0.66	92.59	93.32	0.72
200837007	Pórfido	0.23	93.19	95.96	2.77
200847007	Pórfido	0.31	94.68	97.38	2.70
200840003	Pórfido	0.28	93.89	98.66	4.77
200850001	Stockwork	0.28	93.90	96.09	2.18

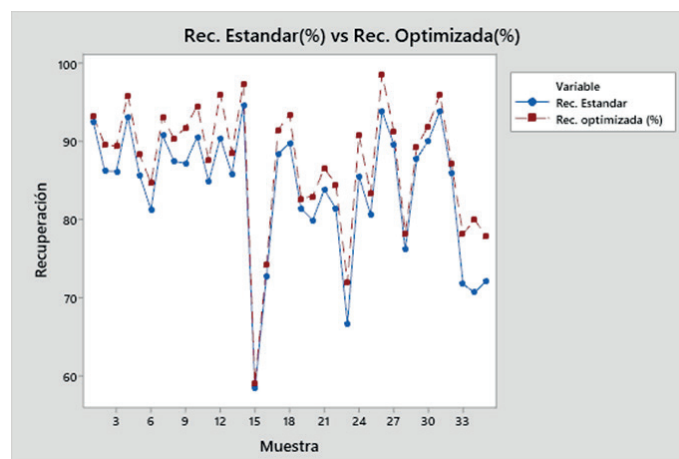


Figura 9. Rec. Estándar vs Rec. Optimizada

mena en una etapa de diseño hasta la revisión de ley y recuperación mineral en los concentrados, en la etapa de producción se debe saber la calidad de los concentrados, las pérdidas de mineral, entre otras cosas.

Respecto a los tectosilicatos, el de mayor disolución es la albita, liberando Na y Si, con efecto menor de clorita y biotita para generar hidróxidos. La alunita tiene efecto en el pH que puede ser relevante (deprime el pH), mientras que la calcita se satura naturalmente debido a la alta presencia de cal en el sistema. Pasando a los sulfuros, los que tienen mayores contenidos de hierro son los que poseen un mayor efecto en el Eh (desde un punto de vista interacción agua-roca).

La eficiencia de la flotación depende de varios parámetros, de los cuales los parámetros fisicoquímicos y mineralógicos pueden ser revisados (Alvarez-Silva et al., 2016). Respecto a ello, se deduce que la alimentación de las muestras presenta magnesio y aluminio como hidróxido y calcio como carbonato, pero la presencia de estas no tiene incidencia significativa en la recuperación y por ende esta estará sujeta a las variables fisicoquímicas. La flotabilidad de las partículas puede variar, aunque tengan la misma cantidad de mineral de interés, pero diferente distribución.

V. CONCLUSIONES

La conclusión principal es que la caracterización mineralógica abarca actividades que utilizan una mejor comprensión de las propiedades del mineral y los residuos, que impactan positiva o negativamente en el valor del producto. El contenido de arcillas fue un factor a considerar, se ha observado contenido de arcillas en un gran número de muestras, afectando la flotabilidad de los minerales de cobre, el cual, requiere mayor tiempo de flotación para mejorar la recuperación, asimismo el desplazamiento de las arcillas presenta problemas importantes de dilución del concentrado. se ha observado en muestras de relaves de flotación, partículas de cobre asociadas a la ganga (plagioclasas). La falta de liberación de estas partículas de cobre, evitan que se logre una mayor recuperación.

VI. REFERENCIAS

- Alruiz, O. M., Morrell, S., Suazo, C. J., & Naranjo, A. (2009). A novel approach to the geometallurgical modelling of the Collahuasi grinding circuit. *Minerals Engineering*, 22(12), 1060–1067. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2009.03.017>
- Alvarez-Silva, M., Vinnett, L., Langlois, R., & Waters, K. E. (2016). A comparison of the predictability of batch flotation kinetic models. *Minerals Engineering*, 99, 142–150. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2016.08.019>
- BHP Billiton. (2020). *Caracterización de la calidad del mineral alimentado a Flotación Rougher*. <https://expandemineria.cl/desafios/caracterizacion-de-la-calidad-del-mineral-alimentado-a-flotacion-rougher/>
- Castro Andrade, J. A., & Calderón Celis, J. M. (2021). Modelamiento geometalúrgico del consumo de medios de molienda basado en técnicas de caracterización avanzada. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias Geográficas*, 24(48), 55–68.
- Díaz Villena, E. E. (2017). *Modelamiento geometalúrgico del consumo de medios de molienda basado en técnicas de caracterización avanzada*. Universidad de Chile.
- Donoso Droguett, G. A. (2020). *Modelamiento geometalúrgico de recuperación de cobre incorporando datos espectrales*. Universidad de Chile.
- Espinoza S., L. A., Iriarte D., G., Espinoza S., L. O., Gutarra B., R., Herrera M., M., Zamalloa B., J., Aramburú R., V. S., & Torres G., J. A. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 85–100. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21707>
- Evans, C. L., Wightman, E. M., & Yuan, X. (2015). Quantifying mineral grain size distributions for process modelling using X-ray micro-tomography. *Minerals Engineering*, 82, 78–83. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2015.03.026>
- Lund, C., Lamberg, P., & Lindberg, T. (2015). Development of a geometallurgical framework to quantify mineral textures for process prediction. *Minerals Engineering*, 82, 61–77. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2015.04.004>
- Manzaneda Cabala, J. R. (2010). *Aplicación de microscopía en el procesamiento de minerales por flotación*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Mudd, G. M. (2010). The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. *Resources Policy*, 35(2), 98–115. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2009.12.001>
- Negreiros García, C. A., & Obando Florian, F. M. (2019). *Evaluación mineralógica y grado de liberación de los minerales en los concentrados de flotación de cu, pb y zn de la Compañía Minera Volcan*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Pérez Barnuevo, L. (2014). *Caracterización automatizada de las texturas de menas mediante análisis digital de imagen para su aplicación geometalúrgica* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/23458/1/LAURA_PEREZ_BARNUEVO_a.pdf
- Romero Toledo, H., Videla, A., & Gutiérrez, F. (2017). Explorando conflictos entre comunidades indígenas y la industria minera en Chile: las transformaciones socioambientales de la región de Tarapacá y el caso de Lagunillas. *Estudios Atacameños*, 55, 231–250. <https://doi.org/10.4067/S0718-10432017005000019>
- Sarquis, P. E. (2012). *Flotación selectiva de minerales complejos usando reactivos de baja toxicidad*. Universidad de Oviedo.
- Solomon, N., Becker, M., Mainza, A., Petersen, J., & Franzidis, J. P. (2011). Understanding the influence of HPGR on PGM flotation behavior using mineralogy. *Minerals Engineering*, 24(12), 1370–1377. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2011.07.015>
- Tavares, L. M., De Carvalho, R. M., & Guerrero, J. C. (2012). Simulating the Bond rod mill grindability test. *Minerals Engineering*, 26(1), 99–101. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2011.10.015>

- Tavares, L. M., & Kallembach, R. D. C. (2013). Grindability of binary ore blends in ball mills. *Minerals Engineering*, 41, 115–120. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2012.11.001>
- Torres Guerra, A. J., Mejía Cáceres, D., Ramos, P. M., Grados, J. O., & Oscco Barrientos, S. (2021). Geometalurgia y el futuro de la minería digital en el Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(47), 163–179. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20661>
- Tungpalan, K., Manlapig, E., Andrusiewicz, M., Keeney, L., Wightman, E., & Edraki, M. (2015). An integrated approach of predicting metallurgical performance relating to variability in deposit characteristics. *Minerals Engineering*, 71, 49–54. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2014.10.004>
- Zumaran Ferrofin, D. M. (2017). *Evaluación de la influencia de las variables en la distribución granulométrica del producto de molienda por bolas de minerales mediante diseños experimentales*. Universidad Nacional San Agustín.

Contribución de autoría

- Conceptualización: (Guillermo Iriarte Dávila)
- Curación de datos: (Guillermo Iriarte Dávila, Madeleine Guillen Gómez)
- Análisis formal: (Guillermo Iriarte Dávila, Edmundo Alfaro Delgado)
- Investigación: (Guillermo Iriarte Dávila, Madeleine Guillen Gómez)
- Metodología: (Guillermo Iriarte Dávila, Madeleine Guillen Gómez, Edmundo Alfaro Delgado)
- Recursos: (Guillermo Iriarte Dávila)
- Supervisión: (Guillermo Iriarte Dávila, Edmundo Alfaro Delgado)
- Validación: (Guillermo Iriarte Dávila, Edmundo Alfaro Delgado)
- Visualización: (Guillermo Iriarte Dávila, Edmundo Alfaro Delgado, Madeleine Guillen Gómez)
- Redacción - borrador original: (Guillermo Iriarte Dávila, Madeleine Guillen Gómez)
- Redacción - revisión y edición: (Guillermo Iriarte Dávila, Madeleine Guillen Gómez)