



Geometalurgia de cobres secundarios e impacto en los recursos y la producción de la unidad minera cerro lindo

Nickol Ivan Estrada Ramos¹

nickolestrada24@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2288-8541>

Universidad Nacional Mayor de San Marco
Lima - Perú

Edwars Humberto Espinoza Jara

edwarsgeo@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9159-7217>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima - Perú

RESUMEN

El cobre soluble se originó debido a las filtraciones y / o precipitaciones que ocurrieron en la zona superior de los Cuerpos Mineralizados cercanos a la Quebraba Topará, generando una zona secundaria de cobre luego de pasar por la zona lixiviada. La cual se quiere identificar, zonificar y caracterizar en los cuerpos mineralizados del yacimiento mediante los sondajes diamantinos, para realizar estudios geometalúrgicos que nos ayuden a buscar la viabilidad para su explotación. Debido a que este mineral no está siendo considerado en las reservas por causar problemas en la recuperación de zinc cuando se trata junto con el mineral estándar de la operación.

Llegando a la conclusión que se deben realizar pruebas metalúrgicas para tratar este mineral por campañas y no perjudicar a la recuperación de zinc.

Palabras clave: cobre soluble; geometalurgia; cobre secuencial

¹ Autor principal

Geometallurgy of secondary copper and impact on the resources and production of the cerro lindo mining unit

ABSTRACT

Soluble copper originated due to seepage and / or precipitation that occurred in the upper zone of the Mineralized Bodies near Quebraba Topará, generating a secondary zone of copper after passing through the leached zone. Which is to be identified, zoned and characterized in the mineralized bodies of the deposit by means of diamond drilling, to carry out geometallurgical studies that help us find the viability for their exploitation. Because this mineral is not being considered in the reserves because it causes problems in the recovery of zinc when it is treated together with the standard mineral of the operation. Reaching the conclusion that metallurgical tests must be carried out to treat this mineral for campaigns and not to harm the zinc recovery.

Keywords: *soluble copper; geometallurgy; sequential copper*

Artículo recibido 20 marzo 2023

Aceptado para publicación: 05 abril 2023

INTRODUCCIÓN

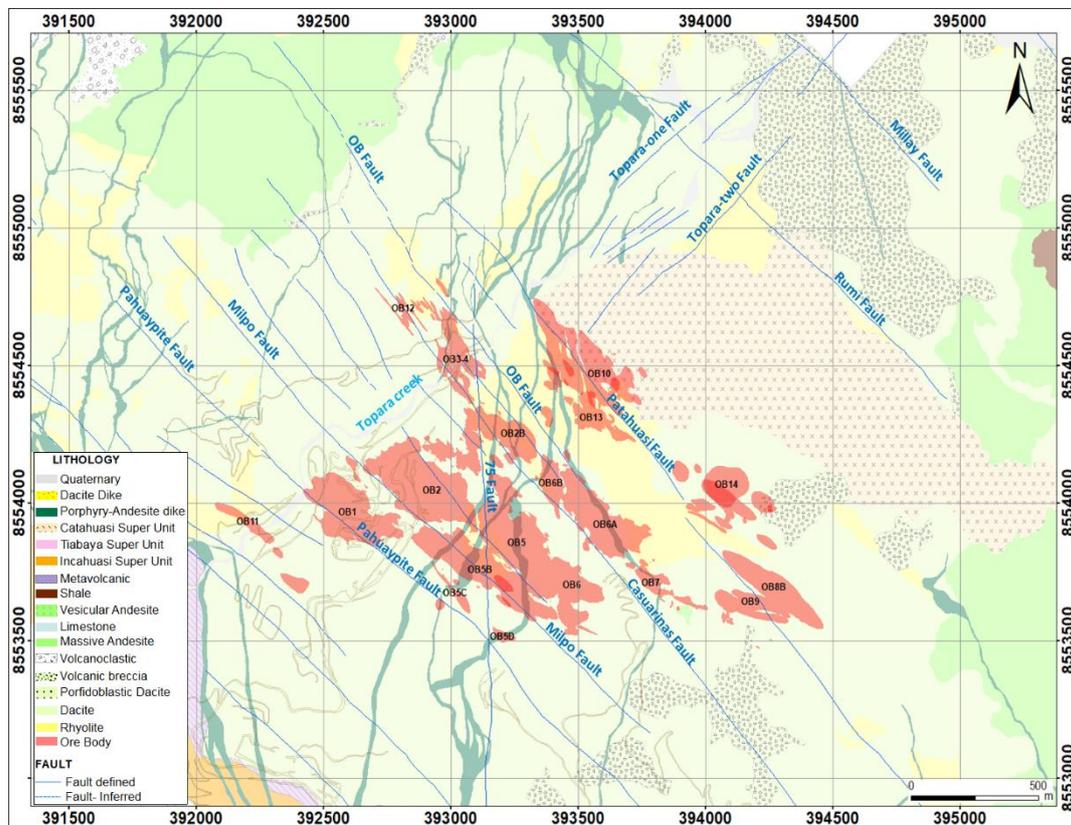
El área de estudio se ubica en la parte occidental del Perú, en la provincia de Chíncha, departamento de Ica, a 175 km SE de Lima. El depósito de Cerro Lindo se caracteriza por una mineralización polimetálica Zn-Pb-Cu-Ag-Ba tipo sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) de clase mundial con una producción promedio de mineral de 21,500Tn/día. El presente trabajo se realizó con el fin de mostrar la posibilidad de aprovechar los recursos que no estaban siendo considerados en las reservas por causar problemas metalúrgicos en la recuperación al momento de tratar el cobre soluble con el mineral estándar causando bajas recuperaciones de Zn. Por ello que se realizaron estudios geometalúrgicos detallados para dar una solución y procesar el cobre soluble en la Unidad Minera Cerro Lindo.

El método que se realizó para poder determinar el contenido de cobre soluble es el análisis químico por cobre secuencial. El método de análisis por cobre secuencial es una técnica particularmente útil para definir semicuantitativamente los tipos y zonas geológicas, mineralógicas comúnmente asociados con depósitos con contenido de cobre. El método químico se basa en el comportamiento de disolución parcial que muestran los minerales de cobre cuando tienen presencia de minerales como calcocita, crisocola, malaquita y calcopitira en contacto sucesivo con soluciones que contienen ácido sulfúrico y cianuro de sodio. Con ello se pueden determinar las cantidades de minerales de óxido lixiviables y minerales de cobre secundarios. Se presentan resultados analíticos de análisis secuencial e interpretación para depósitos con contenido de cobre. (Parkison, 1995)

Teniendo como objetivo de identificar, zonificar y caracterizar el cobre soluble en los cuerpos mineralizados en el depósito de Cerro Lindo tipo sulfuro masivo vulcanogénico (VMS), como se muestra en la figura N°1. Buscar mejoras en el proceso de recuperación de Cobre Soluble y así considerarlo en las reservas en Cerro Lindo.

Figura N° 1:

Ubicación de los cuerpos del Yacimiento Tipo VMS de la Unidad Minera Cerro Lindo



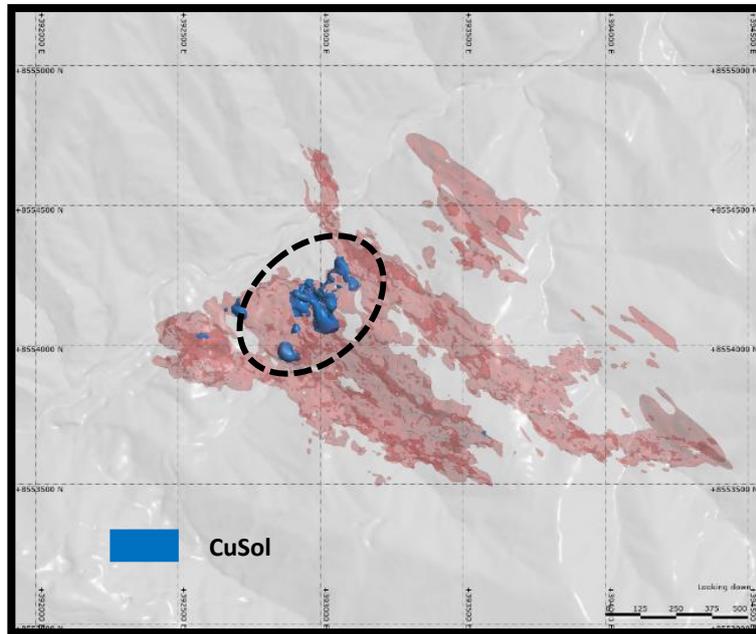
Para lo cual se va determinar los cuerpos mineralizados con mayor presencia de cobre soluble e identificar la relación con los dominios geológicos existentes en el yacimiento y así poder realizar una estimación con el uso del software Datamine para delimitar zonas en el yacimiento. Por último realizar el estudio geometalúrgico del cobre soluble para sugerir el método adecuado para mejorar el proceso de recuperación de cobre soluble sin afectar la recuperación de Zn.

METODOLOGÍA

Se realizó un muestreo selectivo de sondajes y muestra de comunes situados en la zona alta del OB2 (cuerpo mineralizado con leyes altas de cobre) del Nivel 1850 hasta el Nivel 1970 como muestra la Figura N°2, donde se reportaron tajos con contenido de cobre soluble que en el proceso metalúrgico afectaba a la recuperación de Zn.

Figura N° 2:

Cobre soluble identificado en la zona alta del OB2.



Macroscópicamente se notó con características totalmente diferentes a la muestras de mineral que trata la mina, es decir con presencia de mineral oxidado, carbonatos de cobre y cobres secundarios.

Estas muestras que se encuentran en la Tabla N°1 se analizaron en el Laboratorio de Certimin S.A. por el método químico de análisis de cobre secuencial (utilizando ácido sulfúrico, cianuro de sodio y agua regia), para determinar la cantidad de minerales de óxidos lixiviables, minerales de cobres primarios y cobres secundarios. Dando como resultado el cobre total en las muestras y poder realizar el análisis e interpretación respectiva, clasificándolos por el grado de alteración.

Un grupo de estas muestras formaron un compósito para poder realizar estudios geometalúrgicos como mineralogía, microscopía, conminución (dureza del mineral), flotación, análisis mineralógico en los concentrados y en el relave.

En total se tomaron 300 muestras entre sondajes y muestra de comunes que fueron analizadas y ploteadas en el OB2.

Tabla N° 1: Datos de Laboratorio de algunas muestras representativas por el método de análisis de cobre secuencial.

SAMPLE	Weight	CuSolH+	CuCN-	CuRes
DESCRIPTION	kg	%	%	%
268526	7.49	0.397	0.42	0.761
268527	7.82	0.306	0.394	0.429
268528	4.59	0.428	0.542	0.5
268529	5.13	0.622	0.668	0.088
268530	5.1	0.076	0.234	0.032
268531	6.39	0.205	0.431	0.056
268532	5.09	0.18	0.308	0.021
268533	5.92	0.176	0.643	0.439
268534	2.64	0.35	1.253	1.121
268535	4.01	0.839	1.176	1.273
268536	5.56	0.114	2.147	0.263
268537	5.32	0.236	1.35	0.344
268538	4.79	0.341	0.474	0.37
268539	4.59	0.14	0.213	0.021
268540	3.11	0.037	0.168	0.057
268541	2.29	0.034	0.161	0.055
268542	4.41	0.185	0.266	0.219
268543	4.77	0.258	0.343	0.109
268544	6.38	0.222	0.306	0.074
268545	5.37	0.203	0.206	0.017
268546	1.96	0.183	0.209	0.015
268547	0.37	0.434	0.707	0.06
268548	2.49	0.254	0.492	0.116
268549	2.79	0.246	0.625	0.018
268550	4.69	0.823	0.937	0.022
268551	5.19	0.626	0.721	0.164
268552	4.9	0.411	0.472	0.098
268553	4.21	0.179	0.262	0.079
268554	2.56	0.282	0.438	0.203
268555	3.87	0.253	0.347	0.167
268556	5.56	0.435	0.521	0.361
268557	2.69	0.374	0.56	0.636
268558	3.67	0.252	0.259	0.018
268559	3.74	0.234	0.263	0.035
268560	1.12	0.006	0.021	0.024
268561	0.87	0.002	0.034	0.027
268562	2.36	0.005	0.034	0.041
268563	3.56	0.002	0.008	0.005
268564	4.43	0.002	0.03	0.019
268565	3.47	0.002	0.017	0.023
268566	2.17	0.002	0.03	0.033

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geometalurgia del Cobre Soluble

1. Análisis de cobre secuencial

En el procesamiento de minerales como en este caso el cobre soluble con buena ley de Cu, es importante comprender su naturaleza a partir desde un punto de vista geometalúrgico.

El análisis de cobre secuencial es el punto de partida para poder zonificar el cobre soluble en el yacimiento; para esta oportunidad nos hemos enfocado en el OB2 (cuerpo mineralizado con leyes altas de cobre) ya que reportó tajos con contenido de cobre soluble. Luego se replicará lo mismo para los diferentes cuerpos mineralizados (Ore bodies - OBs) en el yacimiento de la Unidad Minera Cerro lindo, con la finalidad de delimitar y cuantificar el cobre soluble.

El análisis de cobre secuencial se basa en el comportamiento de disolución parcial que muestran los minerales de cobre en soluciones que contienen ácido sulfúrico y cianuro de sodio, véase en la Tabla N°2. Los resultados de los análisis nos determinan las cantidades de minerales de óxidos, lixiviables en ácido, minerales de sulfuro secundario y minerales de cobre primario que hay en las muestras. (R.B. Bhappu,1995).

Tabla N° 2: Análisis de cobre secuencial.

Pasos del análisis secuencial	Clasificación Mineralógica	Clasificación Metalúrgica	Clasificación Geológica	
Cobre Soluble en ácido sulfúrico	Oxido de cobre	Lixiviable en Acido Sulfúrico	Zona de Oxido: CuSAc/CuT>50%	Zona Mixta CuSCN o CuR/CuT son todos <50%
Cobre Soluble en Cianuro de Sodio	Componentes de Sulfuros Secundarios	Lixiviable en Medio Férrico	Zona Secundaria: CuSCN/CuT>50%	
Cobre Residual Total	Sulfuro Primario	Lixiviable en Medio Bacterial	Zona Primaria CuR/CuT>50%	
Fuente: THE SEQUENTIAL COPPER ANALYSIS METHOD-GEOLOGICAL, MINERALOGICAL, AND METALLURGICAL IMPLICATIONS (G.A. Parkinson, Cambior USA, Inc. Englewood, CO, R.B. Bhappu, Mountain States R & D International Inc., Vail, AZ , FOR PRESENTATION AT THE sme Annual Meeting Denver, Colorado- March 6-9, 1995)				

Se sacaron muestras de las ventanas (V01 y V02) del T-1025A_OB2_1850, como se muestra en la Figura N°3, por presentar cobre soluble y se mandaron al laboratorio para realizar el análisis de cobre secuencial obteniendo la distribución del cobre en las muestras, resultando el mayor porcentaje de cobre soluble y cobre cianurado. Se sacó muestra de mineral ROM (mineral estándar) y se realizó el

respectivo análisis de cobre secuencial para realizar un comparativo. La Figura N°4 nos muestra que su contenido de cobre soluble es muy bajo.

Figura N°3: Ubicación de T-1025A_OB2B_1850 y sus ventanas de extracción.

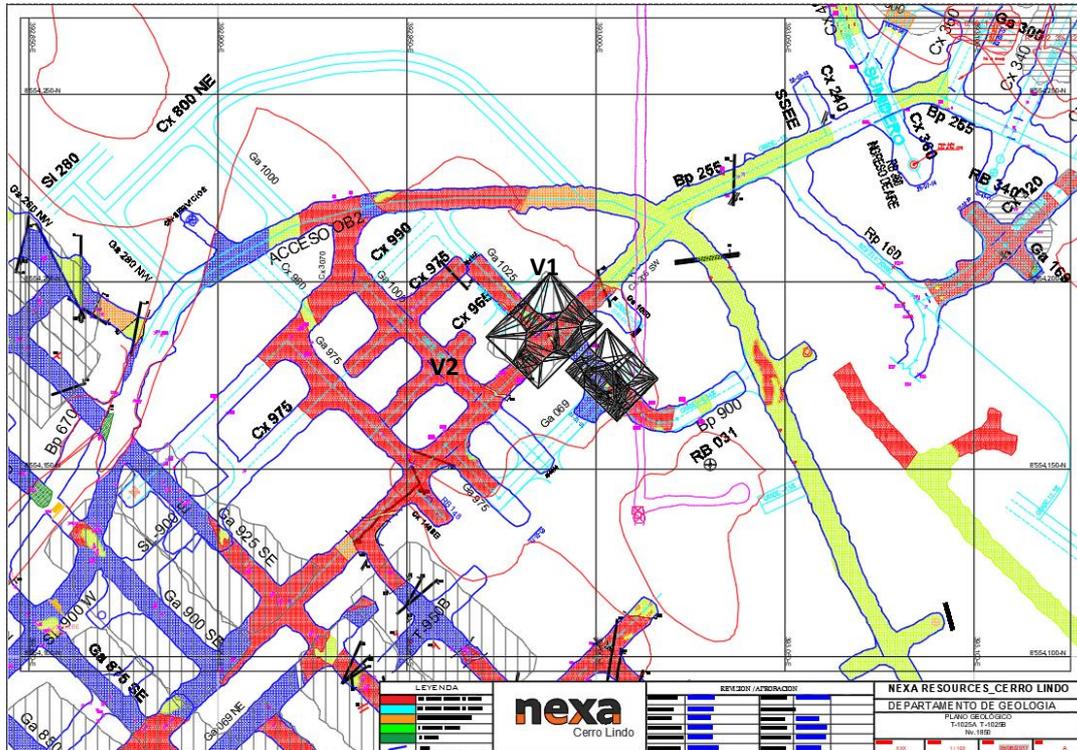
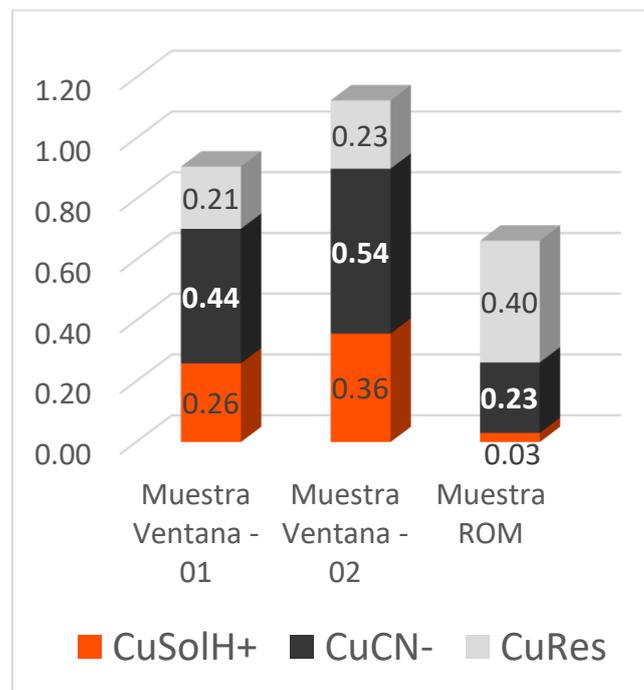
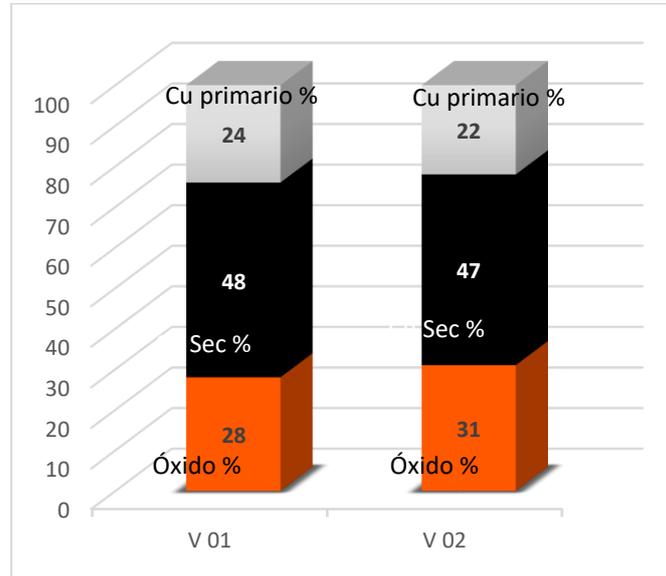


Figura N°4: Distribución de Cobre Soluble.



Se obtuvo resultados de la distribución de Cobre en las muestras sacadas de las ventanas del T-1025A y poder cuantificar el contenido de cobre secundario en las muestras. (Figura N°5)

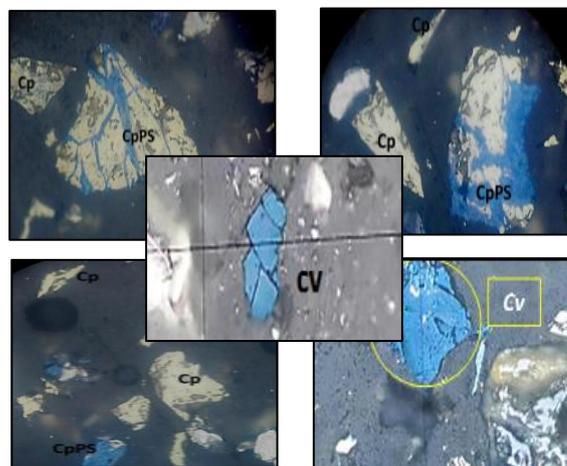
Figura N°5: *Distribución de Cobre en las muestras.*



2. *Microscopía de opacos*

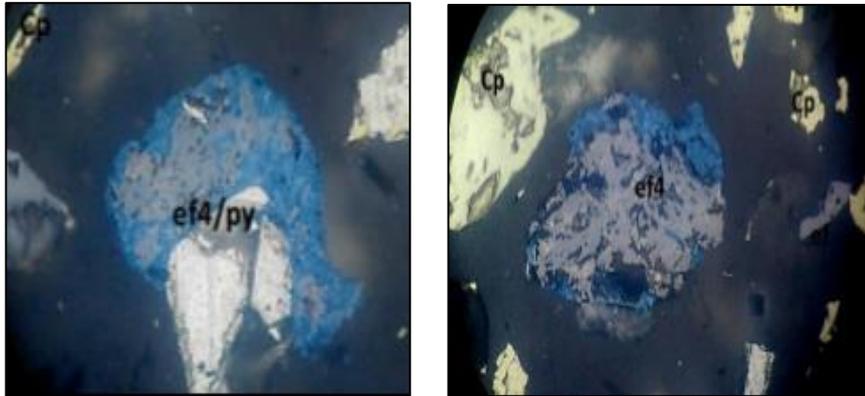
El análisis de %Cu por microscopía tiene varios significados, en este caso se observa presencia de covelita en sus diferentes texturas tanto en la cabeza general, relave y concentrado de cobre. La presencia de covelita (cv) indicará que la presencia de cobres secundarios que provienen de zonas alteradas a partir de los cobres primario (cp), eminente presencia de calcantita y considerable presencia de esfalerita tipo 4. (Véase en la Figura N°6).

Figura N°6: *Calcopirita en transición a covelita*



La esfalerita tipo 4 es una textura muy poco común en la minería peruana; se trata de una invasión de covelita en la esfalerita. Este mineral genera presencia de Zinc en el concentrado de Cobre. Véase en la Figura N°7.

Figura N°7: *Esfalerita tipo 4 (textura).*



3. Conminución

Indica la reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración, chancado, molienda y otros. (Camiper, 2019).

Se realizó el compósito LDFC-01 con las muestras representativas de la zona de cobre soluble ubicada en el OB2 para realizar las pruebas de conminución, flotación y mineralogía. (Tabla N°3)

Tabla N° 3: *Algunos sondajes representativos que forman parte del compósito LDFC-01.*

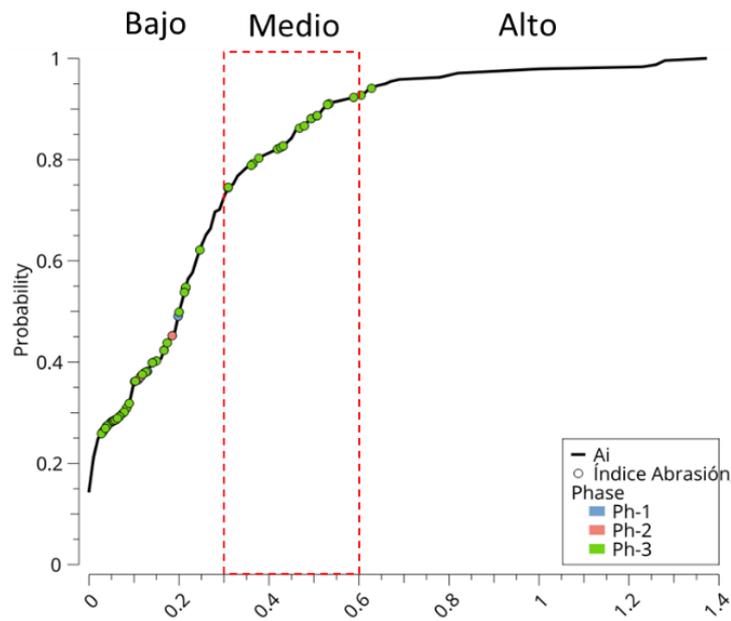
SAMPLE ID	DDH	Desde	Hasta
LDS-05	PECLD04259	4.8	12.3
LDS-20	PECLD04291	20.4	31.1
LDS-07	PECLD04259	26.7	32.7
LDS-09	PECLD04259	65.9	72.2
LDS-10	PECLD04260	64.6	75
LDS-11	PECLD04260	5.6	13.1
LDS-12	PECLD04260	13.1	20.6
LDS-13	PECLD04260	53.9	58.6

3.1 Índice de Abrasión (Ai)

El índice de abrasión se usa para determinar el desgaste de las brocas en la perforación, tubos y medios de acero en trituradores, molinos de barra y de bolas. (SGS, 2020).

Los resultados de Ai que se obtuvieron de la mayor población de muestras se encuentran en rangos bajos y medios. (Figura N°8)

Figura N°8: Índice de abrasión (A_i)

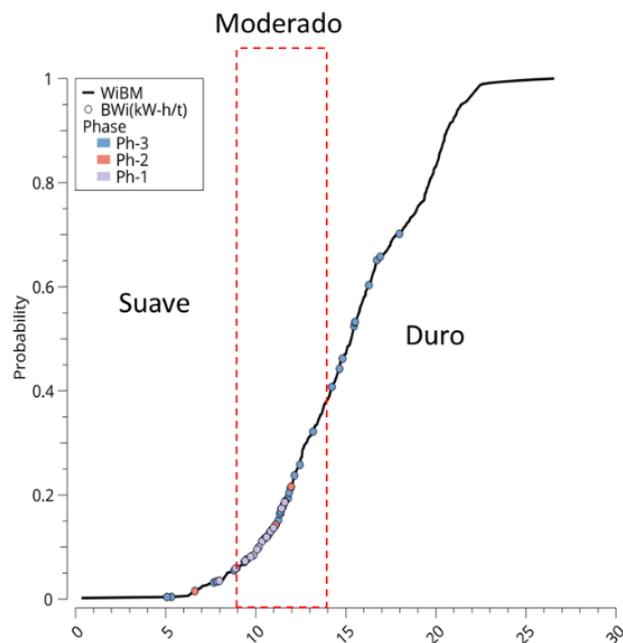


3.2 Distribución de índice de Trabajo (BWi)

Es la energía usada en la reducción de tamaño de partículas, como en el caso para determinar el consumo de energía de un molino de bolas para obtener un tamaño de partículas deseado. (Metallurgist, s.f.).

Los resultados de BWi de la mayor población de muestras se encuentran en el rango moderado, como muestra la Figura N°9.

Figura N°9: Distribución de índice de trabajo (BWi)



4. Flotación

Es el procedimiento que permite concentrar el mineral de la pulpa de material mineralizado que viene del proceso de molienda. En las celdas de flotación se hacen burbujear aire desde el fondo de manera que las partículas de mineral presentes en la pulpa se adhieren a las burbujas de aire y así suben con ellas y se acumulan en una espuma. La espuma rebasa hacia canaletas que bordean las celdas y que la llevan al proceso de decantación. (Chile, s.f.)

En las pruebas de flotación del compósito LDFC- 01 se tiene la presencia de cobre soluble. Donde la cinética de flotación de Cu es lenta por la posible alteración superficial.

Presencia de tenanita en el concentrado bulk y presencia importante de calcopirita en el concentrado de zinc. Se reporta pirrotita en el relave.

Calcopirita libre y asociada a esfalerita en el concentrado de zinc.

Las leyes de cabeza de este compósito reflejan baja ley de zinc pero alto en ley de cobre para este yacimiento tipo VMS.(Tabla N°4)

Tabla N° 4: Análisis Químico del compósito LDFC-01

AQ. Cabeza	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	As	Hg	Cu_SS	Cu_CN	(CuSS+CuCN)/CuT
ID	g/t	%	%	%	%	%	ppm	%	%	%
LDFC-01	16.0	1.00	0.029	0.66	37.9	0.02	2.96	0.026	0.10	20

Las calidades de los concentrados de Zn y Cu son afectados por la presencia de cobre soluble en el concentrado bulk. Donde la calidad de Zinc baja a un 46.6%.(Tabla N°5)

Tabla N° 5: Calidad del compósito LDFC-01.

Producto	Grado Concentrado								
	Ag, g/t	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	S, %	Hg, ppm	As, %	
Conc. Bk	470.3 ± 83.6	32.8 ± 0.1	1 ± 0	1 ± 0	28 ± 0.8	34.4 ± 0.6	13.6 ± 1.2	0.7 ± 0.2	
Conc. Zn	134.7 ± 28.8	6.4 ± 1.6	0.1 ± 0	46.4 ± 3.3	10.6 ± 1.7	34.8 ± 0.5	181.7 ± 4.6	0 ± 0.004	

La recuperación de zinc es afectada por la esfalerita tipo 4 (textura) donde la covelita reemplaza a la esfalerita y el zinc se activa en la flotación bulk al no poder separarse en el proceso de conminución.

La recuperación zinc baja de un 90% a un 68.4%. (Tabla N°6)

Tabla N° 6: Recuperación del compósito LDFC-01.

Producto	Recuperacion %								
	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Hg	As	
Conc. Bk	36.8 ± 7.4	58.3 ± 20.4	42 ± 16	1 ± 1	0.7 ± 0.3	0.8 ± 0.3	6 ± 3.1	41.6 ± 7.7	
Conc. Zn	8.6 ± 3.8	9.4 ± 6.6	2.9 ± 1.2	68.4 ± 2.9	0.2 ± 0.1	0.7 ± 0.3	64 ± 24.1	1.1 ± 0.5	

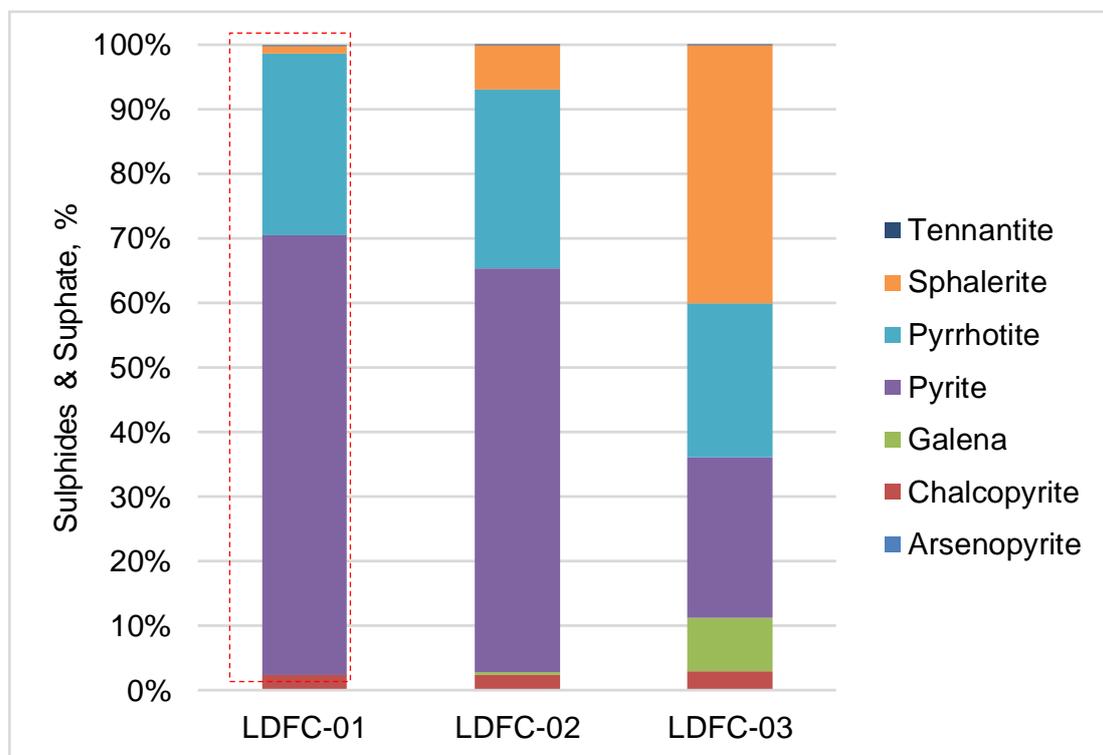
5. Mineralogía

Se realizó el estudio mineralógico del compuesto LDFC-01 que pertenece al OB2 y al dominio SPP (Sulfuro Primario de Pirita). En la figura N°10 observamos que su composición contiene el 89% de sulfuros donde predomina la pirita seguido de la pirrotita, calcopirita y esfalerita.

La presencia de tenantita es muy poco en el compuesto realizado; cabe resaltar que nuestro concentrado de Cu es de muy buena calidad.

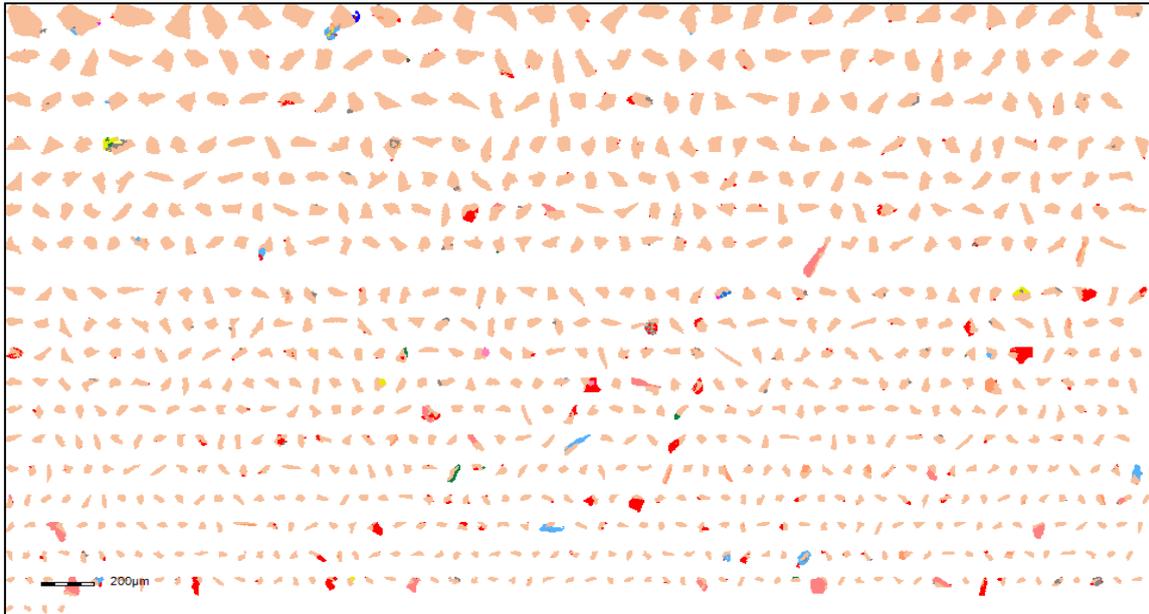
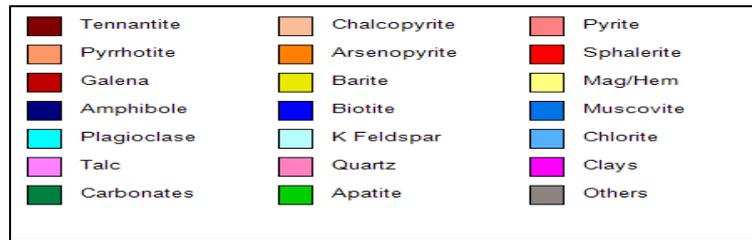
Figura N°10: Mineralogía del compuesto LDFC-01

Composites	Carbonates	Others	Oxides & Hydroxides	Phosphate	Silicates	Sulphides & Suphate
LDFC-01	0.11	0.22	4.09	0.02	6.57	89.0



Se realizó un QEMScan al compuesto LDFC-01 para corroborar las asociaciones mineralógicas observadas en la microscopía de opacos. Donde se observó que la calcopirita en el concentrado de zinc es fina y en su mayoría está asociado a esfalerita, como se muestra en la Figura N°11.

Figura N°11: *QEMScan del compósito LDFC-01*



CONCLUSIONES

Se identificó que el compósito presenta una dureza y abrasividad moderada por contenido de sulfuro masivo, manteniendo las condiciones estándar de la conminución de la planta concentradora.

La recuperación de Cu disminuye al incrementarse el % de cobre soluble y que muestras con alto contenido de cobre soluble presentan riesgos a la recuperación de Zn.

La calidad de los concentrados de Zn y Cu también se ven afectados por no poder separar mecánicamente la covelita de la esfalerita.

Se debe realizar pruebas para poder tratar el mineral en campañas y poder aprovechar los recursos de cobre soluble que se tiene el yacimiento.

LISTA DE REFERENCIAS

- Balboa, L. (2012). Modelamiento y CO-Simulación de leyes de Cobre Total y Soluble. Chile.
- Baumgartner, R., Escobar, G., Gomez, P., Uzategui, A., & Nuñez, F. (2016). Caracterización mineralógica detallada en el depósito de Cu-Au Cerro Corona - La clave fundamental para la geometalúrgia y la optimización de procesos. XVIII Congreso Peruano de Geología.
- Camiper. (2019). ¿Qué es la Conminución de Minerales en Metalurgia? Lima: Redacción Tiempo Minero.
- Chile, M. d. (s.f.). Flotación. Obtenido de <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minerof/flotacion/>
- Diaz, R. y. (2003). Caracterización Geometalúrgica de la Zona de Mixtos Sulfuro Primario-Secundario Del Yacimiento Zaldívar. Chile.
- Innovación, T. e. (2018). Diseño de Pruebas de Cobre Soluble . Lima: Nexa Resources.
- Jaime Yagua Padilla, O. M. (2014). Caracterización geometalúrgica en los yacimientos.
- Javier Basurco, C. Q. (2020). Evaluación de Colectores y Modificadores en Nexa Cerro Lindo. Lima.
- Jean Paul Bueno, N. E. (2020). Informe sobre el aporte de cobre soluble en la Unidad Minera Cerro Lindo. Lima: Nexa Resources Peru.
- Joan Carles Melgarejo, J. A. (2009). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol.62 no.1.
- Leyton Arce, J. J. (2020). Caracterización Mineralógica de Mineral de Cobre con Mena Principal de Calcopirita en dos Molinos de Laboratorio. Lima: Pontificia universidad catolica del peru.
- Lipo, J., Hicks, M., Takalo, v., Remes, A., Talikka, M., Khizanishvili, S., & Natsvlishvili, M. (2019). Caracterización geometalúrgica de minerales complejos de cobre y oro de Georgia del Sur. Revista del Instituto de Minería y Metalurgia de África Meridional, vol.119 n.4.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana vol.62 no.1.
- Merino Valenzuela, P. F. (2019). Flotación de cobre soluble en planta concentradora, división salvador-codelco. Chile: universidad de concepción.

- Metallurgist, 9. (s.f.). Índice de Trabajo de Bond y su Procedimiento. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/indice-trabajo-bond-procedimiento/>
- Parkison, G. (1995). The Sequential Copper Analysis Method-Geological, Mineralogical, And Metallurgical Implications. Colorado.
- Poco, L., McLennan, P., Prinsloo, A., Muchima, K., Kaputula, B., & Siame, C. (2018). Relación entre la mineralogía del mineral y la recuperación de cobre a través de diferentes circuitos de procesamiento en la mina Kansanshi. Revista del Instituto de Minería y Metalurgia de África Meridional, vol.118 n.11.
- R.B. Bhappu, G. P. (1995). The Sequential Copper Analysis Method-Geological, Mineralogical, And Metallurgical Implications. Colorado: SME Anua Meeting.
- SGS, M. (2020). Servicios metalúrgicos y operaciones de unidades - Pruebas de abrasión.
- Yagua Padilla, J., Molina Galdós, O., Prado Neira, M., Zevallos del Carpio, O., & Cardenas Zarate, J. (2017). Caracterización Geometalúrgica en los Yacimientos Minerales. INGEMMET, 151-155.