

Análisis petromineográfico en minerales de óxidos de cobre para una eficiencia en la hidrometalurgia

Kenji Estela Yomona

Kenji.estela@unmsm.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-6312-0101>

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima, Perú

RESUMEN

El continuo agotamiento de las reservas de minerales de cobre ha llevado a las empresas a aplicar nuevos cambios en los procesos de recuperación de minerales más complejos. La lixiviación del cobre es uno de los métodos fundamentales de la hidrometalurgia, ayudando a una recuperación selectiva de los metales de interés a base de agentes de disolución. La finalidad que tuvo la presente investigación fue analizar con la petromineragrafía los minerales de óxidos de cobre para una eficiencia en la hidrometalurgia. La metodología fue de enfoque cuantitativo, no experimental, descriptivo. La población estuvo constituida de 19 muestras de mano de mineral, lo cual 4 muestras fueron destinadas para el análisis petromineragráficos en los laboratorios del INGEMMET. Se aplicó la recopilación de información sistemático en las diferentes bases de datos, utilizando artículos científicos para el desarrollo de esta investigación.

Palabras clave: análisis petromineragráfico; arcillas; pila de lixiviación; recuperación metalúrgica.

Correspondencia: Kenji.estela@unmsm.edu.pe

Artículo recibido 23 enero 2023 Aceptado para publicación: 23 febrero 2023

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Kenji, E. Y. (2023). Análisis petromineográfico en minerales de óxidos de cobre para una eficiencia en la hidrometalurgia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9427-9438.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5148

Petrominegraphic analysis of copper oxide minerals for efficiency in hydrometallurgy

ABSTRACT

The continued depletion of copper mineral reserves has led companies to implement further changes to the more complex mineral recovery processes. Copper leaching is one of the fundamental methods of hydrometallurgy, helping to selectively recover the metals of interest based on dissolution agents. The purpose of this research was to analyze copper oxide minerals with petromineragraphy for efficiency in hydrometallurgy. The methodology was quantitative, non-experimental, descriptive approach. The population consisted of 19 mineral hand samples, of which 4 samples were destined for petromineragraphic analysis in the INGEMMET laboratories. The systematic collection of information was applied in the different databases, using scientific articles for the development of this research.

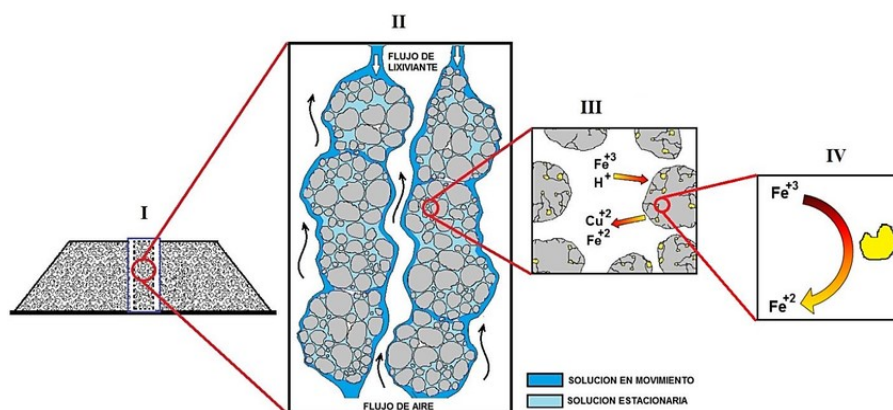
Keywords: *petromineraographic analysis; clays; leaching battery; metallurgical recovery.*

INTRODUCCIÓN

La demanda del cobre ha venido creciendo de manera significativa a nivel mundial debido al avance tecnológico (Hunt et al., 2021), de tal manera que obliga a desarrollar nuevos métodos para una eficiente recuperación hidrometalúrgica de los minerales complejos (Dembele et al., 2022), un claro ejemplo tenemos a los yacimientos tipo ICOG (Iron Oxide Copper Gold) (Emproto et al., 2022), donde los IOCG están conformados por una gran cantidad significativo de óxidos de hierro, cobre, oro, asimismo estos yacimientos pueden contener elementos estratégicos como las tierras raras (REE), cobalto (Co) o Uranio (U) (Li & Wang, 2022).

Actualmente ha venido creciendo el avance tecnológico para la extracción por lixiviación en pilas en minerales de baja ley (figura 1) (Robertson et al., 2022), se viene aplicando exitosamente en todo el mundo con varios tipos de minerales, en diferentes climas y altitudes (Zheng et al., 2023). La principal ventaja de este método está dado por su bajo costo de operación a comparación de otros métodos (Calderón & Garro, 2021), además el tiempo de la construcción de la planta e inicio de las operaciones son más cortas, pero, sin embargo, la recuperación de los metales por lixiviación es más lenta y baja a comparación del método por molienda y agitación (Gomez et al., 2022).

Figura 1. Esquema a diferentes escalas del funcionamiento de una pila de lixiviación



Nota. I) Escala del modelo de pila donde ocurren los fenómenos químicos. II) Escala de interacción del aglomerado con la solución lixivante. III) Escala del transporte de partículas mineral disueltas, y IV) Escala microscópica donde se diluyen los minerales. Tomado de Camero & Guevara, 2015.

Para una eficiencia en la recuperación de la lixiviación en pilas dependerá principalmente de la naturaleza del mineral y así mismo la aplicación de técnicas innovadoras en la preparación del mineral (Wang et al., 2019). Pero sin embargo, ante la realidad

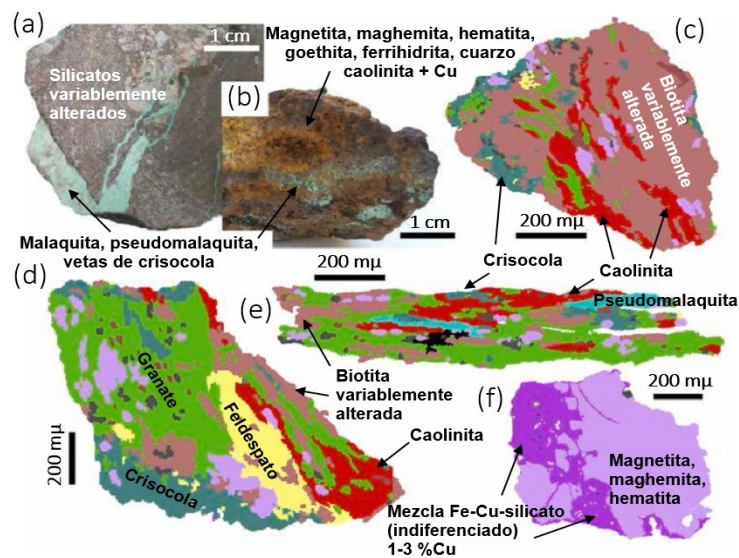
problemática que se puedan presentar en este proceso es la falta de un análisis petrominerográfico que permita identificar los minerales de ganga (Gagliuffi & Vera, 2018, Jin et al., 2021), como es el caso del contenido de arcillas que se encuentran asociados al mineral de baja ley de cobre, estos logran disolverse ocasionando el consumo del ácido sulfúrico (Parada, 2023), además esta disolución de las arcillas libera iones que generan una reacción con el ácido sulfúrico (Yang et al., 2022), creando sales sulfatadas que provocan zonas de impermeabilidad en la pila de lixiviación de tal manera que disminuye la porosidad del mineral impidiendo el pase de los agentes lixiviantes. Por ello esta investigación se planteó el siguiente problema: ¿Con el análisis petrominerográfico en minerales de óxido de cobre permitirá una eficiencia en la hidrometalurgia? Mientras que el objetivo de este estudio fue analizar mediante la petrominerografía los minerales de óxidos de cobre para una eficiencia en la hidrometalurgia. Esto establece un desafío para las empresas mineras en lograr minimizar los efectos que ocasionan los minerales de ganga en la recuperación hidrometalúrgica.

Como antecedente tenemos a Edahbi et al. (2018) que afirmaron en su estudio referente a la caracterización mineralógica utilizando QEMSCAMN y estudio del potencial de tierras raras (REE) dentro de minerales de silicato, un caso del proyecto Matamec, Québec, Canadá. Tuvieron como objetivo estudiar la mineralogía y su distribución de REE dentro de la litología del mineral del depósito de Kipawa. Demostrando que los resultados de las muestras indicaron que en su mayoría tienen contenido de REE y que son liberados a través de una molienda fina y el mineral restante se encuentra atrapado en los minerales de ganga de tipo silicatos. Los resultados de los ensayos químicos y los análisis a través de QEMSCAN, EMPA demuestran que las tierras raras están concentradas de manera más fina y con un elevado grado de liberación y que estos favorecen a la disolución cinética durante las pruebas.

Asimismo, Henne et al. (2021) señalaron en su estudio sobre las texturas y mineralogía de silicatos supergénicos residuales en sobrecarga oxidada pertenecientes a la Mina Salabo de tipo IOCG en Brasil (figura 2). Donde se plantearon como problema que la oxidación supergénica que existe en los minerales ricos en Fe provocó la creación de minerales de arcillas con el contenido de Cu, asimismo, la alteración de silicatos de Fe creó la formación de titanio que recubren el contenido de Cu, de tal manera que esto dificultará los procesos hidrometalúrgicos. Las muestras fueron examinadas en secciones

delgadas por microscopía de luz estándar, también utilizaron la difracción de rayos X en muestras de polvo y para analizar los elementos principales de Cu se realizaron mediante el (ICP-OES). Llegando a la conclusión que los silicatos de Cu son producto por las alteraciones producidas en los minerales oxidados y que son ricos en biotita y vetas de Cu. Asimismo, el contenido de Fe y Mg fue reemplazado en su estructura por un 10% de Cu. También concluyen que las alteraciones supergénicas crearon vetas mezclados con cuarzo con Cu, caolinita y goethita.

Figura 2. Imágenes de silicatos que contienen Cu en las vetas supergénicas de Salobo



Nota. (a) Roca parcialmente alterada (saprolítica) con vetas gruesas que contienen Cu. (b) Roca ferricrete con vetas difusas que contienen Cu. (c) - (e) Imágenes digitales en falso color de fragmentos de roca saprolítica del tamaño de la arena según las imágenes de MLA, que muestran intercrecimientos íntimos de crisocola en roca alterada y en vetas más gruesas con pseudomalaquita. (f) Imagen MLA de un fragmento de ferricrete, que muestra cemento de cuarzo-goethita que contiene Cu. Modificado de Henne et al., 2021. Asimismo Huarccallo (2019) indicó en su estudio sobre la atribución de la caracterización geometalúrgica en los procesos de lixiviación en pilas con cianuro para minerales auríferos de alta sulfuración del yacimiento Ayahuanca. Teniendo como propósito determinar la atribución que pueda tener la caracterización geometalúrgica en los procesos de lixiviación en pilas con minerales de oro de alta sulfuración. Donde la recolección de información fue mediante informes geológicos, informes metalúrgicos del yacimiento Ayahuanca, asimismo realizó trabajos de laboratorio de manera experimental en laboratorios químicos y metalúrgicos de la Minera Apumayo y también se realizaron

pruebas para la caracterización física. Llegando a la conclusión que la atribución que da la caracterización geometalúrgica en los estudios de los minerales, influye de una manera muy significativa para los procesos de lixiviación con cianuro en minerales de oro de alta sulfuración con una certeza del 95%. Además según la correlación de Pearson (r) expresa en que las características geometalúrgicas existentes tiene una dependencia muy importante y que son directamente proporcional al proceso por cianuración.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló mediante el enfoque cuantitativo y que según Gómez, (2012) este tipo de enfoque se realiza a través de una medición numérica, utilizando la recolección de datos para luego ser analizadas y de esta manera contestar preguntas establecidas y probar la hipótesis.

La investigación fue no experimental y de diseño transeccional – causal. ya que las variables no son manipuladas, sólo pudiéndose observar los hechos en su forma natural en determinado tiempo de tal manera que se obtienen los datos de forma directa para ser estudiados posteriormente (Hernández et al. 2014).

La población fue constituida por 19 muestras de mano de mineral que corresponden a las labores de la mina subterránea de la Mina Alcatraz al sur del Perú, lo cual 4 muestras fueron destinadas para estudios petromineragráficos donde se llevó a cabo gracias al apoyo con sus laboratorios de INGEMMET. Las técnicas que se aplicaron en cada etapa para la investigación fueron de revisión documental, la técnica de observación simple con su instrumento la guía de observación de campo, trabajos realizados en laboratorio y trabajos de gabinete.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de los análisis petromineragráficos, en una de las muestras indican que contienen agregado de cuarzo y turmalinas asociados con magnetita y hematita, además se encuentran fuertemente fracturados, con biotita secundaria, arcillas y cloritas ($\leq 0,004\text{mm. } \%2 \text{ c/u}$) de forma intersticial con impregnaciones de limonitas. De igual modo se observa agregados de atacamita y crisocola que rellenan fracturas y oquedades (figura 3). Presenta diseminación de magnetita y relictos de pirita alterados por goethita. En sectores agregados de yeso y carbonatos relleno de fracturas.

Los minerales de cuarzo ocurren como agregados en mosaico inequigranulares ($\leq 3,00\text{mm. } \%64$), en sectores intercrecidos con turmalinas ($\leq 0,77\text{mm. } \%15$). Se encuentran

fuertemente fracturados, relleno de fracturas junto a fragmentos de turmalinas; reemplazados a través de sus fracturas por agregados de magnetita, hematita y jarosita. La secuencia de la formación es de Magnetita-Hematita I, Cuarzo-Turmalinas, Pirita Biotita-Cloritas y Arcillas-limolitas. Cuenta con un tipo de alteración de oxidación débil y que ocurren en fracturas con un ensamble mineralógico de goethita-limonitas. Este resultado guarda relación con lo que sostienen Edahbi et al. (2018) donde la caracterización mineralógica ayudó a determinar que en la mayoría de las muestras tienen contenido de REE y que su grado de liberación se daría a través de una molienda fina (> 70%) y que el mineral restante se encuentra atrapado dentro de minerales de ganga de silicatos como anfíbol, piroxeno, feldespato.

Figura 3

Fotomicrografía de la muestra CM-4554



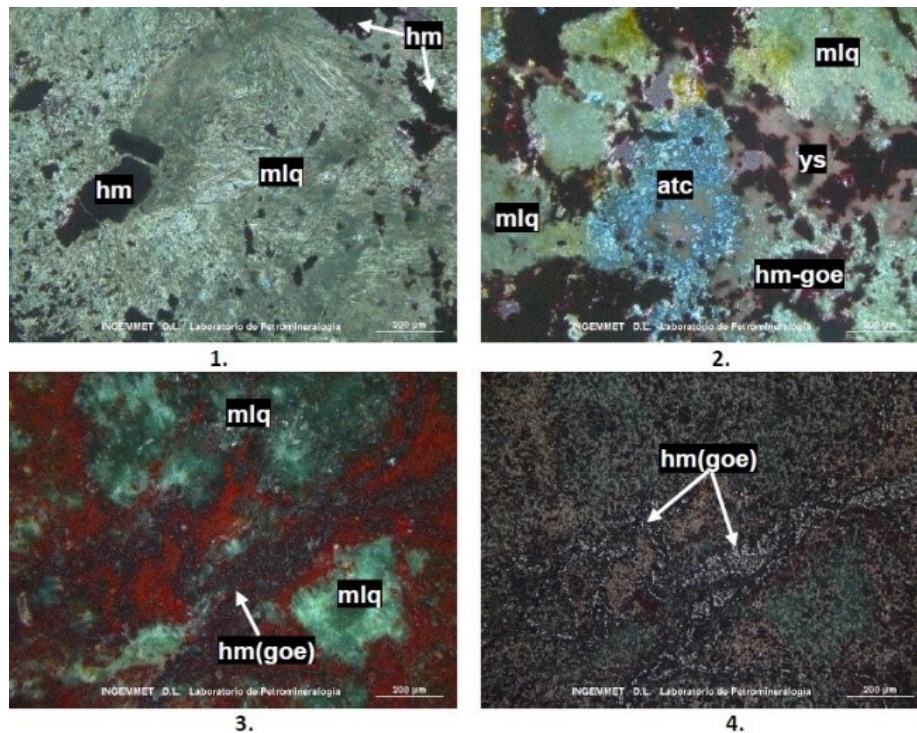
Nota. Agregados de cuarzo: cz y turmalinas: TUMs, con diseminación de magnetita: mt, se encuentran reemplazados por agregados de hematita y goethita: hm II-goe. De forma intersticial se observa agregados de biotita, cloritas y arcillas: bt-CLOs-ARCs. Fracturas y oquedades rellenas por atacamita y crisocola: atc-crc.

Asimismo, otras muestras (figura 4) mostraron la existencia de contenido de malaquita, hematita y goethita y que en su descripción microscópica está conformada por agregados de malaquita que están reemplazados por agregados irregulares de hematita y goethita. En algunos sectores se observa algunos agregados relícticos de atacamita que están fuertemente reemplazados por agregados de malaquita y goethita. También presenta agregados de yeso que rellenan algunas fracturas entre cristales de malaquita con impregnaciones de goethita.

El mineral de malaquita ($\leq 0,30\text{mm}$. 66%) se encuentra como principal constituyente de la muestra, en sectores reemplazan a agregados de atacamita ($\leq 0,06\text{mm}$. 3%) englobándolos por completo. Así mismo están fuertemente reemplazados por agregados de hematita y goethita ($\leq 0,10\text{mm}$. 20%).

Figura 4

Fotomicrografía de la muestra CM-4617



Nota. 1) Detalle de agregados radiados, fibrosos y aciculares de malaquita: mlq reemplazados por hematita: hm. 2) Agregados de atacamita reemplazados secuencialmente por malaquita: mlq, hematita: hm, goethita: goe y yeso: ys. 3) y 4) Agregados de malaquita: mlq reemplazados por hematita alterada a goethita: hm(goe). A partir de los hallazgos encontrados, aceptamos que la caracterización petromineralogica nos ayuda mucho en la identificación de los tipos de mineralización que pueda estar conformada las muestras de mineral y de esta manera tomar buenas decisiones para los procesos de lixiviación en pilas y tener una eficiente recuperación de los metales.

Estos resultados guardar relación con lo que sostiene Zevallos (2019) donde la caracterización de arcillas en brechas magmato-hidrotermal de los pórfidos intracordilleranos ayudó a identificar a los minerales de montmorillonita 7.76% que

serían las principales gangas que generan el problema en la recuperación, asimismo detectaron carbonatos 22.83 % y cloritas 6.59 %.

CONCLUSIONES

- La presente investigación llegó a la conclusión que se identificó los minerales de arcillas mediante un estudio petrominerográfico, que corresponde a una descripción macroscópica y microscópica de las muestras. Una de las muestras presentó bajo contenido de arcillas con porcentaje del 2% y con un tamaño de $\leq 0,004\text{mm}$, que son agregados criptocristalinos, estos se encontraron junto con cloritas ocupando microfracturas e impregnados por goethita y limonitas.
- En otras muestras no se identificó minerales de arcillas, pero si se identificó el mineral de malaquita que conformaba en un mayor porcentaje ($\leq 0,30\text{mm}$. 66%) y con agregados de hematita y goethita ($\leq 0,10\text{mm}$. 20%).
- También se concluye que la presencia de arcillas en los procesos de lixiviación generaría un problema como la disminución de la obtención del cobre en el PLS, ya que estas arcillas tienen una alta capacidad de intercambio catiónico que logran absorber los iones cúpricos.
- Es muy importante realizar estudios petrominerográficos tanto en los procesos de investigación y producción dentro de una empresa minera ya que proporciona una información confiable que permitirá validar y profundizar sus estudios geológicos permitiendo tomar buenas decisiones.

LISTA DE REFERENCIAS

- Calderón, G., & Garro, R. (2021). *Monitoreo de flujos de solución en las pilas de lixiviación de cobre* - Revista Minería. <https://revistamineria.com.pe/actualidad/monitoreo-de-flujos-de-solucion-en-las-pilas-de-lixivacion-de-cobre>
- Camero, & Guevara. (2015). *Modelado matemático y diseño óptimo del proceso de lixiviación en pilas*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3948.9121>
- Dembele, S., Akcil, A., & Panda, S. (2022). Technological trends, emerging applications and metallurgical strategies in antimony recovery from stibnite. *Minerals Engineering*, 175, 107304. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2021.107304>
- Edahbi, M., Benzaazoua, M., Plante, B., Doire, S., & Kormos, L. (2018). Mineralogical characterization using Qemscan and leaching potential study of REE within

- silicate ores: A case study of the Matamec project, Québec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 185, 64–74.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.007>
- Emproto, C., Mathur, R., Simon, A., Bindeman, I., Godfrey, L., Dhnaram, C., & Lisitsin, V. (2022). Integrated O, Fe, and Ti isotopic analysis elucidates multiple metal and fluid sources for magnetite from the Ernest Henry Iron oxide copper gold (IOCG) Deposit, Queensland, Australia. *Ore Geology Reviews*, 150, 105170.
<https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2022.105170>
- Gagliuffi, P. M., & Vera, M. (2018). Caracterización petromineralógica de los yacimientos Toquepala y Cuajone - [Boletín B 49]. In *Repositorio Institucional INGEMMET*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1521>
- Gomez, A., Ilyas, S., Graem, H., & Hyunjung, K. (2022). A critical review of artificial intelligence in mineral concentration. *Minerals Engineering*, 189, 107884.
<https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2022.107884>
- Gómez, S. (2012). Metodología de la investigación. *Red Tercer Milenio S.C., 1ra edición*, 3–82. <https://docplayer.es/80673161-Lignobond-f-lignosulfonato-liquido-ficha-tecnica-viscosidad-mpa-temperatura-oc-lignobond-f-ficha-v9.html>
- Henne, A., Craw, D., Paterson, D., & Southam, G. (2021). Textures and mineralogy of residual supergene copper silicates in oxidised overburden. *Minerals Engineering*, 163, 106775. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2021.106775>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw hill. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Huarccallo, J. F. (2019). *Influencia de la caracterización geometalúrgica en el proceso de cianuración en pilas de lixiviación de mineral aurífero epitermal de alta sulfuración del Yacimineto Ayahuanca* [Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/2727/TESIS%20-2019-CIENCIAS%20DE%20INGENIERIA-HUARECCALLO%20MAMANI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Hunt, C., Romero, J., Jara, J., & Lagos, G. (2021). Copper demand forecasts and predictions of future scarcity. *Resources Policy*, 73, 102123. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2021.102123>
- Jin, X., Chen, L., Chen, H., Zhang, L., Wang, W., Ji, H., Deng, S., & Jiang, L. (2021). XRD and TEM analyses of a simulated leached rare earth ore deposit: Implications for clay mineral contents and structural evolution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 225, 112728. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.112728>
- Li, R., & Wang, X. L. (2022). External fluid incursion during Cu-mineralization stage of Mina Justa iron oxide copper-gold (IOCG) deposit: Evidence from triple sulfur isotope geochemistry of chalcopyrite. *Ore Geology Reviews*, 149, 105102. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2022.105102>
- Parada, G. (2023). *ARCILLAS EN PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS*. <https://avrconsultores.cl/arcillas-en-procesos-hidrometalurgicos/>
- Robertson, S. W., van Staden, P. J., Cherkaev, A., & Petersen, J. (2022). Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching. *Hydrometallurgy*, 208, 105811. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2021.105811>
- Wang, G. rong, Lui, Y. yuan, Tong, L. lin, Jin, Z. nan, Chen, G. bao, & Yang, H. ying. (2019). Effect of temperature on leaching behavior of copper minerals with different occurrence states in complex copper oxide ores. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(10), 2192–2201. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65125-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65125-3)
- Yang, W., Qian, L., Jin, B., Feng, Q., Li, L., He, K., & Yang, J. (2022). Leaching behaviors of copper and arsenic from high-arsenic copper sulfide concentrates by oxygen-rich sulfuric acid leaching at atmospheric pressure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107358. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.107358>
- Zevallos, G. (2019). *Caracterización de arcillas en brecha magmato-hidrotermal en los pórfidos intracordilleranos de la franja Andahuaylas-Yauri con DRX, espectrometría y microscopía*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/11195>

Zheng, C., Jiang, K., Cao, Z., Wang, H., Liu, S., Waters, K. E., & Ma, H. (2023). Pressure leaching behaviors of copper-cobalt sulfide concentrate from Congo. *Separation and Purification Technology*, 309, 123010. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2022.123010>