

Tratamiento de un mineral oxidado de cobre

Treatment of an oxidized copper mineral



Ányelo Rojas¹, Christian Escobar²,  Norman Toro^{3*}

<https://eqrcode.co/a/G3xCz7>

RESUMEN: En este estudio se planteó como objetivo proponer un proceso para el tratamiento de un mineral oxidado de cobre con ley media. Para esto inicialmente se procedió a realizar distintos tipos de análisis ya sea químico, físico, granulométrico y mineralógico para determinar si nuestro mineral corresponde a óxido o sulfuro y poder plantear una propuesta técnica mediante la vía hidrometalúrgica o pirometalúrgica. Con los datos obtenidos por los análisis se presentó un mineral oxidado de cobre compuesto principalmente por crisocola y atacamita con una abundancia que bordea el 1%, este mineral posee 1,73% de cobre total con 1,45% de cobre soluble siendo la vía más factible la hidrometalurgia con un consumo de ácido de 33,6 kg/t obtenido mediante un test de botella. Posteriormente se llevó a cabo las pruebas de curado y aglomerado siendo la mejor prueba la de 24 horas con una concentración de ácido del 60%, en la lixiviación columnar se obtuvo una concentración de cobre aproximada de 5 g/L en 72 horas y en el proceso de extracción por solventes se determinó que el mejor extractante fue la mezcla al 10% v/v con una razón de O/A = 1 y una eficiencia del 93%. En conclusión, el mineral oxidado de cobre entregado se trató por la vía hidrometalurgia a través de una lixiviación columnar obteniendo un porcentaje de extracción de cobre del PLS aproximado del 68% para luego en la etapa de SX ser tratado con orgánico que contiene extractante mezcla al 10%.

Palabras clave: Minerales oxidados, lixiviación, hidrometalurgia, extracción de cobre.

ABSTRACT: The objective of this study was to propose a process for the treatment of an oxidized copper mineral with a medium grade. For this, different types of analysis must be carried out, whether chemical, physical, granulometric and mineralogical, to determine if our mineral corresponds to an oxide or sulfide and to be able to propose a technical proposal through the hydrometallurgical or pyrometallurgical route. With the data received by the analysis, an oxidized copper mineral composed mainly of chrysocolla and atacamite was presented with an abundance that borders 1%, this mineral has 1.73% of total copper with 1.45% of soluble copper being the route hydrometallurgy more feasible with an acid consumption of 33.6 kg/t obtained through a bottle test. Subsequently, the curing and agglomerate tests were carried out, being the best 24-hour test with an acid concentration of 60%. In the columnar leaching, an approximate copper concentration of 5 g/L was obtained in 72 hours and in the process of solvent extraction, it was determined that the best extractor was the 10% v/v mixture with an O/A ratio = 1 and an efficiency of 93%. In conclusion, the oxidized copper ore delivered was treated by hydrometallurgy through columnar leaching, obtaining a percentage of copper extraction from the PLS obtained of 68%, and then in the SX stage being treated with organic that contains extractant mixture to 10%

Keywords: Oxidized minerals, leaching, hydrometallurgy, copper extraction.

Recibido: 26/04/2020

Aprobado en su forma original: 09/09/2020

¹Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas. Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile.

²Departamento de Minería y Metalurgia, Universidad Tecnológica de Chile INACAP, Antofagasta, Chile.

³Faculty of Engineering and Architecture, Universidad Arturo Pratt, Antofagasta, Chile.

*Autor para correspondencia: Norman Toro. E-mail: ntoro@ucn.cl

INTRODUCCIÓN

La producción de un metal a partir de un mineral, concentrado o alguna otra fuente secundaria como desechos industriales o chatarras que contengan metales se obtiene mediante el proceso de pirometalurgia, hidrometalurgia o una mezcla de ambos. La hidrometalurgia se divide en lixiviación, separación, purificación y recuperación. En la primera etapa de lixiviación el metal se trabaja o lixivia mediante un reactivo líquido llamado agente lixivante que puede ser de distinto tipo según el mineral a tratar dependiendo de sus características físicas, químicas, mineralógicas, etc. Luego la solución resultante se purifica para eliminar las impurezas presentes que no son de interés a través del método de extracción por solventes, precipitación, adsorción, intercambio iónico, electrolisis o cementación. Finalmente se utiliza un proceso de recuperación para lograr obtener un metal de valor. El cobre es uno de los metales más importantes en nuestro país, posee propiedades como buena conductividad eléctrica, térmica, ópticas y catalíticas, es por esto que se utiliza en gran parte en las industrias eléctricas y electrónicas y lo encontramos en la naturaleza como sulfuros y óxidos como por ejemplo azurita, malaquita, tenorita, crisocola, bornita, brochantita, enargita, calcopirita, calcosina, etc. ([Ekmekyapar, 2015](#)).

Los minerales oxidados de cobre y los que contienen silicatos, carbonatos y cloruros son tratados generalmente por vía lixiviación con su medio lixivante adecuado, seguido de una etapa de extracción por solventes y una última etapa de electroobtención para lograr el producto final llamado cátodo de cobre. El medio lixivante más común es el ácido sulfúrico pero trae problemas cuando hay presencia de carbonatos, ya que consumen mucho más ácido de lo normal y el costo es aún mayor, en este caso es recomendable trabajar con medio alcalino o amoniacal ya que es más selectivo, provoca menos corrosión y consume mucho menos reactivo con ganga de carbonatos calcáreos ([Wang X, 2009](#)). Los minerales de cobre se pueden clasificar en dos grupos principales según sus composiciones químicas: minerales de óxido de cobre y minerales de sulfuro de cobre. Los minerales de

óxido de cobre tienen en general un contenido de cobre más bajo que los sulfuros y también su flotación es más difícil que los de sulfuro de cobre. Los métodos hidrometalúrgicos han encontrado aplicación principalmente para el tratamiento de minerales que son demasiado magros en metal. El enriquecimiento de los minerales que tienen bajos contenidos metálicos por flotación y producción por métodos pirometalúrgico no es factible económicamente. Debido a la necesidad de cobre es necesario el tratamiento de los minerales de cobre que tienen contenidos de cobre demasiado bajos y esto requiere el establecimiento de plantas hidrometalúrgicas ([Kunkul, 1994](#)).

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedimiento a escala laboratorio

Análisis visual

Previo a la caracterización física del mineral, se toma una pequeña muestra de este y mediante una inspección visual se observa el color, aspecto y se identifican las posibles especies mineralógicas.

Muestreo

Posteriormente se procede a realizar un muestreo para obtener una muestra representativa del total del mineral a través de una división por riffle. La cual será utilizada para realizar el análisis granulométrico de cabeza.

Distribución granulométrica

La muestra obtenida anteriormente se deposita en el harnero el cual tiene las mallas 1", 3/4", 1/2", 1/4", #6 y #10 ordenadas de mayor a menor tamaño de abertura. Este se opera durante 8 minutos aproximadamente y se procede a medir la masa del sobre tamaño de cada malla. El bajo tamaño de la malla #10 se debe dividir en un cortador giratorio debido a la gran cantidad de este, principalmente debido a que el Rotap solo admite un máximo de mineral a clasificar.

Tamizaje

Una de las muestras de 1000 g aprox. Obtenida del divisor giratorio es cortada hasta obtener una muestra de 310 g aprox. Luego es depositada en el Rotap en el cual se utilizaron las mallas #20,

#30, #40, #50, #70, #100, #140, #200, #270, #325, el proceso de tamizaje se lleva a cabo durante 15 minutos. Al finalizar el tamizaje se procede a medir la masa retenida en cada tamiz.

Chancado terciario

La muestra anteriormente descrita es reducida en el chancador terciario esto para cumplir con los requisitos indicados para cada análisis, esta muestra es dividida en el cortador de riffle donde una de ellas de aproximadamente 100 g es embolsada para el análisis mineralógico y otra con las mismas cualidades es guardada como testigo.

Pulverizado

Una de las muestras ya chancada, será pulverizada hasta obtener 100% bajo malla #150, esta muestra al igual que la anterior será dividida en dos muestras de 100g donde una de ellas será embolsada y enviada a análisis químico y la otra será guardada como testigo.

Picnometría

Una muestra proveniente del chancador terciario es homogenizada mediante paño roleo para efectuar los ensayos de picnometría. Esta prueba se inicia midiendo la masa del picnómetro vacío P1, luego se agrega mineral dentro de este y se pesa junto a su tapa P2, posteriormente se agrega agua hasta colmar el picnómetro y se vuelve a pesar P3, por último, se limpia el picnómetro y se rellena con solamente agua y se pesa junto a su tapa P4. Por último, utilizando la [ecuación \(1\)](#) se obtiene la densidad perteneciente al mineral. Estas pruebas se repiten hasta verificar que el valor obtenido no varíe significativamente.

$$Dp = \frac{P2 - P1}{P4 + P2 - P1 - P3} \quad (1)$$

Donde:

Dp: Densidad del mineral.

P1: Peso del picnómetro (g).

P2: Peso del picnómetro más mineral (g).

P3: Peso del picnómetro más mineral y enraizado con agua (g).

P4: Peso del picnómetro más agua enraizada (g).

Ensayo de humedad

Otra de las muestras de mineral proveniente del chancado terciario de 200 g se esparce uniformemente dentro de una bandeja limpia la cual luego será puesta dentro del horno mufla a una temperatura de 105 °C durante 24 horas. Al finalizar el periodo de secado la muestra se saca del horno y nuevamente se pesa. Al conocer la masa inicial de mineral y la masa seca, se procede a utilizar la [ecuación \(2\)](#) para conocer el porcentaje de humedad que poseía la muestra.

$$C(\%) = \frac{W_{hmdo} - W_{seca}}{W_{hmdo}} * 100 \quad (2)$$

Dónde:

C (%): porcentaje de humedad.

W_{hmdo} : peso inicial de la muestra (antes de entrar al horno).

W_{seco} : peso de la muestra inmediatamente después de retirada del horno.

Prueba de botella

Se prepararon 6 litros de agua desmineralizada añadiendo pequeñas dosis de ácido, esto hasta alcanzar un pH aproximado de 1,5 o inferior. Para ello, se utilizó un pH-metro, el cual requería para su calibración 3 soluciones buffer. Al mismo tiempo, se alistaron 2 tarros lecheros, A y B, los cuales fueron rellenos con 466,9 y 444,4 g de mineral respectivamente. Este mineral era una muestra representativa del total del mineral. A ambos tarros se les agregó un volumen tal de solución hasta alcanzar una razón sólido-líquido 1:3. Luego, son ingresados al equipo de rodillos con el fin de hacer entrar en contacto el mineral con la solución de manera homogénea. Durante este proceso se realizaron tomas de muestras de la solución de 20 mL, con su posterior reposición y calibración a pH 1,5. Estas muestras fueron almacenadas para un posterior análisis químico por titulación para calcular la concentración de cobre y ácido. De este modo, al considerar las concentraciones de ácido obtenidas y teniendo en cuenta el ácido añadido en la reposición de cada muestra y al calibrar el pH, se logra obtener un consumo de ácido total de la muestra.

Aglomerado y curado

Se prepararon 12 muestras representativas con una masa aproximada de 400 g del total del mineral, las que se obtuvieron a través del equipo cortador de rifle. Estas fueron separadas en tres grupos; A, B y C (donde cada grupo contenía 4 muestras). A cada muestra del grupo A se les añadió una solución lixivante 17,00; 20,40; 23,80 y 27,20 kg/t de ácido respectivamente, hasta alcanzar una humedad del 10%, y así mismo para el grupo B y C. Luego de esto, por medio de los tambores aglomeradores durante un tiempo de 8 minutos a 10 rpm, fueron aglomeradas. Posteriormente a esto se dejó reposar al grupo A durante 18 horas, al B por 24 y el C por 48. De este modo, al pasar el tiempo indicado, por medio de un análisis visual poder apreciar la calidad del glómero y el efecto del ácido en cada caso.

Lixiviación en columnas

En este proceso, mediante 4 columnas que se prepararon previamente, fueron rellenas con 2 kg de mineral cada una, este fue previamente aglomerado y curado con 10% de humedad usando 149 mL de solución lixivante con 20,40 kg/t de ácido. Posteriormente se establecieron en posición vertical las columnas en un soporte, para ser regadas con una solución lixivante, la cual contenía una concentración de 10 g/L de ácido. La solución es impulsada por bombas de diafragma, así luego ser regada sobre la superficie superior del lecho de cada columna por el método de goteo. La primera y segunda columna con una tasa de 8 L/h*m² y la tercera y cuarta a 10 L/h*m². De esta manera la solución percoló a través del lecho, mientras mediante reacciones químicas logró disolver el cobre contenido en el mineral, todo esto durante 72 horas. Al final de la prueba al PLS obtenido se le realizó un análisis químico por titulación, posterior a ello es guardado para pruebas futuras de extracción por solvente, mientras que los ripios fueron lavados, filtrados y secados para tratarlos en un pulverizador para obtener una muestra de 100 g, de esta manera ser enviadas a la realización de un análisis químico.

Extracción por solventes

Para este proceso se evaluaron 3 tipos distintos de extractantes; cetoxima, aldoxima y una mezcla de ambos a una razón de 1:1. Cada extractante se utilizó conjunto con diluyente Escaid para preparar orgánico a distintos porcentajes; 10, 15 y 20% de extractante. Luego cada una de estas soluciones orgánicas se utilizaron para entrar en contacto en un embudo decantador de 250 mL con un PLS resultante del proceso de lixiviación de 5,49 g/L de cobre, esto utilizando razones O/A para cada orgánico de 3/4, 1 y 3/2, resultando en un total de 27 pruebas. Para favorecer el contacto entre el orgánico y el acuoso, se utilizó un equipo agitador orbital durante un tiempo de 5 minutos. Posterior a la agitación se dio un tiempo para la separación de fases respectivas y así obtener la solución acuosa para someterla a un análisis químico de titulación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Visual

Para el siguiente análisis se utiliza como criterio la observación detallada del mineral contenido en el lote. En las [figuras 1](#), se logra apreciar un color y aspecto característicos de una posible mena oxidada de cobre, las cuales suelen presentar minerales oxidados de cobre más comunes como los carbonatos, sulfatos y oxiclорuros. En consecuencia, se infiere que el tratamiento para beneficiar dicho mineral podría tratarse del método de lixiviación del tipo ácida o básica. Sin embargo, la lixiviación que se aplicará para esto, que podría ser columnar, agitada o por bateas, quedará determinada por la ley de cobre soluble en el sistema. Por otra parte, el tamaño de las rocas observadas no supera los 2,5 cm en su lado más largo.

Análisis granulométrico de cabeza

En [Tabla 1](#), se observan los resultados obtenidos al realizar el análisis granulométrico a la muestra de mineral a beneficiar, cabe destacar que el F80 obtenido en el análisis de cabeza es de 9683,07 μ m (10 mm aprox.), con lo cual se tiene el tamaño requerido en caso de utilizar el método de lixiviación en columna por lo cual no fue necesario realizar un chancado primario ni secundario, principalmente debido a que se



Fuente: elaboración propia

Figura 1. Muestra de mineral destinada para el análisis visual.

Tabla 1. Análisis granulométrico de cabeza obtenido del proceso de harneado y de tamizaje

Análisis Granulométrico					
Malla	Apertura [μm]	Masa [kg]	Retenido [%]	Retenido acum. [%]	Pasante [%]
1"	25000	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19000	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12500	1,11	1,39	1,39	98,61
1/4"	6300	29,21	36,39	37,77	62,23
#6	3350	16,21	20,19	57,96	42,04
#10	2000	7,78	9,70	67,66	32,34
#20	850	10,02	12,49	80,15	19,85
#30	600	3,10	3,86	84,01	15,99
#40	425	2,39	2,97	86,98	13,02
#50	300	2,01	2,50	89,48	10,52
#70	212	1,74	2,17	91,65	8,35
#100	150	0,00	0,00	91,65	8,35
#140	106	0,49	0,62	92,27	7,73
#200	75	2,97	3,70	95,97	4,03
#270	53	0,78	0,97	96,94	3,06
#325	45	0,23	0,28	97,23	2,77
#-325		2,23	2,77	100,00	0,00
Total		80,28	100,00		
F80 [μm]	9683,07				

requieren muestras de mayor grosor para ser reducidas en estas etapas.

Análisis químico

En [Tabla 2](#), se observan los resultados entregados por el laboratorio de biotecnología de la Universidad Católica del Norte al término del análisis químico solicitado, en base a esto se da cuenta que el mineral a beneficiar posee una ley

de cobre total de 1,73 del cual un 83,8% corresponden a cobre soluble y un 16,2 % de cobre insoluble, en base a esto se valida la aplicación de un proceso vía hidrometalurgia, siendo los métodos de lixiviación una buena alternativa como lo es el caso del método de lixiviación en pilas o inclusive bateas debido a la ley media que posee el mineral. Además, el consumo de ácido de 41,20 se encuentra dentro

Tabla 2. Resumen de los resultados entregados por el análisis químico

Muestra	CuT [%]	CuS [%]	FeT [%]	Consumo de ácido [Kg/t]
A.Q-4	1,73	1,45	3,18	41,20

del rango para un mineral oxidado. Por último, no se haya una gran presencia de hierro en la muestra el cual podría contaminar el PLS al precipitar a pH sobre 2.

Ensayo de picnometría

Tabla 3. Resultados obtenidos de las diferentes picnometría realizadas

Nº de Ensayo	Densidad [g/cm³]
1	2,56
2	2,54
3	2,58
4	2,54
5	2,58
6	2,54
Promedio	2,56
Moda	2,54
Desviación estándar	0,02

Los resultados observados en [Tabla 3](#), se obtuvieron mediante el procedimiento de picnometría descrito anteriormente en el procedimiento efectuado en laboratorio, además se realizó un análisis estadístico para hallar el valor de densidad que mejor represente a la muestra, siendo en este caso la moda de 2,54 g/cm³. La cual se encuentra en el rango de densidad para un mineral oxidado ([Carvajal C. 2012](#)).

Ensayo de humedad

Tabla 4. Resultado del ensayo de humedad realizado a la muestra durante 24 h a 105°C.

Masa Humedad	Masa Seca	Humedad [%]
144,36	118,23	2,55

Los resultados de [Tabla 4](#), se obtuvieron mediante la diferencia de masas obtenida por una muestra inicial la cual poseía cierta humedad y la masa de la misma muestra tras someterse a un secado a 105°C durante 24 horas.

Pruebas de botella

Tabla 5. Consumo de ácido obtenido a partir de la prueba de botellas realizadas a un mineral oxidado de cobre

densidad ácido [g/cm³]	1,84
Pureza	0,98
Vol. ácido agregado [ml]	8,70
masa de ácido [g]	15,69
masa de mineral [g]	466,90
consumo de ácido total prueba de botella [kg/t]	33,60
Consumo de ácido total análisis químico [kg/t]	41,20

En [Tabla 5](#), se aprecia los parámetros y resultados obtenidos al realizar la prueba de botella para medir el consumo de ácido del mineral tratado. En comparación al consumo obtenido del análisis químico el cual es mayor, esto debido principalmente al hacerse la prueba con una granulometría más fina bajo malla #10 con lo cual el contenido de cobre que posee el mineral presenta un mayor grado de liberación por lo cual consume una mayor cantidad de ácido, en cambio el análisis realizado en las pruebas de botella presenta una granulometría mayor P80 = 3/8". ([Guiachetti D. 2011](#)).

Aglomerado y Curado

En [Tabla 6](#), se aprecian los resultados de aglomerado y curado bajo distintos porcentajes de ácido agregado. Además, se indica la extracción de cobre obtenida al lixiviar agitadamente solo con agua. Se tomó en cuenta para la selección del tiempo de aglomerado y porcentaje de ácido agregado un análisis visual y prueba de guante para ver la resistencia de los glómeros además de la extracción de cobre, pero este en un segundo plano. Se prefirió utilizar un aglomerado y curado de 24 horas, agregando un 60% del ácido a esta etapa. ([Bertoni J., 2018](#))

Tabla 6. Prueba de aglomerado y curado realizada durante 24 horas

Muestra (% ácido)	Promedio tiosulfato gastado [mL]	[Cu ⁺²] g/L	Masa cobre [g]	%Ext Cu
p1 (50%)	0,60	0,75	0,23	15,52
p2 (60%)	1,50	1,84	0,55	38,15
p3 (70%)	1,50	1,91	0,57	39,44
p4 (80%)	1,60	2,03	0,61	42,03

Pruebas en lixiviación columnar

En [Tabla 7](#), se puede ver los diferentes resultados obtenidos en las pruebas de lixiviación columnar para cuatro columnas que operaron en diferentes condiciones, columna 2 es duplicado de columna 1 y columna 4 es duplicado de columna 3, esto se hizo principalmente para asegurar que no hubiera errores al momento de realizar las pruebas, como se puede observar las columnas 1 y 2 obtuvieron extracciones de cobre cercanas al 68% mientras que las columnas 3 y 4 alcanzaron una extracción de aprox. 63%. Esto indica que la mejor tasa de riego para efectuar la lixiviación de mineral es bajo los parámetros de 10 g/L de H_2SO_4 , tasa de riego 8 [L/h*m²]. Además, se procedió a recalcular la ley de cobre soluble presente en la muestras a partir del cobre soluble presente en los ripios.

Pruebas de extracción

Según se logra apreciar en la [Figura N°2](#), se muestra la evaluación por medio del diagrama de McCabe Thiele del orgánico formado por 10% del extractante en mezcla a una razón O/A de 1:1. Gracias a la comparativa con las otras 27 pruebas, se logró determinar que el que obtuvo un mejor rendimiento fue este. Debido a fundamentos teóricos en los que se explica que el extractante Aldoxima manifiesta un comportamiento al momento de la extracción, pero al momento de realizar la descarga en la etapa de re-extracción, esta no es eficiente. Por otro lado, la Cetoxima no es tan eficiente en la etapa de extracción, pero si al momento de liberar el ion deseado en la etapa de re-extracción. Dicho esto, se deja en evidencia que una buena opción siempre sería trabajar en el proceso con un orgánico hecho de ambos extractantes, ósea una mezcla ([Domic, 2001](#)). Respecto a la razón O/A, se ha logrado evidenciar que en la actualidad a

Tabla 7. Resultados obtenidos al realizar pruebas de lixiviación columnar, para cuatro columnas a 10 g/l de H_2SO_4 , aglomerado al 60% de ácido y 24 horas de curado. Columna 1 y 2 trabajaron a una tasa de riego de 8 [L/h*m²] y columna 3 y 4 a una tasa de 10 [L/h*m²]

Datos	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
Concentración cobre PLS [g/L]	5,26	5,41	5,46	5,34
Vol. Final PLS[ml]	3359,00	3791,00	3410,00	2988,00
Masa Cu PLS [g]	18,68	21,08	18,62	15,96
Ley CuS Ripios [%]	0,56	0,54	0,61	0,62
Masa Ripios [g]	1635,45	1789,94	1769,23	1568,78
Masa CuS Ripios [g]	9,16	9,67	10,79	9,73
Extracción de cobre[%]	67,10	68,56	63,31	62,13
Ley CuS Re-calculada [%]	1,39	1,54	1,47	1,28

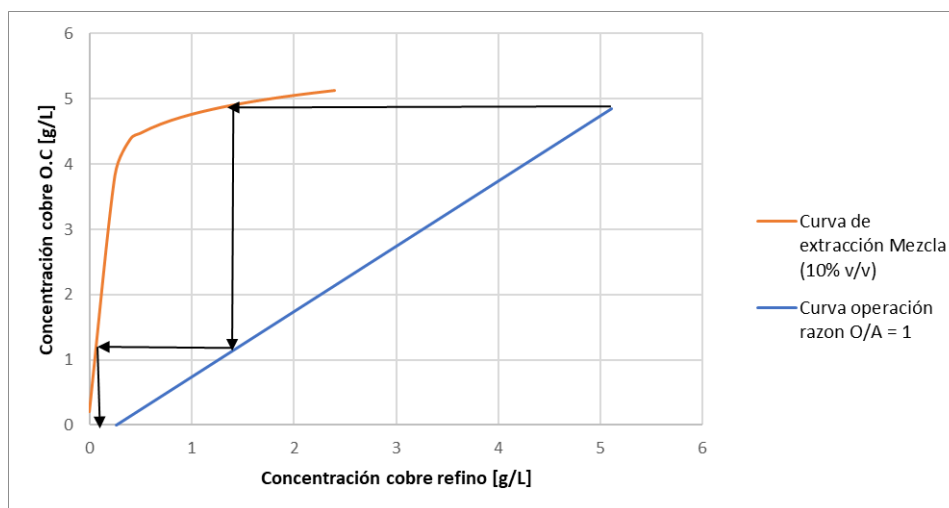


Figura 2. Diagrama de McCabe Thiele para una Mezcla al 10% v/v a una razón O/A= 1

nivel industrial los valores no suelen alejarse tanto del 1:1. Considerando también que el utilizar valores superiores a 1:1, traería en consecuencia un uso excesivo de orgánico, esto podría impactar fuertemente en lo económico además de posibles arrastres para otras etapas, en cambio sí se utilizan valores inferiores, la eficiencia de la extracción decaería ([Domic, 2001](#)). Por último, tal como se aprecia en el diagrama anterior, según el análisis que se puede obtener de este, es que las etapas necesarias para lograr una eficiente extracción son de 2 etapas, la eficiencia alcanzada se puede apreciar en la [tabla 8](#).

Tabla 8. Eficiencia de extracción por etapas y total de las pruebas de extracción

Mezcla	10% v/v
Razón O/A	1,00
Eficiencia de extracción etapa 1 [%]	72,60
Eficiencia de extracción etapa 2 [%]	75,00
Eficiencia de extracción total [%]	94,13

En la [Tabla 8](#), se aprecia una eficiencia total alcanzada de 94,13%, lo que representa un buen comportamiento del orgánico en la etapa de extracción. Esto ligado a que para lograrlo fueron necesarias dos etapas. Teóricamente, es difícil lograr una buena extracción en 1 sola etapa, por lo que usualmente es necesario aplicar 2 de ellas. Esto con el fin de optimizar la concentración futura deseada ([Domic, 2001](#)).

CONCLUSIONES

1. El mineral corresponde a una mena oxidada de cobre con una ley de cobre total de 1,73% y, 1,45% de cobre soluble. Esto en vista de los resultados observados del análisis visual y químico.
2. Se determina que la vía metalúrgica a utilizar para el beneficio del mineral es la hidrometalurgia, específicamente la lixiviación. Por tratarse de un mineral oxidado de cobre con una ley de cobre total de 1,73%, del cual un 83,8% corresponde a cobre soluble.
3. La densidad promedio del mineral en las pruebas de picnometría fue 2,56 g/cm³ y su

humedad resultó en un valor de 2,55%, lo que encaja con el perfil de un mineral oxidado de cobre.

4. El consumo de ácido obtenido en las pruebas de botella entregó un resultado aproximado de 34 kg/t, el cual es menor del análisis químico. Esto debido a que el grado de liberación del mineral en las pruebas de botella es menor, por lo que este se adaptaría más a las condiciones de las futuras etapas del proceso.
5. Los glómeros obtenidos con una adición del 60% del ácido y con un 10% de humedad además de 24 horas de curado, demostraron tener una mejor estabilidad y mejoraron en la extracción de cobre.
6. Las pruebas que obtuvieron mejores resultados en la lixiviación columnar fueron la columna 1 y 2, en estas se utilizó una tasa de riego del 8 L/h*m². Debido a que la extracción de cobre alcanzó un mayor valor, el cual fue 67,83% en promedio, un PLS resultante 3,575 L y de 5,34 g/L de cobre en promedio. Mientras que en las columnas 3 y 4 hubo una menor recuperación, lo que indica que no es necesaria una tasa de riego mayor.
7. La mezcla al 10% v/v y con una razón O/A=1 demostró un mejor comportamiento en extracción, la cual considera dos etapas para el proceso. La eficiencia alcanzada fue de extracción del 94,13%. En comparación con las otras las cuales no se adaptaban bien a las curvas del diagrama de McCabe Thiele. Cabe destacar, que demostró un buen comportamiento durante el proceso de separación de fases, mostrando pocos arrastres. Además, de que se estima que este orgánico al ser mezcla, manifestará un buen comportamiento en el proceso futuro de re-extracción.

AGRADECIMENTOS

Se agradece al Académico Norman Toro por contribuir tanto en guiar, así como también monetariamente para que esta investigación se pudiera realizar. Además, se destaca que este trabajo fue apoyado por la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo Tecnológico, UCN.

BIBLIOGRAFÍA

- Arriagada, P. 2006. Diseño, construcción y optimización de electro obtención de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva. Universidad de Chile.
- Bertolino, J. 2018. Pruebas de lixiviación en columnas de mineral oxidado Doña Elba, Compañía Minera las Cenizas. Facultad de ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción.
- Cáceres, G. 2007. Introducción a la hidrometalurgia. Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.
- Cáceres, G. 2016. Hidrometalurgia Avanzada. Universidad Andrés Bello, Chile.
- Cárcamo, H. 2003. Operaciones mecánicas, apuntes para alumnos de ingeniería metalúrgica. Universidad Católica del Norte, Chile.
- Carvajal, C. 2012. Caracterización de un mineral oxidado Sector Veta Blanca. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Cifuentes, G. 2019. El sistema DomTec, un proceso electrolítico multipropósito para recuperar metales desde diferentes soluciones iónicas industriales. Revista Minerales del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- COCHILCO. 2019. Tendencias de usos y demandas de productor de cobre. Comisión Chilena del Cobre.
- Domic, E. 2001. Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones.
- Dhawan, N., Safarzadeh, M. S., Miller, J. D., Moats, M. S., & Rajamani, R. K. 2013. Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations. Minerals Engineering.
- Ekmekyapar, A., Demirkıran, N., Künkül, A., & Aktaş, E. 2015. "Leaching of malachite ore in ammonium sulfate solutions and production of copper oxide". Brazilian Journal of Chemical Engineering.
- Guiachetti, D. 2011. Consumo de ácido sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Kunkul, A., M., Yapici, S., Demirbağ A. & Kocakerim M. 1994. "Leaching kinetic of malachite in ammonia solutions". International Journal of mineral processing.
- Ruiz, M. 2013. Hidrometalurgia. Universidad de Concepción, Chile.
- Sepúlveda, F. 2014. Evaluación del uso de energía solar en electro obtención de cobre. Universidad de Chile.
- SERNAGEOMIN. 2019. Anuario de la minería en Chile 2018. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- Schmidt, P. 2001. Criterios de diseño de un proceso hidrometalúrgico para minerales de cobre oxidados. Universidad de Chile.
- Wang, X., Chen, Q., Hu, H., Yin, Z., & Xiao, Z. 2009. "Solubility prediction of malachite in aqueous ammoniacal ammonium chloride solutions at 25 C". Hydrometallurgy.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)