

Lixiviación de un mineral mixto de cobre

Leaching of a mixed copper ore

Pablo González ¹, Christian Escobar ², Norman Toro ³ *



<http://opn.to/a/SQ09U>

RESUMEN: Se evalúa un proceso de lixiviación para un mineral mixto de cobre. Primero, se realizó prueba de agitación para evaluar la disolución de un mineral ya que, aunque presente una alta disolución (83%) en su mayoría se trata de un sulfuro y además evaluar la extracción de cobre a distintas dosificaciones de ácido. Luego, se realizaron pruebas de aglomerado y sulfatación, para conocer el comportamiento y respuesta del mineral bajo distintas condiciones de tratamiento. Donde se obtiene que los mejores parámetros de operación son un tiempo de curado de 48 horas y dosificaciones de 60 kg de ácido/t de mineral y 65 kg de agua/t de mineral. Finalmente, considerando estos datos obtenidos (ley del mineral, mineralogía, granulometría, comportamiento en pruebas realizadas y teoría) y costos asociados del proceso, se concluye que el mejor proceso para beneficiar el mineral es por la vía hidrometalúrgica con un proceso de lixiviación en pilas, columnas a nivel laboratorio, con una tasa de riego de 9 L/h/m² y 10 g/L de solución lixivante, bajo un tratamiento previo de aglomerado y curado con los parámetros de operación mencionados anteriormente. Además, el FeT presente no causaría inconvenientes en caso de trabajar el mineral por método de lixiviación, ya que el pH sería inferior a 2 al trabajar en un medio ácido y no correría el riesgo de la precipitación del hierro causando impermeabilidad a la pila.

Palabras clave: Lixiviación, mineral mixto, líquido iónico.

ABSTRACT: A leaching process for a mixed copper ore is evaluated. First, an agitation test was performed to evaluate the dissolution of a mineral since, although it presents a high dissolution (83%), it is mostly a sulphide and also to evaluate the extraction of copper at different acid dosages. Then, agglomerate and sulfation tests were carried out to find out the behavior and response of the mineral under different treatment conditions. Where it is obtained that the best operating parameters are a curing time of 48 hours and dosages of 60 kg of acid / t of mineral and 65 kg of water / t of mineral. Finally, considering these data obtained (ore grade, mineralogy, grain size, behavior in tests performed and theory) and associated costs of the process, it is concluded that the best process to benefit the mineral is by the hydrometallurgical route with a heap leaching process, columns at the laboratory level, with an irrigation rate of 9 L / h / m² and 10 g / L of leaching solution, under a previous agglomerate treatment and curing with the operation parameters mentioned above. In addition, the FeT present would not cause any inconvenience in the case of working the mineral by leaching method, since the pH would be less than 2 when working in an acidic medium and there would be no risk of iron precipitation causing impermeability to the pile.

Key words: Leaching, mixed ore, ionic liquid.

Recibido: 25/04/2020

Aprobado en su forma original: 02/06/2020

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

Los minerales de cobre se pueden clasificar en óxidos (debido a que tiene un oxígeno en su composición química), sulfuros (contiene específicamente azufre en su composición) o mixtos ([Conejeros et al., 2020](#)).

Los óxidos, los cuales son procesados por hidrometalurgia, son cada vez más escasos debido a su explotación en los últimos tiempos por el hecho de estar en más abundancia sobre la corteza terrestre teniendo contacto con la atmósfera. Estos pasaran de ser un 30,8% en el 2015 a un 12% en 2027 ([COCHILCO, 2020](#)).

En comparación con los sulfuros, estos son cada vez más abundantes, pero estos al ser tratados por vías pirometalúrgicas poseen dificultades como la generación de relaves provenientes del proceso de flotación ([Toro et al., 2018](#); [Torres et al., 2019](#)), generación de gases como SO₂, arsénico y altos consumos de energía ([Toro, Briceño, et al., 2019](#); [Toro, Pérez, et al., 2019](#); [Torres et al., 2020](#)).

El procesamiento más utilizado para el tratamiento de minerales oxidados de cobre es la lixiviación en pilas, para poder optimizar el proceso o predecir su comportamiento se utiliza la lixiviación en columnas a escala de laboratorio, donde este método puede representar las mismas condiciones de tratamiento como tasa de riego y concentración de ácido sulfúrico, por otra parte, entrega resultados como consumo de ácido sulfúrico y recuperación de cobre ([Saldaña et al., 2019](#)).

En el presente trabajo se realizarán pruebas de lixiviación por agitación, aglomerado y curado para conocer el comportamiento y respuesta de un mineral oxidado de cobre.

Luego, y considerando todos los resultados obtenidos se procede a beneficiar el mineral por la vía hidrometalúrgica mediante un proceso de lixiviación en columnas. Finalmente, se hacen pruebas con el uso de un líquido iónico, como alternativa ambientalmente más sustentable respecto al ácido sulfúrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Métodos de lixiviación

Lixiviación en pilas

Se utiliza para minerales de ley baja-media, normalmente se procesan por esta vía óxidos y sulfuros secundarios. En este método se debe contar con cierta granulometría (El mineral a

tratar debe estar en un rango entre (1/4)” y (1/2)” para facilitar la liberación del mismo) por lo que es necesario contar con instalaciones para la preparación del mineral, como equipos de conminución.

La aglomeración de los finos a los gruesos con agua y ácido sulfúrico concentrado, esta operación se conoce bajo el nombre de “curado”. Mediante este proceso se eleva la resistencia del material mientras se mantiene una buena permeabilidad del lecho del mineral con el fin de alcanzar alturas de pilas adecuadas, mejorar los índices de recuperación de cobre y acortar los ciclos de lixiviación. La lixiviación en columna representa a escala de laboratorio a la lixiviación en pilas.

Lixiviación agitada

La lixiviación por agitación es utilizada con mineral finamente molido, con el fin de aumentar el área expuesta a la lixiviación junto a la aplicación de agitación, que permite disminuir el espesor de la capa límite de difusión, al mismo tiempo que se maximiza el área de la interfase gas-líquido. Se utiliza preferentemente con minerales no porosos o que produzcan muchos finos y especialmente en la disolución de especies que requieren condiciones de operación especiales.

Materiales

Líquido iónico

Los líquidos iónicos (ILS) son sales orgánicas que se funden en o por debajo de 100 ° C. Por lo general, presentan buenas propiedades disolventes y, a menudo pueden facilitar e influir en las reacciones químicas sin ser transformado en el proceso. Con frecuencia tienen una alta estabilidad térmica y amplias temperaturas de trabajo. El interés en ILS es debido principalmente a sus características respetuosas del medio ambiente como alternativas verdes para disolventes orgánicos volátiles tradicionales y debido a su amplia gama de propiedades fisicoquímicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño experimental

Preparación mecánica del mineral mixto

Se comenzó a trabajar con un material con una masa de 103,2 kg aproximadamente, este se

homogenizó mediante técnica de cono y cuarteo dejando 56 kg para trabajar. Luego se utilizó el método de bandejas (harnero Gilson) para obtener un perfil granulométrico del material, en donde un 53 % de éste tiene una granulometría sobre malla (1/2)" y (3/4)".

Los procedimientos para la preparación de las muestras representativas de análisis químico y mineralógico, realizados son las que siguen:

Se realiza técnica de cono y cuarteo 2 veces seguidas hasta llegar a una muestra de 12,6 kg, a pesar de que el método de rifles es más eficiente se evitó debido a la granulometría del material.

La muestra de 12,6 kg se reduce en un 100% a granulometría -10# mediante etapas de chancado secundario y terciario (Es necesario que la muestra este -10# para un análisis mineralógico). Obteniendo una muestra de 12,2 kg, la pérdida de un pequeño % de mineral se atribuye a que queda atrapado en el chancador secundario y terciario.

Esta muestra de 12,2 kg se introduce al rifle giratorio donde se obtienen 18 muestras con una masa de 677 g aproximadamente cada una. Se toman 2 muestras una destinada al análisis granulométrico y la otra para análisis mineralógico, químico, cálculo de % de humedad y densidad.

Una de las muestras seleccionadas se rolea durante un tiempo y luego se realiza método de cono y cuarteo hasta obtener una masa de 500 g, los cuales se utilizarán para análisis granulométrico.

La muestra 2 al igual que la anterior se rolea durante un tiempo y se realiza método de cono y cuarteo, pero en este caso hasta obtener una masa de 200 g, los cuales se utilizarán para un análisis mineralógico. Estos 200 g de mineral se vuelven a dividir en dos partes en este caso mediante roleo y cono cuarteo (sin descartas los opuestos) para obtener 2 muestras de 100 g una es enviada a análisis mineralógico y la otra queda como testigo. Para el material que se descartó en el primer cono y cuarteo de la muestra 2, se realiza nuevamente roleo y cono cuarteo hasta obtener 200 g de mineral, estos 200 g son pulverizados y luego se separa en 2 partes mediante el método ya mencionado para enviar 100 g a análisis químico y dejar otros 100 g de testigo. (Las muestras enviadas a análisis químico y mineralógico están selladas y rotuladas).

Pruebas de lixiviación por agitación

Para realizar estas pruebas es necesario que todo el mineral a utilizarse esté 100% bajo malla 10 Tyler. El experimento consiste en hacer pruebas variando concentraciones del solvente a utilizar (en este caso ácido) y mantener constantes las otras variables.

Se desarrollan 3 pruebas con las siguientes condiciones:

- Masa de mineral: 200 g
- Solución lixivante: (H₂O + H₂SO₄): 400 mL
- Razón sólido/líquido: 1:2
- Concentración de ácido: 20, 40 y 60 g/L
- Tiempo de lixiviación: 120 min
- Velocidad de agitación: 600 rpm

Se agregan 400 ml de solución lixivante a diferentes concentraciones de ácido (20, 40 y 60 g/L) en 3 vasos precipitados. Luego estos vasos se posicionan debajo de un agitador mecánico, primero se regula la velocidad de las aspas (600 rpm), una vez que se llega a la velocidad necesaria para la prueba se agregan los 200 g de mineral en los vasos precipitados.

Se toman muestras de la solución para 5, 20, 40, 60 y 120 min, para ser enviadas a análisis químico solicitando el cobre presente en la solución, hierro y ácido sulfúrico.

Pruebas de sulfatación

Esta prueba consiste en tomar muestras de 500 g representativos del mineral a trabajar y que esté a la granulometría a la que se va a trabajar a futuro. En este caso se toman 6 kg del mineral total con una granulometría 100% bajo 1" de tamaño y se separan en 12 muestras (500 g) las que se aglomeran agregando distintas dosificaciones de ácido y agua, luego se deja reposar el mineral.

Las dosificaciones de ácido y agua, y tiempos de reposo se indican en la [tabla 1](#).

Una vez cumplido el tiempo de reposo, se determina el volumen aparente de las muestras para poder obtener la densidad aparente. Luego se toman muestras representativas de 200 g las que son lavadas y agitadas en 600 ml de agua hirviendo a una velocidad de agitación de 600 rpm. Finalmente se toman muestras de 200 ml

para enviar a análisis químico, solicitando cantidad de cobre, hierro y ácido sulfúrico.

Pruebas de lixiviación en columnas

Se utilizan 3 columnas de PVC de 50 cm de largo y 10,4 cm de diámetro, éstas se ubican en sus bases fijas en la superficie del mesón de laboratorio, se coloca el fondo falso dentro de las columnas y se regulan las bombas peristálticas para un riego adecuado de éstas. Luego se ingresan 2,5 kg de mineral previamente aglomerado y curado a la columna la cual está prevista de un doble fondo.

El mineral a trabajar está 100% -1” y las condiciones dadas en la [tabla 2](#).

Se realiza toma de muestras cada 24 horas y se lleva un control constante de la tasa de riego, debido a que las bombas van perdiendo su precisión con el tiempo y necesitan ser calibradas. Se solicita análisis químico de Cu²⁺, H₂SO₄ y Fe T para cada una de las muestras. La

prueba concluye una vez que el PLS tenga una apariencia similar a la solución de riego.

Pruebas de lixiviación con líquido iónico

Para realizar estas pruebas es necesario que todo el mineral a utilizarse esté 100% bajo malla 10 Tyler.

Se desarrollan 3 pruebas con las siguientes condiciones:

- Masa de mineral: 2 g
- Solución lixivante: (ILS + H₂SO₄): 30 ml
- Concentración de ácido: 60 g/L
- Concentración de ILS: 5 ml
- Tiempo de lixiviación: 60 min
- Velocidad de agitación: 600 rpm

Se agregan 30 ml de solución lixivante 1 vaso precipitado. Luego este vaso se posiciona debajo de un agitador mecánico, primero se regula la

Tabla 1. Detalles de los parámetros de dosificación

Nº Muestra	Dosificación de ácido (Kg H ⁺ /t mineral)	Dosificación de agua (Kg H ₂ O/t mineral)	Tiempo de reposo (h)
1	20	65	24
2	20	85	24
3	20	65	48
4	20	85	48
5	40	65	24
6	40	85	24
7	40	65	48
8	40	85	48
9	60	65	24
10	60	85	24
11	60	65	48
12	60	85	48

Tabla 2. Parámetros de operación en lixiviación en columnas

Columna 1		Columna 2		Columna 3	
Aglomerado y curado					
Tiempo de reposo:	48 horas	Tiempo de reposo:	48 horas	Tiempo de reposo:	48 horas
Dosificación de ácido:	40 kg/t de mx	Dosificación de ácido:	60 kg/t de mx	Dosificación de ácido:	60 kg/t de mx
Dosificación de agua:	65 kg/t de mx	Dosificación de agua:	65 kg/t de mx	Dosificación de agua:	65 kg/t de mx
Lixiviación					
Ácido en solución lixivante:	10 g/L	Ácido en solución lixivante:	10 g/L	Ácido en solución lixivante:	10 g/L
Tasa de Riego:	9 L/h/m ²	Tasa de Riego:	9 L/h/m ²	Tasa de Riego:	6 L/h/m ²

velocidad de las aspas (600 rpm), una vez que se llega a la velocidad necesaria para la prueba se agregan los 2 g de mineral en los vasos precipitados.

Se toman muestras de la solución para 10, 20, 40, 60 min, para ser enviadas a análisis químico solicitando el cobre presente en la solución.

RESULTADOS

Análisis químico

Tabla 3. Resultados análisis químicos

Cu Total %	Cu Sol %	FeT %
0,58	0,48	2,81

Análisis mineralógico

Tabla 4. Resultados análisis mineralógicos

Mineral	% Volumen
Calcosina (Cu ₂ S)	40
OxiCu	30
Pirita (FeS ₂)	15
Digenita (Cu _{1,78} S)	10
Covelina (CuS)	5

Densidad del mineral por picnometría

Tabla 5. Masas para picnometría

Variable	1	2	3	4	unidad
picnómetro	36,089	36,089	36,089	36,087	g
Pic + Mx	39,163	39,103	39,118	39,110	g
Pic + Mx + H ₂ O	87,772	87,731	87,742	87,724	g
Pic + H ₂ O	85,841	85,838	85,841	85,827	g
Densidad	2,689	2,688	2,685	2,684	g/cm ³

Tabla 6. Densidad promedio según picnometría

Promedio	g/cm ³
----------	-------------------

Porcentaje de humedad del mineral

Tabla 7. Parámetros para cálculo de humedad

% Humedad	1,3%
Masa Humedad (g)	100
Masa Seco (g)	98,7
Tiempo de secado (h)	12

Pruebas de sulfatación

Ver [tablas 8, 9](#) y [figura 1](#).

Pruebas de lixiviación por agitación

Las pruebas de lixiviación por agitación indican que es viable trabajar el mineral por la vía hidrometalúrgica debido a las extracciones de cobre obtenidas, llegando a una extracción de cobre soluble del 60,8%. Se puede apreciar que la mayor extracción se obtiene para una dosificación de 40 g/L de ácido, sin embargo, la [figura 3](#) y [4](#) indican que las mayores cinéticas de extracción están a una dosificación de 60 g/L (Ver [tablas 10, 11, 12](#) y [figuras 2](#) y [3](#)).

Pruebas de lixiviación en columnas

La mayor recuperación es la obtenida por la columna 3 (55,5% CuT) superando a las otras 2 en varios puntos (columna 1 48,84%, columna 2 49,02%, respectivamente). La columna 3 genera un menor flujo de PLS que las demás columnas, esto debido a su menor tasa de riego respecto a las otras (6 L/h/m² v/s 9 L/h/m²). Además, la columna 3 obtiene mejores resultados para una tasa de riego de 6 L/h/m² por sobre una de 9 L/h/m² debido a que los sulfuros secundarios tienen una menor cinética de extracción de cobre que los óxidos, por este motivo se necesita de un tiempo adecuado para que la solución haga contacto con la superficie del mineral (Ver [tablas 13, 14, 15](#) y [figuras 4](#) y [5](#)).

Tabla 8. Resultados obtenidos en pruebas de sulfatación en 24 horas

Sulfatación 24 horas						
Dosificación Agua (kg de agua/t mx)	Dosificación ácido (kg de H ⁺ /t de mx)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	% Extracción Cu T	% Extracción Cu S	Consumo ácido Kg /t mx.
65	20	0,50	1,73	31,25	25,86	18,88
85	20	0,59	1,15	36,88	30,52	19,57
65	40	0,66	2,88	41,25	34,14	34,96
85	40	0,49	3,45	30,63	25,34	34,27
65	60	0,49	4,60	30,63	25,34	53,84
85	60	0,50	5,75	31,25	25,86	52,46

Tabla 9. Resultados obtenidos en pruebas de sulfatación en 48 horas.

Sulfatación 48 horas						
Dosificación Agua (kg de agua/t mx)	Dosificación ácido (kg de H ⁺ /t de mx)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	% Extracción Cu T	% Extracción Cu S	Consumo ácido Kg /t mx.
65	20	0,60	1,73	37,50	31,03	18,88
85	20	0,40	1,15	25,00	20,69	19,57
65	40	0,48	4,60	30,00	24,83	32,89
85	40	0,58	6,33	36,25	30,00	30,82
65	60	0,88	10,35	55,00	45,52	46,94
85	60	0,46	8,05	28,75	23,79	49,70

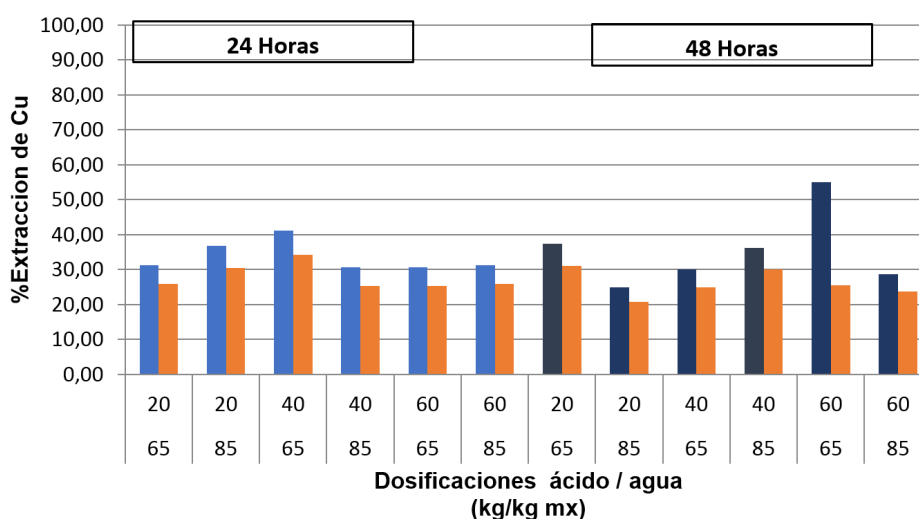


Figura 1. Extracciones de Cobre en pruebas de sulfatación para 24 y 48 horas.

Tabla 10. Extracciones de cobre obtenidas para una concentración de 20 g/L de ácido sulfúrico.

Agitación 20 g/L						
Tiempo (min)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	% Extracción Cu T	% Extracción Cu S	Consumo ácido Kg /t mx.	Fe ⁺² [ppm]
5	1.26	12.29	38.70	39.56	14.55	75
10	1.63	13.46	54.26	55.47	12.21	110
30	1.75	13.46	54.52	55.73	12.21	135
60	1.80	13.46	56.71	57.97	12.21	135
120	1.87	13.46	58.70	60.00	12.21	185

Tabla 11. Extracciones de cobre obtenidas para una concentración de 40 g/L de ácido sulfúrico.

Agitación 40 g/L						
Tiempo (min)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	% Extracción Cu T	% Extracción Cu S	Consumo ácido Kg /t mx.	Fe ⁺² [ppm]
5	1.52	30.44	43.43	44.40	17.39	105
10	1.81	32.19	50.87	52.00	15.49	155
30	1.83	31.61	56.35	57.60	18.21	165
60	0.65	29.27	59.35	60.67	24.12	195
120	1.79	32.19	59.48	60.80	20.32	205

Tabla 12. Extracciones de cobre obtenidas para una concentración de 60 g/L de ácido sulfúrico.

Tiempo (min)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	Agitación 60 g/L		Consumo ácido Kg /t mx.	Fe ⁺² [ppm]
			% Extracción Cu T	% Extracción Cu S		
5	1.69	55.60	16.96	17.33	6.18	135
10	1.87	55.02	53.41	54.60	10.10	185
30	2.00	55.02	56.17	57.42	12.86	220
60	2.02	54.43	58.72	60.02	16.69	295
120	2.06	55.60	57.91	59.20	17.30	270

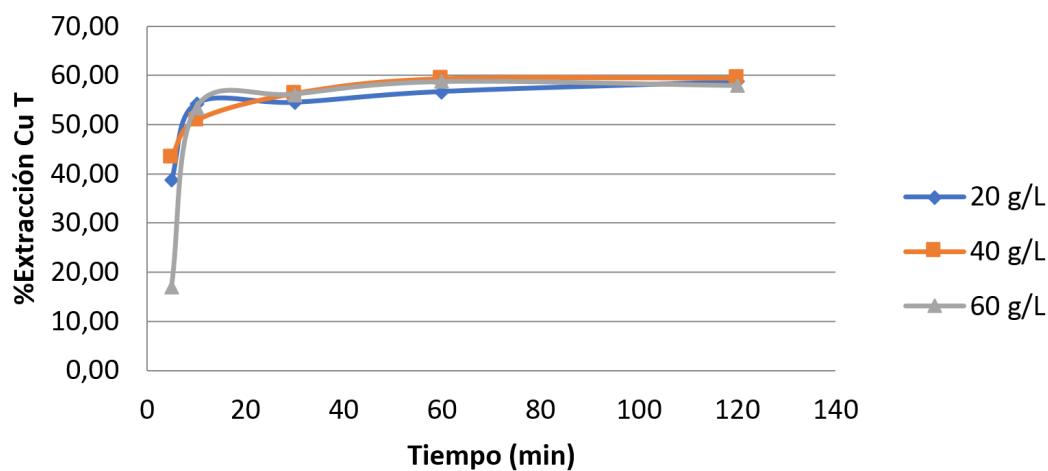


Figura 2. Extracción de Cobre total en el tiempo por pruebas de agitación

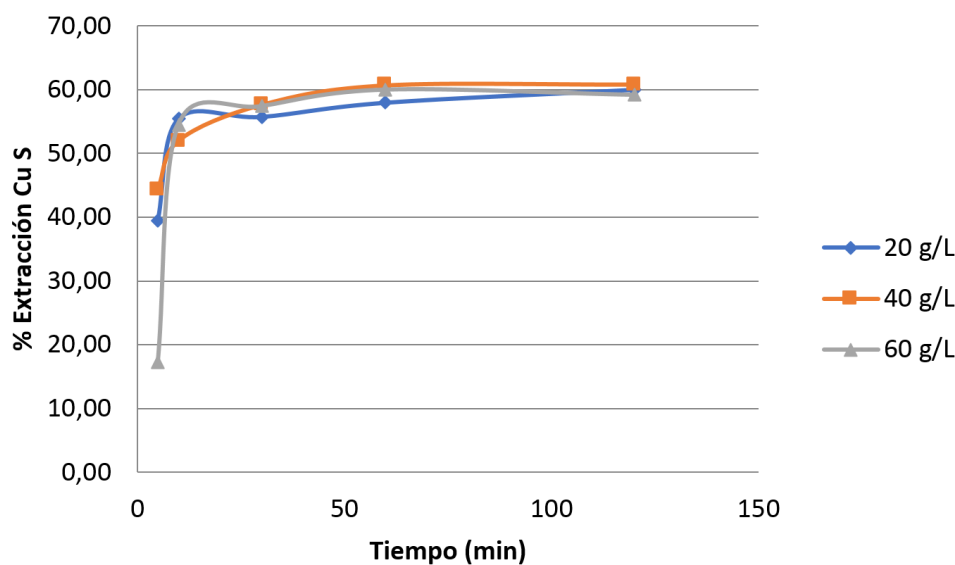


Figura 3. Extracción de Cobre soluble en el tiempo por pruebas de agitación

Tabla 13. Extracciones de cobre obtenidas en columna para una dosificación de ácido de 40 kg H⁺/t de mx y una tasa de riego de 9 L/h/m².

Columna 1								
Tiempo(h)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	Volumen (L)	Masa de Cu disuelto (g)	Masa ácido disuelto (g)	Masa de Cu acumulada (g)	Extracción CuT(%)	Extracción CuS (%)
24	1.87	18.55	0.77	1.51	14.29	1.51	13.02	15.73
48	1.7	11.42	0.79	1.34	9.02	2.85	24.59	29.72
72	0.72	10.94	0.75	0.54	8.21	3.39	29.25	35.34
96	0.7	10.94	0.82	0.57	8.97	3.97	34.2	41.32
120	0.68	10.47	0.86	0.58	9	4.55	39.24	47.41
144	0.65	10.47	0.86	0.56	9	5.11	44.06	53.24
168	0.63	9.75	0.88	0.55	8.58	5.67	48.84	59.01

Tabla 14. Extracciones de cobre obtenidas en columna para una dosificación de ácido de 60 kg H⁺/t de mx y una tasa de riego de 9 L/h/m².

Columna 2								
Tiempo(h)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	Volumen (L)	Masa de Cu disuelto (g)	Masa ácido disuelto (g)	Masa de Cu acumulada (g)	Extracción CuT (%)	Extracción CuS (%)
24	3.6	35.2	0.81	2.92	28.51	2.92	25.14	30.38
48	1.45	15.22	0.9	1.31	13.7	4.22	36.39	43.97
72	0.8	10.94	0.84	0.67	9.19	4.89	42.18	50.97
96	0.38	9.4	0.84	0.32	7.59	5.21	44.93	54.29
120	0.29	9.4	0.86	0.25	7.77	5.46	47.08	56.89
144	0.15	9.4	0.89	0.13	8.04	5.6	48.23	58.28
168	0.1	9.4	0.91	0.09	8.22	5.69	49.02	59.23

Tabla 15. Extracciones de cobre obtenidas en columna para una dosificación de ácido de 60 kg H⁺/t de mx y una tasa de riego de 6 L/h/m².

Columna 3								
Tiempo(h)	Cu ²⁺ (g/L)	H ₂ SO ₄ (g/L)	Volumen (L)	Masa de Cu disuelto (g)	Masa ácido disuelto (g)	Masa de Cu acumulada (g)	Extracción CuT (%)	Extracción CuS (%)
24	3.19	14.75	0.5	1.6	7.37	1.6	13.75	16.61
48	2.12	11.89	0.55	1.17	6.54	2.76	23.8	28.76
72	1.93	11.42	0.53	1.02	6.05	3.78	32.62	39.42
96	1.9	7.14	0.6	1.14	4.28	4.92	42.45	51.29
120	1.31	8.56	0.62	0.81	5.31	5.74	49.45	59.75
144	0.78	9.04	0.59	0.46	5.33	6.2	53.42	64.54
168	0.39	8.09	0.62	0.24	5.01	6.44	55.5	67.06

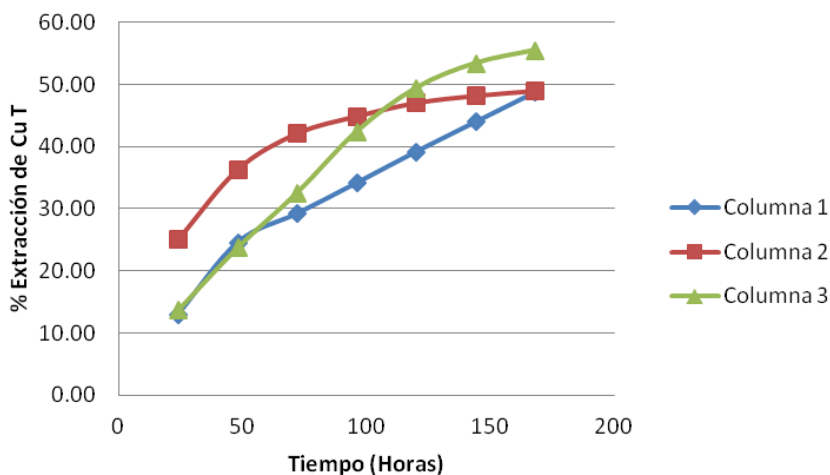


Figura 4. Extracciones de cobre total en el tiempo en las 3 columnas.

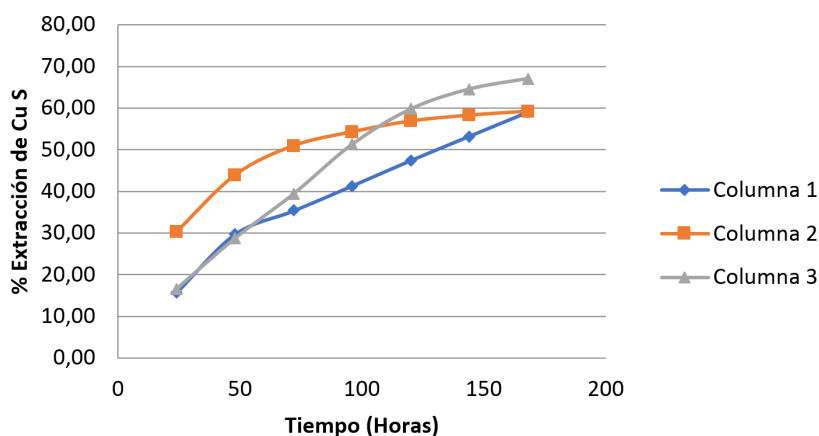


Figura 5. Extracciones de cobre total en el tiempo en las 3 columnas.

Tabla 16. Extracciones de cobre obtenidas mediante la utilización de líquido iónico como lixiviante.

Tiempo (min)	[Cu ²⁺]	% Extracción Cu T	% Extracción Cu S
10	0.20	51.72	62.50
20	0.19	49.14	59.38
40	0.18	46.55	56.25
60	0.21	54.31	65.63

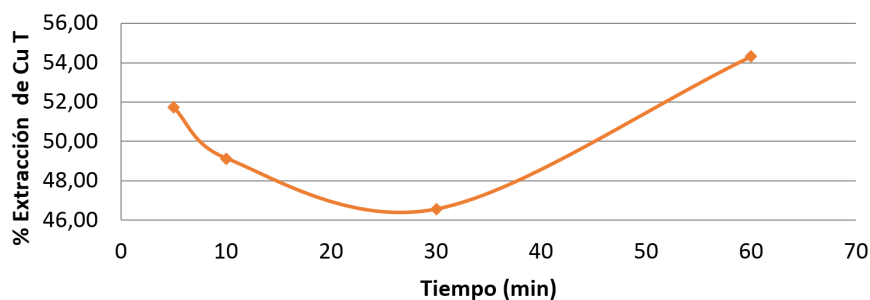


Figura 6. Extracciones de cobre total en el tiempo en el tiempo utilizando líquido iónico como lixiviante

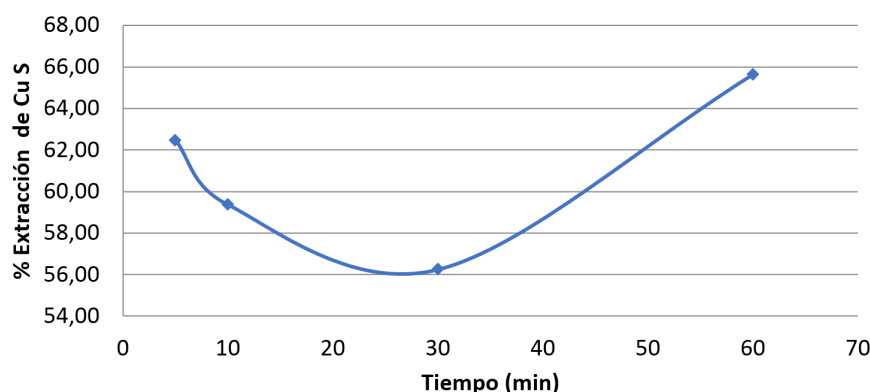


Figura 7. Extracciones de cobre soluble en el tiempo utilizando líquido iónico como lixivante

Prueba de lixiviación agitada utilizando líquido iónico

La gráfica de extracción de líquido iónico presenta una irregularidad en su extracción cayendo de 51,72% a 49,14% de Cu T, esto debido posiblemente a la falta de adición de oxígeno en el sistema, el cual fue consumido durante la reacción del proceso.

CONCLUSIONES

1. El análisis químico entregado indica una solubilidad del 83% aproximadamente y una ley de cobre total de 0,58 la cual es baja. El análisis mineralógico indica que en su mayoría el mineral es un sulfuro con sólo un 30% de óxidos. Mediante estos datos obtenidos se decide procesar el material por la vía hidrometalúrgica, con un proceso de lixiviación en pilas, columnas a nivel laboratorio, ya que la gran mayoría de los sulfuros presentes (55%) son secundarios por lo que pueden ser lixiviados, aunque a una menor cinética de extracción de cobre.
2. La baja ley de este material obliga a descartar otro proceso hidrometalúrgico, como por ejemplo una lixiviación agitada, ya que el gasto energético y económico sería muy elevado. Este mineral de baja ley no compensa estos gastos.
3. Debido a la alta solubilidad del mineral (83%) y su baja ley (0,58 CuT), se descarta procesos de concentración de minerales.
4. Las pruebas de agitación indican que es posible tratar el mineral por la vía hidrometalúrgica, debido a las extracciones de cobre obtenidas, llegando a una extracción de cobre soluble del 60,8%.
5. El hierro total presente no causaría inconvenientes en caso de trabajar el mineral por método de lixiviación, ya que el pH sería inferior a 2 al trabajar en un medio ácido y no correría el riesgo de la precipitación del hierro causando impermeabilidad a la pila.
6. Las condiciones para un mejor pre-tratamiento los mejores parámetros de operación son un tiempo de curado de 48 horas y dosificaciones de 60 kg de ácido/t de mineral y 65 kg de agua/t de mineral, donde se obtiene una extracción de cobre total de 55% y un consumo de ácido de 46,94% ácido/ t mx tratado
7. Las mayores extracciones de cobre se obtienen en la columna 3, con una tasa de riego de 6 L/h/m² y 10 g/L de ácido en la solución lixivante.
8. No es viable la utilización de un líquido iónico para un mineral de baja ley como éste, debido al alto coste que tiene el líquido iónico. (2,5 L cuestan \$2.500.00 aproximadamente).

AGRADECIMENTOS

Se agradece al Académico Norman Toro por contribuir tanto en guiar, así como también financieramente 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

COCHILCO. 2020. *Proyección agua minería del cobre 2019-2030*. Santiago de Chile.

- Conejeros, V., Pérez, K., Jeldres, R. I., Castillo, J., Hernández, P., & Toro, N. 2020. "Novel treatment for mixed copper ores: Leaching ammonia - Precipitation - Flotation (L.A.P.F)". *Minerals Engineering*, 149(July 2019): 106242, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106242>.
- Saldaña, M., González, J., Jeldres, R. I., Villegas, Á., Castillo, J., Quezada, G., & Toro, N. 2019. A stochastic model approach for copper heap leaching through bayesian networks. *Metals*, 9(11), 1-15. <https://doi.org/10.3390/met9111198>.
- Toro, N., Briceño, W., Pérez, K., Cánovas, M., Trigueros, E., Sepúlveda, R., & Hernández, P. 2019. Leaching of pure chalcocite in a chloride media using sea water and waste water. *Metals*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/met9070780>.
- Toro, N., Herrera, N., Castillo, J., Torres, C. M., & Sepúlveda, R. 2018. Initial investigation into the leaching of manganese from nodules at room temperature with the use of sulfuric acid and the addition of foundry slag-Part I. *Minerals*, 8(12), <https://doi.org/10.3390/min8120565>.
- Toro, N., Pérez, K., Saldaña, M., Jeldres, R. I., Jeldres, M., & Cánovas, M. 2019. Dissolution of pure chalcopyrite with manganese nodules and waste water. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 798-805, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.020>
- Torres, D., Ayala, L., Jeldres, R. I., Cerecedo-sáenz, E., Salinas-rodíguez, E., Robles, P., & Toro, N. 2020. Leaching chalcopyrite with high MnO₂ and chloride concentrations. *Metals*, 10(1), <https://doi.org/10.3390/met10010107>.
- Torres, D., Ayala, L., Saldaña, M., Cánovas, M., Nieto, S., Castillo, J., Robles, P., & Toro, N. 2019. Leaching manganese nodules in an acid medium and room temperature comparing the use of different fe reducing agents. *Metals*, 9(12), 1-12. <https://doi.org/10.3390/met9121316>.

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/)