

Evaluacion del uso de peroxido de hidrogeno y surfactante cationico ctab en la lixiviación de un concentrado de cobre en medio ácido

Evaluation of the use of hydrogen peroxide and cationic ctab surfactant in the leaching of a concentrate of copper in acid medium

Cristian Vargas, Catalina Bustamante y Patricio Navarro

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Universidad de Santiago de Chile

cristian.vargas@usach.cl

Resumen

En el presente trabajo se evaluaron diferentes variables con el objeto de determinar las mejores condiciones para la lixiviación de un concentrado de cobre con peróxido de hidrógeno en medio ácido a temperatura ambiente. Una vez encontradas las mejores condiciones de lixiviación se procede a realizar ensayos con la adición del surfactante catiónico CTAB. Los parámetros evaluados para determinar las mejores condiciones de lixiviación fueron la concentración de peróxido de hidrógeno, concentración de ácido sulfúrico, granulometría y razón sólido-líquido. Y las concentraciones de CTAB escogidas para la realización de las pruebas son: bajo la concentración crítica micelar (CCM), igual a la CCM, 4 veces la CCM y 10 veces la CCM. De acuerdo a lo anterior, las mejores condiciones determinadas fueron: concentración de peróxido de hidrógeno 2,8 M, concentración de ácido sulfúrico 2,5 M, tamaño de partícula menor a 38 μm y razón sólido-líquido 1/50. Con estas condiciones se alcanzó una recuperación de cobre de un 43,6% a temperatura ambiente. Esta recuperación aumenta al adicionar CTAB llegando a un máximo de un 64,7%.

Palabras Clave: Cobre, concentrado, lixiviación ácida, peróxido de hidrógeno, CTAB.

Abstract

In the present work, different variables were evaluated in order to determine the best conditions for the leaching of a copper concentrate with hydrogen peroxide in acid medium at room temperature. Once the best leaching conditions are found, tests are carried out with the addition of the cationic surfactant CTAB. The parameters evaluated to determine the best leaching conditions were the concentration of hydrogen peroxide, sulfuric acid concentration, grain size and solid-liquid ratio. And the CTAB concentrations chosen for the tests are: under the micellar critical concentration (CCM), equal to CCM, 4 times CCM and 10 times CCM. According to the above, the best conditions determined were: concentration of hydrogen peroxide 2.8 M, concentration of sulfuric acid 2.5 M, particle size less than 38 μm and solid-liquid ratio 1/50. Under these conditions a copper recovery of 43.6% was achieved at room temperature. This recovery increases when adding CTAB reaching a maximum of 64.7%.

Keywords: Copper, concentrate, acid leaching, hydrogen peroxide, CTAB.

Introducción

La calcopirita (CuFeS_2) es el mineral más importante de los minerales sulfurados de cobre y representa aproximadamente el 70 % de las reservas mundiales de cobre (Fuentes-Aceituno *et al.*, 2008). Actualmente, el cobre presente en la calcopirita se extrae principalmente por procesos pirometalúrgicos (Padilla y Rodriguez, 2003), ya que en medio ácido y en condiciones atmosféricas, ha mostrado una pobre disolución que, además disminuye con el paso del tiempo (Eghbalnia y Dixon, 2011), pero estos generan preocupaciones ambientales debido a la formación de SO_2 gaseoso y partículas submicrónicas.

El desarrollo de un proceso hidrometalúrgico menos agresivo para la extracción de cobre constituiría una posible solución a estos problemas. Por esa razón, los estudios del comportamiento de disolución de calcopirita son de gran importancia tecnológica. Sin embargo, las rutas de lixiviación oxidativa propuestos para la calcopirita, generalmente a altas presiones y temperaturas, no se han aplicado a escala industrial, debido a los elevados costos requeridos para igualar las altas extracciones de cobre obtenidas en los procesos térmicos. Estas condiciones extremas de lixiviación se requieren debido a la naturaleza refractaria de la calcopirita.

En este sentido, diversos estudios han coincidido que lo anterior se debe a la formación de una capa pasivante impermeable alrededor de la calcopirita, la cual impide que los reactivos puedan reaccionar con el mineral. Acerca de este fenómeno existen tres hipótesis principales para explicar la estructura de la capa impermeable. Una teoría sugiere la formación de una capa de azufre, la cual impide la difusión de los reactantes hacia el núcleo de la calcopirita. Otra sugiere la formación de una capa de polisulfuros ricos en cobre, desarrollándose sobre la superficie resultando en un sólido que no cambia durante la lixiviación.

En la mayoría de los procesos hidrometalúrgicos propuestos, se necesitan oxidantes fuertes, con frecuencia el ión férrico en medio cloruro o sulfato, y temperaturas elevadas, para lograr altas extracciones de cobre (Córdoba *et al.*, 2008). El peróxido de hidrógeno también es un buen agente oxidante con un potencial redox de 1,77 V en medio ácido. El peróxido de hidrógeno se ha utilizado como un agente de lixiviación para minerales de uranio (Eary y Cathles, 1983) y su uso se ha estudiado

con un concentrado de sulfuros de zinc-plomo, así como con concentrados de pirita (Antonijevic *et al.*, 1997) y esfalerita (Balaz y Ebert, 1991). Algunas investigaciones se han llevado a cabo para evaluar la habilidad del peróxido de hidrógeno en la disolución de calcopirita en medio ácido (Adebayo *et al.*, 2003; Antonijevic *et al.*, 2004). Estos estudios estudiaron la cinética de disolución en un amplio rango de condiciones experimentales, concluyendo que el proceso disolutivo se ve favorecido con el incremento en la cantidad de peróxido y concentración de ácido; pero el proceso disolutivo se ve obstaculizado debido a la descomposición del peróxido de hidrógeno a causa de la presencia de cationes de cobre y hierro, y también por descomposición térmica.

En este sentido, el presente trabajo pretende evaluar la disolución de cobre desde un concentrado calcopirítico utilizando un agente oxidante energético como es el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), a diferencia de muchos artículos y trabajos anteriores en donde se ha utilizado el ión férrico para este efecto. Además, dada la experiencia que se ha logrado en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile, en el uso de surfactantes en diversos procesos de la metalurgia extractiva, se propone asistir la lixiviación con la presencia del surfactante catiónico CTAB.

Procedimiento experimental

En este estudio se trabajó con muestras de un concentrado de cobre proveniente de una faena minera, ácido sulfúrico de 98 % de pureza y peróxido de hidrógeno al 30 %. El concentrado fue recepcionado en forma de pulpa por lo que se dejó secar en una mufla de secado a 90 °C por 3 días. Una vez seco se disgrgó. Para asegurar la homogeneidad de la muestra, se roleó 10 veces por punta cada vez que fue necesario subdividirla. De esta manera se tomaron muestras representativas que permitieron la caracterización física y química del concentrado, así mismo se permitió obtener un concentrado homogéneo para las posteriores pruebas de lixiviación.

La caracterización del concentrado contempló: análisis granulométrico, determinación de gravedad específica, análisis químico convencional, difracción y fluorescencia de rayos X.

Las pruebas de lixiviación por agitación magnética se realizaron en un reactor de vidrio de 600 ml

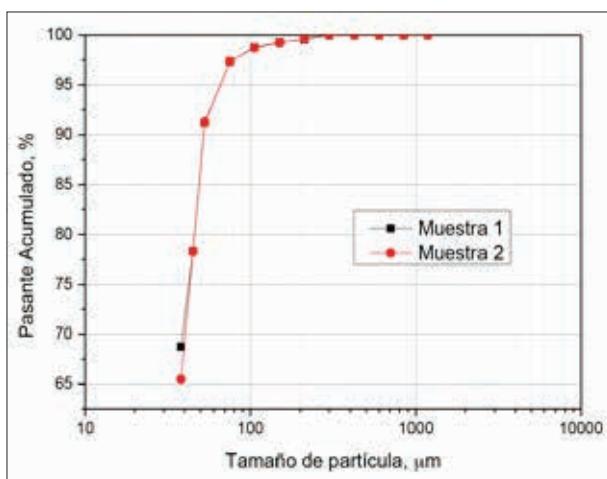


Figura 1. Análisis granulométrico del concentrado.

de capacidad y se utilizó un volumen de solución constante de 250 ml. Las pruebas de lixiviación se realizaron a temperatura ambiente (aprox. 27°C), durante 5 horas, con el objetivo de encontrar las mejores condiciones de lixiviación.

Se tomaron muestras de la solución acuosa cada 15 y 30 min, 1, 2, 3, 4 y 5 horas las que se analizaron por su contenido en Cu^{2+} , Fe^{2+} y Fe total. Los ensayos de lixiviación se realizaron bajo los siguientes parámetros:

- Variable concentración de peróxido de hidrógeno: se realizaron 4 pruebas de lixiviación donde se utilizaron las siguientes concentraciones de peróxido: 0,7; 1,4; 2,1 y 2,8 M. Donde se mantuvieron constantes las siguientes condiciones: 1,5 M de ácido sulfúrico, granulometría natural del concentrado y razón S/L: 1/25.
- Variable concentración de ácido sulfúrico: se realizaron 4 pruebas de lixiviación donde se utilizaron las siguientes concentraciones de ácido: 0,5; 1,0; 1,5 y 2,5 M. Donde se mantuvieron constantes las siguientes condiciones: 2,1 M de peróxido de hidrógeno, granulometría natural del concentrado y razón S/L: 1/25.
- Variable granulometría: se realizaron 4 pruebas de lixiviación donde se utilizaron los siguientes tamaños de partículas: entre 106 y 150 μm , entre 53 y 75 μm , entre 38 y 45 μm y la granulometría natural del concentrado. Donde se mantuvieron constantes las siguientes condiciones: 2,1 M de peróxido de hidrógeno, 1,5 M de ácido sulfúrico y razón S/L: 1/25.
- Variable razón S/L: se realizaron 4 pruebas de

Tabla 1. Resultados gravedad específica.

Variables	Muestra 1, g	Muestra 2, g
M	48,746	56,301
B	34,107	34,114
A	84,151	84,321
P	95,050	100,845
Gravedad específica, g/cm^3	3,914	3,918
Promedio, g/cm^3	3,916	

El análisis indicó que el concentrado posee una gravedad específica promedio de 3,9 g/cm^3 .

lixiviación donde se variaron las masas para conseguir las siguientes razones: 1/25, 1/50, 1/16,7 y 1/12,5. Donde se mantuvieron constantes las siguientes condiciones: 2,1 M de peróxido de hidrógeno, 1,5 M de ácido sulfúrico y la granulometría natural del concentrado.

Una vez obtenidas las mejores condiciones de recuperación de cobre para cada una de las variables se procedió a la realización de 5 pruebas de lixiviación: sin surfactante, 0,5 veces la concentración crítica micelar (CCM), igual a la CCM, 4 veces la CCM y 10 veces la CCM. Para ello previamente fue necesario determinar la CCM, se utilizó el método del conductivímetro, el cual consiste en medir la conductividad de la solución versus la concentración del aditivo, la cual tiene un comportamiento directamente proporcional a medida que aumente la concentración, hasta un punto donde dicho incremento cambia en su pendiente, correspondiente a la CCM.

Resultados y discusiones

Caracterización del concentrado.

Análisis granulométrico.

En la Figura 1 se presenta la curva granulométrica del concentrado en estudio. Este análisis se realizó en duplicado para evaluar la reproducibilidad de los resultados.

El análisis granulométrico indicó que el concentrado en estudio posee un P_{80} de 46,06 μm , donde el 65,5% corresponde a un tamaño inferior a 38 μm .

Tabla 2. Resultado de análisis químico convencional del concentrado.

Cu total (%)	Cu sol (%)	Fe total (%)
33,4	0,84	20,7

Tabla 3
Resultado de análisis de difracción de rayos X.

Especies presentes	Composición	% Peso
Calcopirita	CuFeS ₂	67,03
Kyanita	Al ₂ SiO ₅	13,52
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	5,5
Oxido de Mo-Na	Na _{1,3} Mo ₂ O ₄	13,95

Con esta información se puede decir que el concentrado posee una granulometría fina, con un 66% bajo la malla 400 ASTM (38 µm).

Gravedad específica.

En la tabla 1 se muestran los valores que permitieron calcular la gravedad específica mediante picnometría.

El análisis indicó que el concentrado posee una gravedad específica promedio de 3,9 g/cm³.

Análisis químico convencional.

En la tabla 2 se muestra el resultado del análisis químico convencional, el cual indicó que el concentrado posee 33,4% de cobre total, 0,84% de cobre y 20,7% de hierro total.

Difracción y Fluorescencia de Rayos X.

En la tabla 3 se presentan los compuestos identificados en el análisis de difracción de rayos X realizado a la muestra de concentrado.

La presencia de calcopirita y bornita se respalda por el alto contenido de cobre, fierro y azufre encontrado tanto en el análisis químico convencional como en la fluorescencia de rayos X posterior.

En la tabla 4 se presentan los elementos identificados en el análisis de fluorescencia de rayos X. Es posible apreciar que existe una coherencia entre los resultados obtenidos por el análisis químico convencional y por la fluorescencia de rayos X, de-

Tabla 4. Resultado de análisis de fluorescencia de rayos X.

Elemento	Cantidad (%)	Elemento	Cantidad (%)
Cu	34,99	Ca	0,49
Fe	21,15	Mg	0,48
S	17,3	Zn	0,23
O	10	Ti	0,14
Si	8,12	As	0,13
Al	3,38	Pb	0,42
Na	1,46	P	0,03
Mo	1,3	Sr	0,01
K	0,74	Zr	0,006

bido a que tanto los contenidos de cobre y fierro son similares para ambos casos.

Determinación de la concentración crítica micelar (CCM).

La Figura 2 muestra los resultados de conductividad versus concentración de surfactante, para la determinación de la concentración crítica micelar del CTAB en las condiciones de lixiviación. De la literatura y trabajos previos en el uso de surfactantes, se ha determinado que la CCM es un parámetro muy importante y referencial para evaluar el efecto de los aditivos surfactantes.

En esta figura es posible apreciar una curva con dos pendientes que son atribuidas a dos rectas, que a su vez representan el comportamiento antes y después de la formación de las micelas en solución acuosa. La recta que representa el comportamiento antes de la CCM posee una pendiente de 77,5; mayor a la pendiente de la recta luego de la formación de micelas que es 20,9.

Al igualar ambas ecuaciones de la recta, se obtiene el valor donde se produce el cambio de pendiente, que corresponde al valor deseado. De esto resulta que el valor de la concentración crítica micelar es 1,027 mM.

Ensayos de Lixiviación.

El objetivo de la realización de estas pruebas fue determinar las mejores condiciones de lixiviación para luego realizar pruebas de lixiviación con el surfactante y así determinar el efecto de la adición de CTAB en la recuperación de cobre.

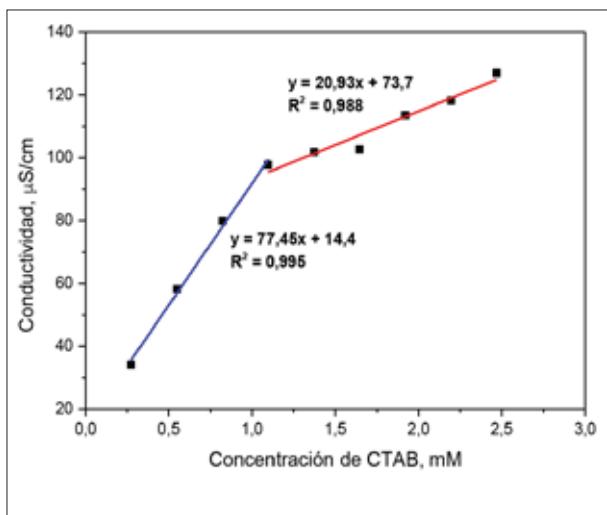


Figura 2. Determinación de la CCM.

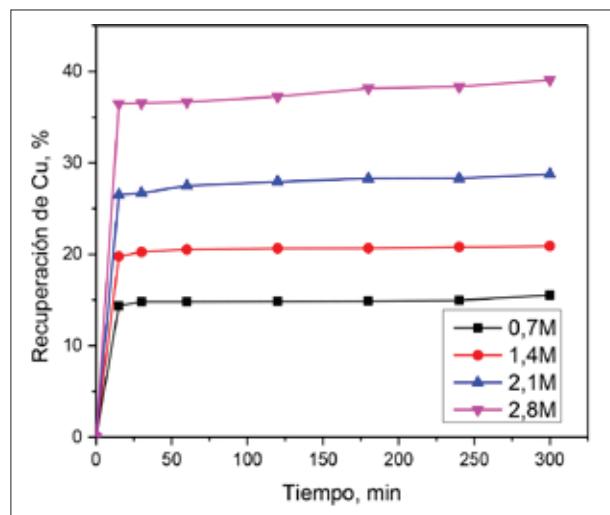


Figura 3. Efecto de la concentración de peróxido de hidrógeno en la recuperación de cobre.

Variación de la concentración de peróxido de hidrógeno.

El peróxido de hidrógeno actúa como agente oxidante; en la Figura 3 se presentan las recuperaciones de cobre obtenidas a diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno, manteniendo constantes: concentración de ácido sulfúrico en 1,5 M, granulometría natural del concentrado, temperatura ambiente y la razón S/L en 1/25, correspondiente a 10 gramos de concentrado de cobre en 250 ml de solución.

Se observa que la recuperación de cobre aumenta a medida que incrementa la concentración de peróxido. La recuperación de cobre a 0,7 M alcanza un 15,52%, a 1,4 M un 20,9%, a 2,1 M un 28,75% y finalmente a 2,8 M un 39,08%. El mayor incremento

en la recuperación se produce al aumentar la concentración desde los 2,1 M a los 2,8 M.

El peróxido de hidrógeno también tiene efecto en la evolución del potencial electroquímico y el contenido de ión férrico en el tiempo. Este comportamiento se observa en la tabla 5. Para todos los casos se puede observar que al inicio de la lixiviación se tiene el mayor valor de potencial, pero este comienza a descender a medida que transcurre la lixiviación, esto puede ser causado por el consumo del peróxido de hidrógeno que ocurre durante la lixiviación. Luego de 4 horas de lixiviación el potencial comienza a elevarse nuevamente, lo cual se debe al aumento en la concentración de ión férrico en la solución. Esto se debe a que el concentrado contiene una cantidad importante de Fe, que al disolverse genera Fe^{2+} y este al oxidarse produce Fe^{3+} .

Tabla 5. Variación del potencial redox y concentración de Fe^{3+}

Temperatura, ($^{\circ}\text{C}$)	25	40	50	60	25	40	50	60
Tiempo, (min)	Potencial Redox, (mV)				Concentración de Fe^{3+} , (g/l)			
0	683	691	699	709	0,00	0,00	0,00	0,00
15	-	-	-	-	1,10	1,34	1,58	1,60
30	-	-	-	-	1,33	1,57	1,67	1,74
60	675	685	693	282	1,48	1,70	1,72	1,92
120	668	680	689	342	1,63	1,85	1,88	2,20
180	665	680	685	402	1,77	1,93	1,98	2,40
240	662	678	685	462	1,83	2,00	2,20	2,60
300	665	681	687	522	1,86	2,09	2,35	2,66

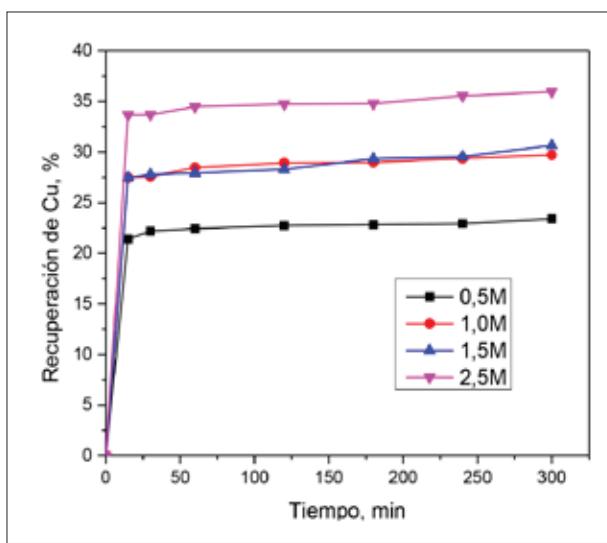


Figura 4. Efecto de la concentración de ácido sulfúrico en la recuperación de cobre.

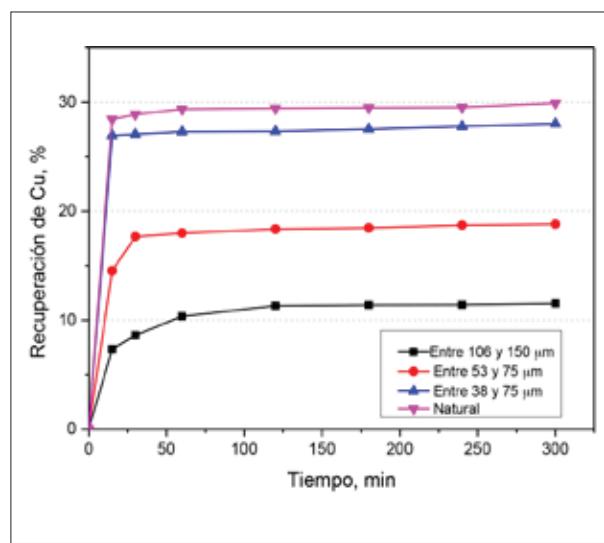


Figura 5. Efecto del tamaño de partícula en la recuperación de cobre

El comportamiento descrito anteriormente también se observó para las otras variables en estudio.

Variación de la concentración de ácido sulfúrico.

En la Figura 4 se presentan las recuperaciones de cobre obtenidas a diferentes concentraciones de ácido sulfúrico, manteniendo constantes: concentración de peróxido de hidrógeno en 2,1 M, granulometría natural del concentrado, temperatura ambiente y la razón S/L de 1/25.

La mayor recuperación de cobre se establece a la mayor concentración de ácido sulfúrico, a 2,5 M se alcanza una recuperación de un 36% de cobre. Para 0,5 M se obtiene una recuperación de un 23,4%, para 1,0 M un 29,7% y para 1,5 M un 30,7%, siendo estas dos últimas prácticamente iguales.

Variación del tamaño de partícula.

Con la ayuda de un set de tamices y ro-tap fue posible separar el tamaño de partículas del concentrado en estudio. Las condiciones de trabajo fueron: concentración de peróxido de hidrógeno de 2,1 M, concentración de ácido sulfúrico de 1,5 M, razón S/L de 1/25 y temperatura ambiente. En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para la recuperación de cobre.

La disolución de cobre aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Para tamaños desde 106 a

150 μm la recuperación de cobre alcanza sólo un 11,5%, la más baja obtenida dentro de todas las variables analizadas; desde 53 a 75 μm se obtiene una recuperación de 18,8%, entre 38 y 45 μm un 28% y finalmente para la granulometría natural del concentrado se logra un 29,9%. La última es la más alta debido al alto contenido de partículas finas, el 66% poseen un tamaño inferior a 38 μm . Por ello las recuperaciones son tan similares. Por esta razón se decide entonces trabajar posteriormente en presencia de CTAB con un tamaño de partícula menor a 38 μm .

Variación de la razón S/L.

Para la variación de la razón S/L se utilizaron diferentes masas de concentrado, manteniendo constante el volumen de solución correspondiente a 250 ml. Las masas utilizadas fueron: 5 g correspondiente a una razón 1/50, 10 g equivalente a la razón 1/25, 15 g correspondiente a la razón 1/17 y 20 g que equivale a 1/12. Se trabajó con granulometría natural; 2,1 M de H_2O_2 , 1,5M de H_2SO_4 y a temperatura ambiente. En la Figura 6 se presentan los resultados de recuperación de cobre obtenidas a diferentes razones S/L.

La recuperación de cobre aumenta considerablemente al disminuir la cantidad de masa utilizada, para la razón 1/12 se logra una recuperación de 14,9%, para 1/175 se logra un 21,7%, para 1/25 un 29,5%, y finalmente para 1/50 se logra un máximo de 38,3%.

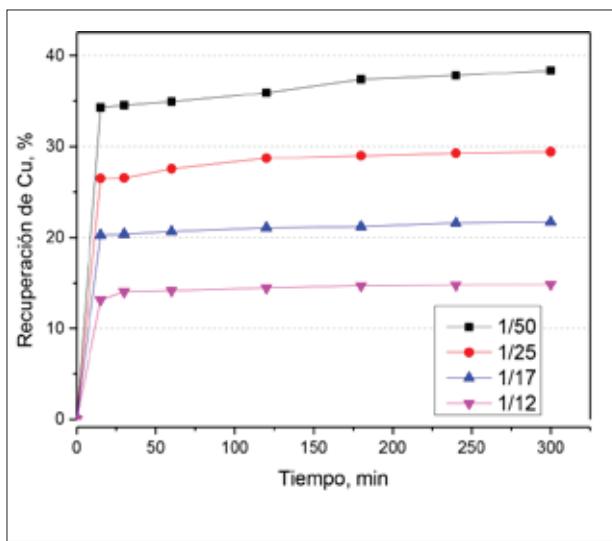


Figura 6. Efecto de la razón S/L en la recuperación de cobre.

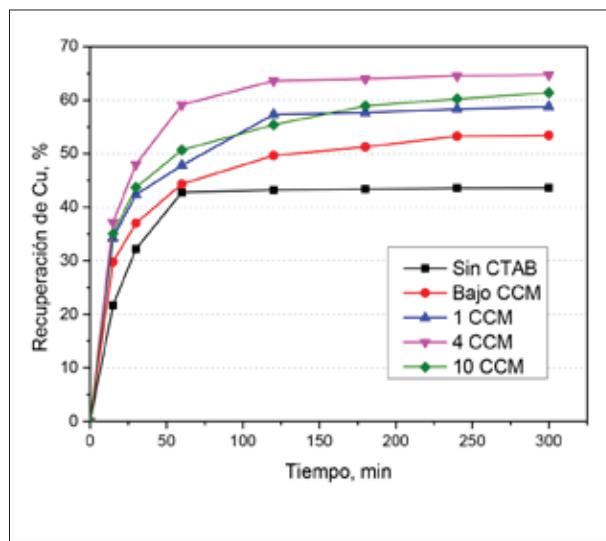


Figura 7. Efecto de la concentración de CTAB en la recuperación de cobre.

Variación de la concentración de CTAB.

Con las mejores condiciones para cada una de las variables anteriores correspondientes a: concentración de peróxido de hidrógeno de 2,8 M, concentración de ácido sulfúrico de 2,5 M, tamaño de partícula menor a 38 μm y razón S/L 1/50; se procedió a la realización de una serie de pruebas con y sin aditivo surfactante para visualizar el efecto del CTAB.

Para ello se utilizaron las concentraciones: 0,5 CCM correspondiente a 0,514 mM, igual a la CCM que es 1,027 mM, 4 veces la CCM que es 4,108 mM y 10 veces la CCM que equivalen a 10,27 mM. En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos para la recuperación de cobre a las diferentes concentraciones de CTAB utilizadas.

Los resultados muestran un significativo aumento en la recuperación de cobre al agregar a la solución un surfactante catiónico como el CTAB. El que el surfactante en cuestión sea catiónico quiere decir que su parte polar es de polaridad positiva (N^+) y que libera un contraion negativo (Br^-). Esta polaridad positiva podría interactuar con las partículas de concentrado adsorbiéndose en la superficie produciendo un cambio en las características fisicoquímicas lo que favorecería de alguna forma la disolución del cobre.

En la búsqueda de alguna explicación al efecto anterior, se encontró que el CTAB disminuye la

tensión superficial de la solución lixiviante lo que permitiría aumentar la hidrofilicidad de las especies sulfuradas de cobre presentes en el concentrado, aumentando la mojabilidad. Los resultados de la tensión superficial se muestran a continuación en la tabla 6.

De la tabla se observa que el CTAB disminuye significativamente la tensión superficial de la solución lixiviante pasando de 57,9 (mN/m) a 33,7 (mN/m); y a medida que se aumenta el contenido de CTAB esta sigue disminuyendo, aunque no con la misma magnitud, pero esta disminución tiene un límite y este se encuentra al pasar desde 4 a 10 veces el valor de la CCM. Al disminuir la tensión superficial de la solución se puede inferir que se mejora el contacto partícula-solución y por lo tanto aumenta la mojabilidad, lo que hace aumentar la disolución de cobre.

Estos fenómenos nos permiten entender los valores de recuperaciones obtenidos. Sin CTAB se alcan-

Tabla 6. Tensión superficial de la solución lixiviante.

Muestra	γ (mN/m)
Sin CTAB	57,9
Bajo la CCM	33,7
Igual a CCM	32,7
4 veces la CCM	31,1
10 veces la CCM	32,2

za una recuperación de 43,6%, pero se incrementa considerablemente al agregar una pequeña cantidad por debajo de la CCM donde se obtiene un 53,4%; al utilizar la CCM se obtiene un 58,3%; al utilizar una cantidad equivalente a 4 veces la CCM se llega a un máximo de 64,7%, que coincide con la menor tensión superficial medida. Finalmente, al seguir aumentando la cantidad utilizada hasta 10 veces la CCM la recuperación disminuye hasta un 61,4%, valor que permanece sobre el obtenido a la concentración de CTAB igual a la CCM. Por lo tanto, la adición de CTAB aumenta significativamente la recuperación de cobre.

Conclusiones

- El concentrado de cobre utilizado es calcopirítico, de alta ley de cobre y de granulometría fina.
- La recuperación de cobre aumenta considerablemente al aumentar la concentración de peróxido de hidrógeno que actúa como agente oxidante, la recuperación de cobre luego de 5 horas de lixiviación alcanza un 39% a 2,8 M. Esta variable resulta la más importante si se desea aumentar la recuperación.
- La recuperación de cobre aumenta al aumentar la concentración de ácido sulfúrico, alcanzando un máximo de un 36% a 2,5 M.

- La recuperación de cobre aumenta al disminuir el tamaño de partícula.

- La recuperación de cobre aumenta al disminuir la razón S/L, alcanzando un máximo de un 38% con una razón de 1/50.

- Las mejores condiciones para la lixiviación del concentrado en medio ácido con peróxido de hidrógeno fueron: concentración de peróxido de hidrógeno de 2,8 M, concentración de ácido sulfúrico de 2,5 M, tamaño de partícula menor a 38 μm y razón S/L de 1/50, alcanzando una recuperación de un 44%.

- La adición de CTAB aumenta considerablemente la recuperación de cobre, alcanzando un óptimo de un 65% a una concentración de CTAB de 4,108 mM, por sobre este valor la recuperación de cobre disminuye.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad de Santiago de Chile a través de la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICYT), por el patrocinio otorgado a través del proyecto 05-1414ND.

Referencias

Adebayo A, Ipinmoroti K, Ajayi O. 2003. Dissolution kinetics of chalcopyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid medium. *Chem Biochem Eng Q* 17: 213-218.

Antonijevic M, Diminrijevic M, Jankovic Z. 1997. Leaching of pyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid. *Hydrometallurgy* 46: 71-83.

Antonijevic M, Jankovic Z, Dimitrijevic M. 2004. Kinetics of chalcopyrite dissolution by hydrogen peroxide in sulphuric acid. *Hydrometallurgy* 71: 329-334.

Balaz P, Ebert I. 1991. Oxidative leaching of mechanically activated sphalerite. *Hydrometallurgy* 27: 141-150.

Córdoba E, Muñoz J, Blásquez M, González F, Ballester A. 2008. Leaching of chalcopyrite with ferric ion part I: general aspects. *Hydrometallurgy* 93: 81-87.

Eary L, Cathles L. 1983. A kinetic model of UO₂ dissolution in acid, H₂O₂ solutions that includes uranium peroxide hydrate precipitation. *Metallurgical and Materials Transactions B* 14B: 325-334.

Eghbalnia M, Dixon DG. 2011. Electrochemical study of leached chalcopyrite using solid paraffin-based carbon paste electrode. *Hydrometallurgy* 110: 1-12.

Fuentes-Aceituno JC, Lapidus-Lavine GT, González-Martínez I. 2008. Electrochemical characterization of the solid products formed in the electro-as-

sisted reduction of chalcopyrite. *Hydrometallurgy* Eds. CA Young, PR Taylor, CG Anderson, Y Choi. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, Colorado, USA.

Padilla R, Rodriguez M, Ruiz MC. 2003. Sulfidation of chalcopyrite with elemental sulfur. *Metallurgical and Materials Transactions B* 34B: 15-23.