

Cinética de lixiviación de calcopirita en medio acuoso de etilenglicol-peróxido de hidrógeno-ácido sulfúrico

Kinetics of chalcopyrite leaching in the aqueous medium of ethylene glycol-hydrogen peroxide-sulfuric acid

A. Ruiz-Sánchez ^{a*}, G. T. Lapidus ^b

^a Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. México. Carretera Veracruz-Córdoba Km 12. C.P. 94290. Boca del Río, Ver.
^b Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Ciudad de México. C.P. 09340.

Resumen

Se ha comprobado que la adición de etilenglicol (EG) en una solución de lixiviación de ácido sulfúrico-peróxido de hidrógeno potencializa la disolución de cobre a partir de calcopirita. Por lo tanto, en este trabajo se evaluó la cinética de la disolución de cobre a partir de calcopirita en el medio acuoso de 0.7M ácido sulfúrico-1M peróxido de hidrógeno-3.5M EG. La lixiviación de cobre a partir de calcopirita se ajustó a un modelo de partícula decreciente con control por reacción química, bajo una cinética de pseudo-primer orden y una energía de activación de 66.5 kJ/mol. La temperatura tuvo un efecto positivo en la lixiviación de cobre en el intervalo de 10-30°C. No obstante, la lixiviación de cobre se afectó de manera negativa a las temperaturas de 40 y 50°C, debido a la descomposición de peróxido de hidrógeno por efecto térmico.

Palabras Clave:

Lixiviación de calcopirita, peróxido de hidrógeno, etilenglicol, ácido sulfúrico

Abstract

It has been found that the addition of ethylene glycol (EG) in a sulfuric acid-hydrogen peroxide leaching solution enhances the dissolution of copper from chalcopyrite. Therefore, in this work the dissolution kinetics of copper from chalcopyrite in the aqueous medium of 0.7M sulfuric acid-1M hydrogen peroxide-3.5M EG was evaluated. Copper leaching from chalcopyrite was fitted to a decreasing particle model controlled by chemical reaction, under pseudo-first order kinetics and an activation energy of 66.5 kJ/mol. Temperature had a positive effect on copper leaching in the range of 10-30°C. However, copper leaching was negatively affected at temperatures of 40 and 50°C, due to the decomposition of hydrogen peroxide due to thermal effect.

Keywords:

Chalcopyrite leaching, hydrogen peroxide, ethylene glycol, sulfuric acid

1. Introducción

Numerosas publicaciones (Mahajan et al. 2007; Solís-Marcial y Lapidus, 2013; Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2017; Ghomi et al., 2019; Ruiz-Sánchez et al., 2020; Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2022a y b) han estudiado la mejora en el proceso de disolución de la calcopirita en el medio de ácido sulfúrico-peróxido de hidrógeno-compuestos orgánicos. Entre los diferentes compuestos orgánicos el etilenglicol (EG) es el candidato más adecuado porque su alto punto de ebullición (197.6°C, aproximadamente) otorga a los procesos metalúrgicos la flexibilidad de operar en condiciones de temperatura (20-50°C) y presión atmosférica (Solís y Lapidus, 2013, 2014; Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2017). Investigaciones recientes han estudiado de manera sistemática a la solución de

lixiviación de ácido sulfúrico-peróxido de hidrógeno- etilenglicol en el intervalo de 0.007M-0.7M de ácido sulfúrico, 0.1M-3.5M EG y 0.25M-3M H₂O₂, respectivamente (Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2017; Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2022a y b). Independiente de la concentración de EG y peróxido de hidrógeno, en alta (0.7M) concentración de ácido sulfúrico el EG desempeña dos funciones importantes, en primer lugar, inhibe la descomposición de peróxido de hidrógeno como resultado de la reacción de dismutación catalizada por la calcopirita misma (Nicol, 2020); y, en segundo lugar, por su efecto retardante en descomposición de peróxido de hidrógeno como consecuencia de las reacciones Fenton y tipo Fenton, establecidas al reaccionar el cobre y hierro lixiviado con el peróxido de hidrógeno (Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2022b). En cambio, a bajas

*Autor para la correspondencia: angel.rs@bdelrio.tecnm.mx

Correo electrónico: angel.rs@bdelrio.tecnm.mx (Ángel Ruiz-Sánchez), gttl_2000@yahoo.com (Gretchen Terri Lapidus- Lavine).

(0.007M) concentraciones de ácido sulfúrico se ha encontrado que las reacciones Fenton y tipo Fenton predominan, favoreciendo de esta manera la rápida descomposición de peróxido de hidrógeno, lo que conlleva a una baja disolución de calcopirita. Aunado a esta problemática, la baja concentración de ácido sulfúrico potencializa la mineralización (oxidación completa a dióxido de carbono y agua) del EG debido a la producción del radical Fenton (OH^*) producido en abundancia en el licor de lixiviación (Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2020a).

Los porcentajes de cobre lixiviado obtenidos en 0.007M de ácido sulfúrico muestran una meseta en un periodo relativamente temprano (alrededor de 3 horas) (Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2017), lo cual pone de manifiesto, por un lado, el rápido consumo de peróxido de hidrógeno, y, por otro lado, el consumo de EG debido a la mineralización por el radical OH^* . Este comportamiento indica que en estas condiciones experimentales no es válido realizar un estudio cinético para comprender el efecto de algunos parámetros como el tamaño de partícula, temperatura, agitación, concentración de EG y concentración de peróxido de hidrógeno, respectivamente.

Por lo antes mencionado, en este trabajo se presenta un estudio cinético del proceso de disolución de la calcopirita en el medio 0.7M ácido sulfúrico-1M peróxido de hidrógeno- 3.5M EG con 3.75 g/L de concentrado de cobre en forma de calcopirita. Estas condiciones experimentales garantizan una mínima descomposición y mineralización del peróxido de hidrógeno y EG, respectivamente.

2. Desarrollo Experimental

Caracterización de la muestra

La muestra mineral de calcopirita utilizada en este trabajo tiene su origen en la mina Kidd Creek, Ontario, Canadá. Esta muestra mineral se trituró y molió en un mortero de Ágata para su correspondiente clasificación granulométrica en un tamizador mecánico con un apilamiento de tamices, ordenados de mayor a menor tamaño de abertura (en μm). Cada una de las fracciones de mineral se recolectaron y guardaron en frascos de vidrio. Además, cada fracción de mineral fue digerida con agua regia para cuantificar su contenido metálico por Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, *Varian SpectrAA220fs*) de acuerdo a la metodología de Ruiz-Sánchez y Lapidus (2017).

Aproximadamente 0.3 g de cada fracción de mineral se molió de manera individual hasta un tamaño de partícula menor a $38\mu\text{m}$ (malla 400) utilizando un mortero de Ágata, para después compactarse firmemente en el portamuestra de un equipo DRX *D8 Advance*. El difractograma se obtuvo en el intervalo de 4° - 90° para el ángulo 2θ , a una velocidad de $8^\circ/\text{min}$. Los patrones correspondientes a cada muestra se identificaron mediante el software *Diffpac EVA 5.1*. Además, 0.2 g de mineral se colocaron en una probeta cilíndrica con resina epóxica de baja densidad. Después de 24 horas, la probeta cilíndrica fue pulida sobre lijas de carburo de silicio con tamaño de grano 200,800 y 1200 hasta la obtención de una superficie con acabado espejo, la cual fue recubierta con grafito para aumentar sus propiedades conductoras. La muestra soportada en la probeta se analizó en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) *XL30 Phillips* acoplado a un sistema de análisis por EDS.

Pruebas de lixiviación

Las soluciones utilizadas en las pruebas de lixiviación se prepararon con agua desionizada (resistividad de $18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ medida a 25°C) y los siguientes reactivos grado analítico (J.T.

Baker) cuya pureza se indica entre paréntesis: peróxido de hidrógeno (34% p/v), etilenglicol (17.88M) y ácido sulfúrico (98%).

Con base en un estudio previo se fijaron las concentraciones de 3.5M EG y 0.7M ácido sulfúrico (Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2017). Además, un análisis sobre la transferencia de masa del peróxido de hidrógeno en el licor de lixiviación hacia la superficie de la calcopirita determinó que la velocidad de agitación de 400 rpm (Ruiz-Sánchez y Lapidus, 2017) es suficiente para operar en condiciones libres de transferencia externa de masa, es decir, de peróxido de hidrógeno desde la solución de lixiviación hacia la superficie de la calcopirita.

Las pruebas de lixiviación se llevaron a cabo a una presión atmosférica (79 kPa, correspondiente a la Ciudad de México), en un reactor enchaquetado de 500 cm^3 de capacidad, marca Pyrex, equipado con una tapa abombada de tres orificios para introducir una jeringa en la toma de muestra. El reactor se acopló a un sistema de agitación mecánica regulable (Caframo BDC2002) con agitador tipo propela marina. A través de la chaqueta del reactor se mantuvo en recirculación una mezcla de etilenglicol-agua proveniente de un sistema acoplado a un baño térmico marca Haake15 con controlador de temperatura marca Haake DC 10.

Durante el proceso de lixiviación se tomaron muestras de 2 mL, las cuales se filtraron cuidadosamente usando un filtro tipo jeringa marca Whatman® con tamaño de poro igual a $0.45\mu\text{m}$. Un mililitro del volumen filtrado se diluyó en una proporción 1:10 con agua desionizada para cuantificar el cobre y hierro disueltos mediante Espectrometría de Absorción Atómica (AAS, por sus siglas en inglés).

El porcentaje de lixiviación para cobre y hierro se determinó a partir de la relación de la masa de cobre o hierro presente en la solución a un tiempo establecido, con respecto a la masa inicial de cobre o hierro presente en la densidad de pulpa (3.75 g de mineral/L). Además, en el cálculo del porcentaje de lixiviación de cobre se consideró una corrección considerando el volumen total del licor de lixiviación debido a la disminución en el volumen por la toma de muestras.

Al finalizar cada una de las pruebas de lixiviación, la suspensión se filtró cuidadosamente y los residuos sólidos se secaron al aire libre. De este residuo sólido se tomaron muestras para análisis por MEB.

Cinética de disolución de calcopirita

La cinética de lixiviación de cobre a partir de la calcopirita se llevó a cabo a 400 rpm usando la solución de lixiviación 0.7M ácido sulfúrico-1M peróxido de hidrógeno- 3.5M EG, con una densidad de pulpa constante igual a 3.75 g/L y la temperatura de 20°C . El orden de reacción con respecto a peróxido de hidrógeno variando únicamente la concentración de peróxido de hidrógeno a valores de 0.5 M, 1 M, 2 M y 3 M. Por último, la energía de activación se determinó en la solución de lixiviación antes mencionada, variando la temperatura a valores de 10, 20, 30, 40 y 50°C , respectivamente.

3. Resultados y discusión

El análisis por AAS en cada una de las muestras digeridas confirmó la presencia de cobre, hierro, plomo y zinc (Tabla 1). El porcentaje metálico de estos elementos fue similar en cada una de las muestras a diferentes tamaños de malla. Por lo tanto, a partir de esta composición elemental, el concentrado mineral puede ser considerada una muestra homogénea.

Tabla 1. Composición metálica de la muestra mineral

Malla	Abertura (µm)	%Cu	%Fe	%Zn	%Pb	
-80+100	177	149	23.57	30.17	0.77	0.55
-100+200	149	74	23.68	29.24	0.73	0.60
-200+300	74	49	23.88	29.25	0.81	0.62
-300+400	49	37	24.65	29.49	0.75	0.57
-400	<37		24.94	29.56	0.89	0.54

En la fotomicrografía de MEB correspondiente a la muestra de mineral con tamaño de malla $-100 + 200$ (Figura 1a) se identificaron tres fases minerales diferentes. La fase mineral identificada con la letra C corresponde a calcopirita (R050018, RRUFF), mientras que las fases identificadas con las letras S1 y S2 corresponden a dos tipos de ganga presente en el concentrado mineral. Las fases S1 y S2 muestran una superficie lisa y una superficie rugosa con grietas, respectivamente. A partir de los espectros (Figuras 1b y 1c) obtenidos por microanálisis EDS (por sus siglas en inglés: Energy Dispersive Spectrometer) acoplado al microscopio electrónico con colector de rayos X, se confirmó que las fases S1 y S2 corresponde a estructuras cristalinas que contienen los siguientes elementos: O, Mg, Mn, Fe, Mn, Al y Si; y por su composición química, estas estructuras corresponden a silicatos hidróxido de magnesio, aluminio y hierro, conocidas como estructuras de clinocloro (R060725, RRUFF) (Material suplementario en Ruiz-Sánchez y Lapidus 2022).

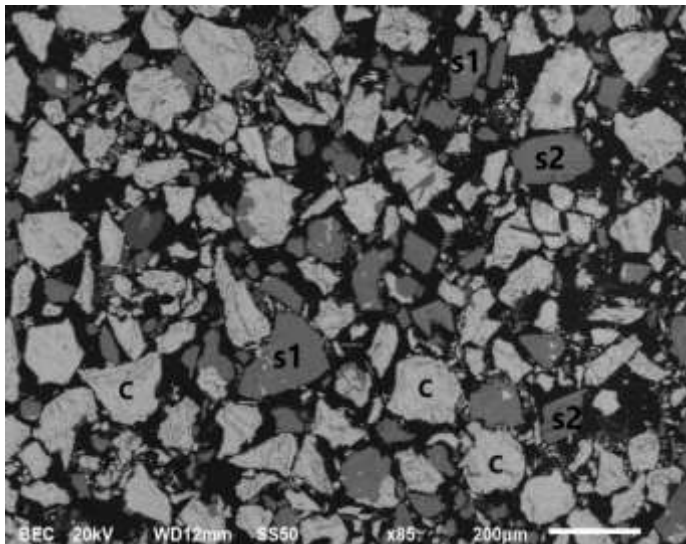


Figura 1a. Fotomicrografía de MEB correspondiente a la muestra de mineral malla $-100 + 200$ (174-149µm).

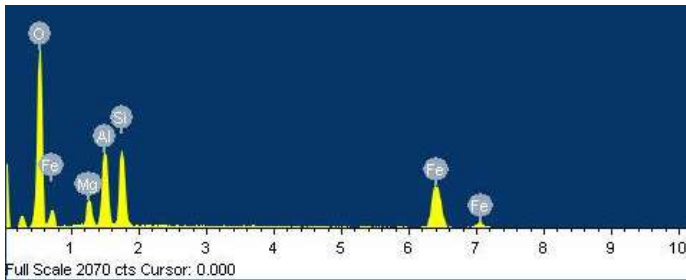


Figura 1b. Espectros EDS correspondientes a la fase S1

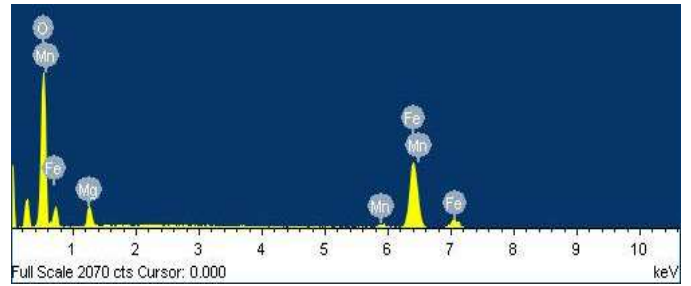


Figura 1c. Espectros EDS correspondientes a la fase S2

A partir de las fotomicrografías de MEB y los espectros EDS se demostró que la calcopirita es la única fase mineral que aporta el contenido total de cobre presente en la muestra. No se hallaron asociaciones (intercrecimiento de minerales) de calcopirita con galena o calcopirita con esfalerita, que pudieran favorecer el proceso de lixiviación a través de interacciones galvánicas (Cruz et al., 2005), por lo que el análisis cinético está libre de algún beneficio adicional diferente al aportado por el EG en este proceso.

En la Figura 2 se muestran los difractogramas correspondientes a la muestra mineral con tamaño de malla $-300 + 400$ y $-100 + 200$ (Figura 2i y 2ii), respectivamente. La similitud en los difractogramas correspondientes a dos diferentes tamaños de partícula confirma nuevamente que la muestra es homogénea. El análisis de los difractogramas (mediante el software *DiffraC EVA 5.1*) permitió identificar el patrón de difracción correspondiente a la calcopirita (letra C) y la fase de silicatos conocida como clinocloro (SH). No fue posible identificar patrones de difracción correspondientes a galena y esfalerita, probablemente porque su concentración en la muestra es menor a 5%, porcentaje límite de detección para la técnica de XRD (Melgarejo et al., 2010).

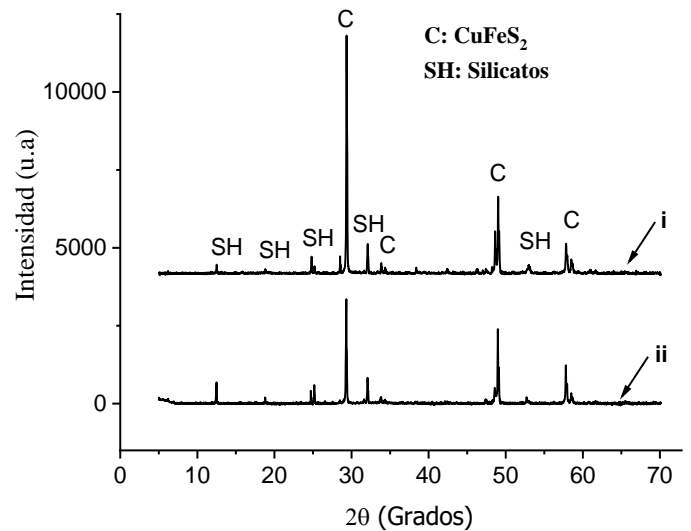


Figura 2. Difractograma correspondiente a la muestra de mineral con tamaño de malla (i) $-300 + 400$ y (ii) $-100 + 200$.

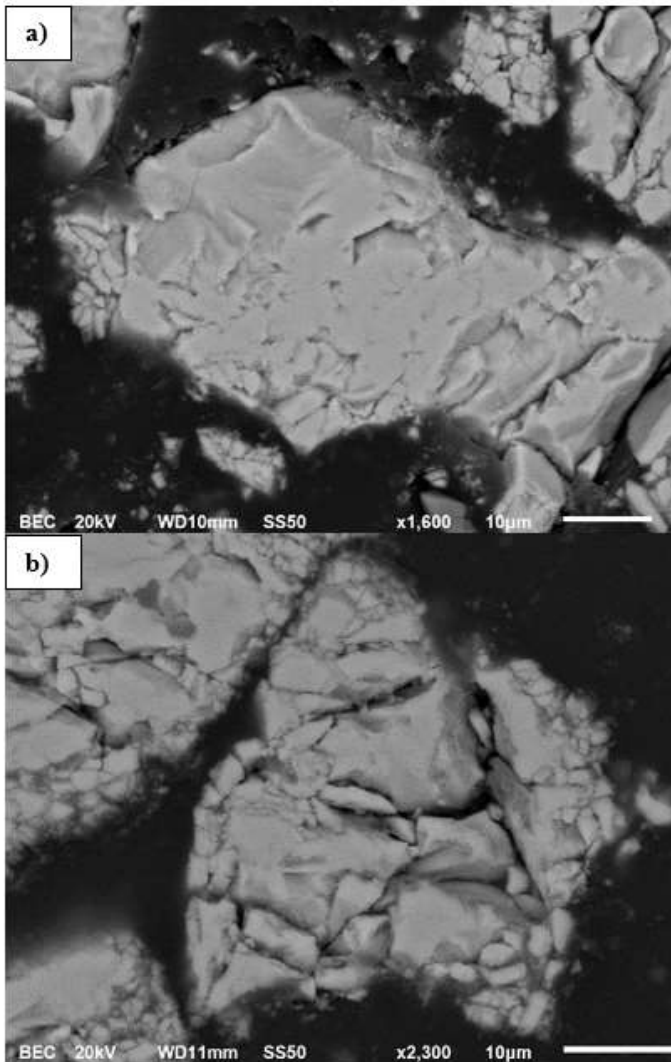


Figura 3. Fotomicrografías de MEB correspondientes al residuo sólido de una prueba de lixiviación: (a) 12h y (b) 24h. Las pruebas de lixiviación se llevaron a cabo a 20°C en presencia de 3.75 g/L de mineral con tamaño de partícula 74-149µm.

Cinética de disolución de calcopirita

Con base en un estudio previo (Ruiz-Sánchez, 2017) se encontró que un aumento de la velocidad de agitación en el intervalo de 400-600 rpm disminuye la película de líquido y por lo tanto no hay resistencia externa de transporte de masa para el peróxido de hidrógeno hacia la superficie de la calcopirita. Por otro lado, la Figura 3 muestra que a 12 y 24 horas de lixiviación la superficie de la calcopirita se encuentra limpia, libre de productos sólidos que pudieran considerarse ceniza y, por lo tanto, involucrar un proceso de difusión. Por tal motivo, el modelo de disolución de calcopirita se puede adaptar al modelo de partícula esférica decreciente sin la formación de ceniza y con control por reacción química (Levenspiel, 1972), tal y como se describe en el siguiente párrafo.

En la Figura 4 se muestra el gráfico correspondiente a la fracción de calcopirita reaccionada $[(1-(1-X)^{1/3})]$ en función del tiempo, como se establece en la ecuación 1, en la que X_B corresponde a la conversión de calcopirita (numéricamente igual al porcentaje de cobre lixiviado), b es el coeficiente estequiométrico para la reacción que representa el proceso de disolución, n es el orden de

reacción, k^n es la constante cinética de reacción superficial (unidades de m/h), ρ_B es la densidad molar de calcopirita (mol/m³), C_A (mol/m³) es la concentración molar de H₂O₂, R_0 (m) corresponde al radio inicial para un tamaño de partícula específico, t (h) es el tiempo necesario de lixiviación y m (h⁻¹) es la pendiente y corresponde a la expresión $\frac{bk^n C_A^n}{\rho_B R_0}$.

$$1 - (1 - X_B)^{\frac{1}{3}} = \frac{bk^n C_A^n}{\rho_B R_0} t \quad (\text{Ec.1})$$

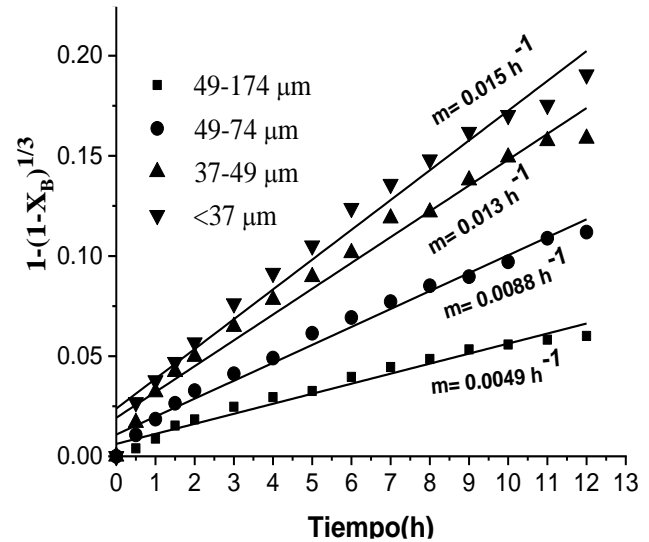


Figura 4. Efecto del tamaño de partícula en la fracción reaccionada de calcopirita considerando valido el modelo de partícula decreciente.

Los resultados experimentales mostraron un buen ajuste lineal ($R^2 \sim 0.970$) para todas las fracciones estudiadas (Figura 4). Como se puede observar, los ajustes correspondientes a la mallas -300 + 400 y -400 tienen los valores de 0.035 y 0.050 como intersección con el eje y, respectivamente. Estos valores de intersección deberían ser cero, no obstante, los valores antes mencionados pueden ser debido a la lixiviación rápida de partículas de menor tamaño a la fracción indicada puesto que la granulometría no se llevó a cabo por vía húmeda en combinación con un agente humectante como lo establece la norma ASTM C 117 – 95 para partículas finas (Aashto, 2009).

Por otro lado, en la Figura 5 se presentan un gráfico correspondiente al modelo de partícula decreciente con control por reacción química $(1-(1-X)^{1/3})$. En esta gráfica se observa un aumento para las pendientes de manera proporcional a medida que se incrementa la concentración de peróxido de hidrógeno. Las pendientes m obtenidas se graficaron como función de la concentración de peróxido de hidrógeno como lo indica la ecuación 2, obteniendo un valor unitario (Figura 6) que sugiere el pseudo-primer orden de reacción superficial correspondiente al peróxido de hidrógeno.

$$\ln(m) = -\ln\left(\frac{\rho_B R_0}{bk^n}\right) + n \cdot \ln(C_A) \quad (\text{Ec. 2})$$

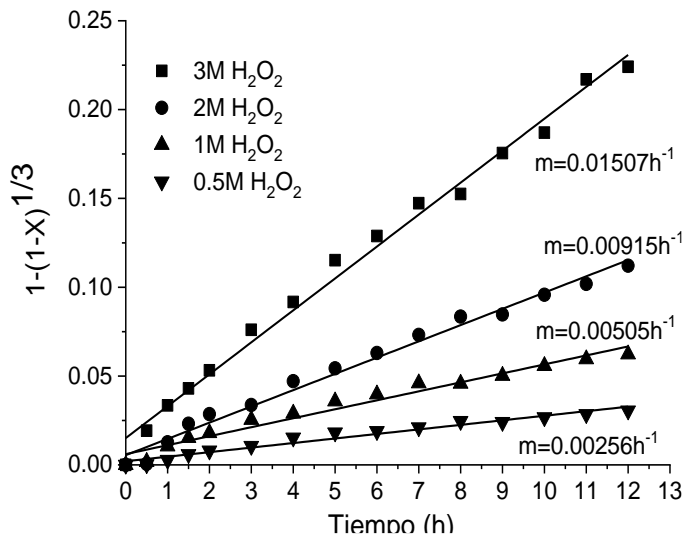


Figura 5. Efecto de la concentración de peróxido de hidrógeno en la fracción reaccionada de calcopirita.

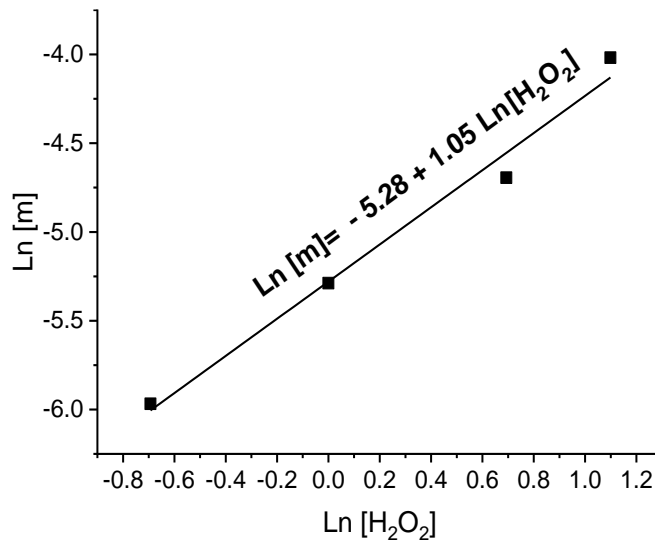


Figura 6. Determinación del orden de reacción con respecto a peróxido de hidrógeno a partir de las pendientes de la Figura 5.

El efecto térmico (Figura 7) muestran que un aumento en la temperatura favorece la conversión (X) de disolución de calcopirita. Los resultados permiten observar que la fracción reaccionada de calcopirita se ajustó muy bien al modelo de partícula decreciente únicamente a temperaturas de 10, 20 y 30°C. En cambio, los perfiles de fracción reaccionada para calcopirita obtenidos a las temperaturas de 40 y 50°C se ajustaron al modelo de partícula decreciente únicamente en las primeras cuatro horas. Este comportamiento se debe a la elevada descomposición de peróxido de hidrógeno por efecto del incremento de la temperatura (Adebayo et al., 2003; Solís y Lapidus, 2013; Agacayak et al., 2014). En este sentido, una temperatura alta en el proceso de lixiviación de cobre provoca la descomposición de peróxido de hidrógeno, y como resultado, la fracción reaccionada de calcopirita llega a un valor máximo, puesto que ya no hay agente oxidante en la solución de lixiviación.

A partir de la fracción reaccionada de calcopirita a las diferentes temperaturas (Figura 8), se tomaron únicamente las pendientes correspondientes a 10, 20 y 30°C, necesarias para realizar el gráfico de tipo Arrhenius (Figura 9) como lo indica el ajuste lineal

de la ecuación 3. A partir de este ajuste lineal (Figura 9) se obtuvo una energía de activación de 66.5 kJ/mol. Este valor de energía de activación es mayor a 40 kJ/mol, confirmando que el proceso de lixiviación de cobre a partir de calcopirita está controlado por la reacción química superficial.

$$\ln(m) = \ln\left(\frac{A_0 \cdot b \cdot C_A^n}{\rho_B \cdot R_0}\right) - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 3})$$

El valor de 66.5 kJ/mol para la energía de activación es similar al valor de 55.6 kJ/mol, reportado por Solís y Lapidus (2014) para un proceso de lixiviación de cobre en un sistema donde se utiliza ozono y sulfato de cobre como agentes oxidantes. Además, el pseudo primer orden de reacción coincide con lo reportado por Mahajan et al. (2007) en un proceso de lixiviación de calcopirita con 0.25 M ácido sulfúrico, 0.26 M peróxido de hidrógeno y 0.11 M etilenglicol, respectivamente.

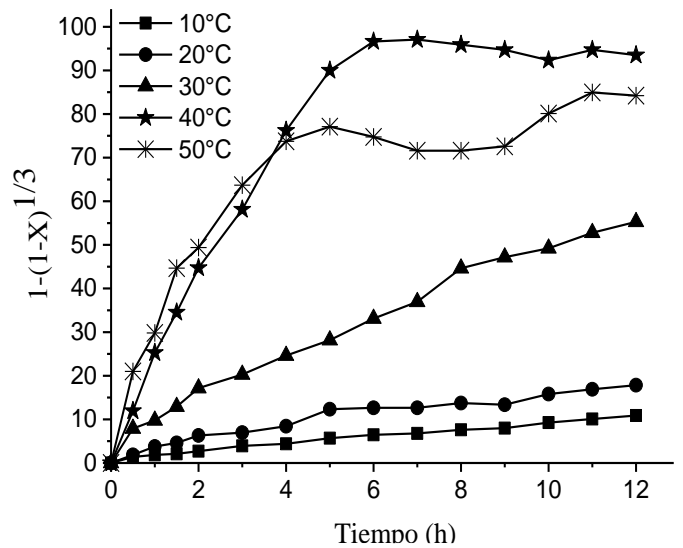


Figura 7. Efecto térmico en la disolución de cobre a partir de calcopirita.

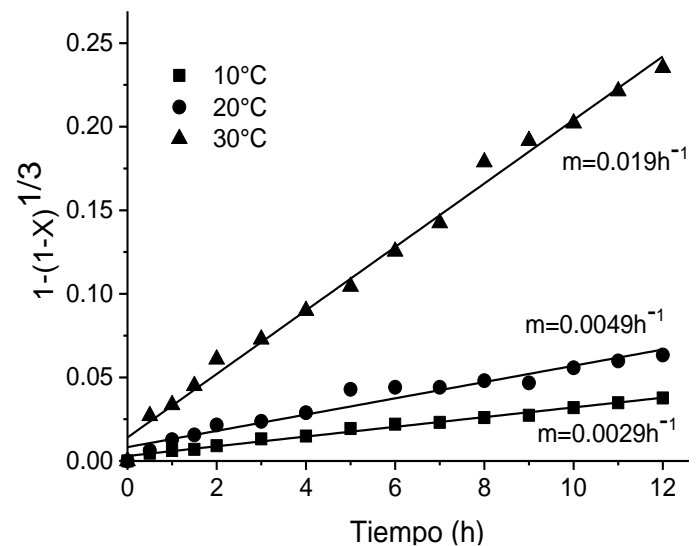


Figura 8 Determinación de las pendientes m a diferentes de temperaturas de la solución de lixiviación.

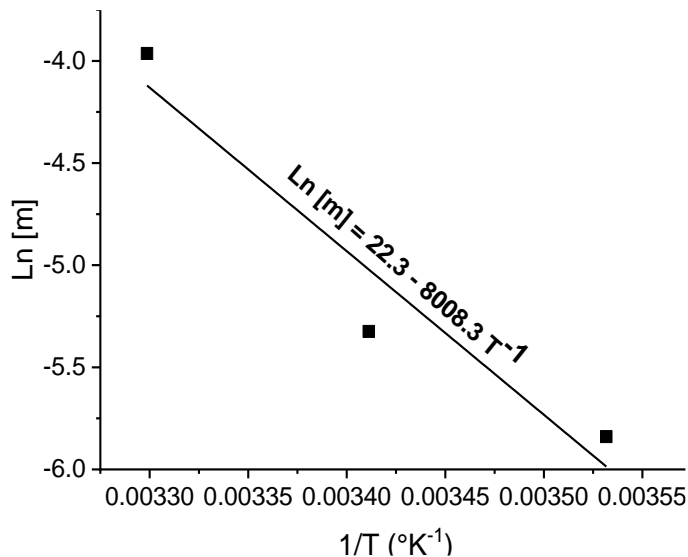


Figura 9. Determinación de la energía de activación a partir de las pendientes m de la Figura 8.

Conclusiones

La lixiviación de cobre a partir de calcopirita se ajustó a un modelo de partícula decreciente con control por reacción química, bajo una cinética de pseudo-primero orden y una energía de activación de 66.5 kJ/mol. La temperatura tuvo un efecto positivo en la lixiviación de cobre en el intervalo de 10-30°C. No obstante, la lixiviación de cobre se afectó de manera negativa a las temperaturas de 40 y 50°C, debido a la descomposición de peróxido de hidrógeno por efecto térmico.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Agradecimientos

Ángel Ruiz Sánchez agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de posgrado # 284302. Ángel Ruiz Sánchez agradece también a la profesora María Isabel Lázaro Báez por permitir el acceso al laboratorio de Hidrometalurgia del Instituto de Metalurgia perteneciente a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, asimismo por el apoyo técnico de Francisco Galindo Murrillo en la obtención de los análisis de SEM.

Referencias

- AASHTO., 2009. Standard test method for materials finer than 75- μm (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing.
- Adebayo, A. O., Ipinmoroti, K. O., Ajayi, O. O., 2003. Dissolution kinetics of chalcopirite with hydrogen peroxide in sulphuric acid medium. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 17(3), 213-218.
- Agacayak, T., Aras, A., Aydogan, S., Erdemoglu, M., 2014. Leaching of chalcopirite concentrate in hydrogen peroxide solution. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50(2), 657-666.
- Ghomi, M. A., Mozammel, M., Moghanni, H., Shahkar, L., 2019. Atmospheric leaching of chalcopirite in the presence of some polar organic reagents: A comparative study and optimization. *Hydrometallurgy*, 189, 105120.
- Mahajan, V., Misra, M., Zhong, K., Fuerstenau, M. C., 2007. Enhanced leaching of copper from chalcopirite in hydrogen peroxide-glycol system. *Minerals Engineering*, 20(7), 670-674.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
- Levenspiel O. (1972). *Chemical Reaction Engineering*. 2nd ed. Wiley. New York, NY, pp.556-586. (Chapter 25).
- Nicol, M. J., 2020. The role and use of hydrogen peroxide as an oxidant in the leaching of minerals. 1. acid solutions. *Hydrometallurgy*, 105328.
- R. Cruz, R.M. Luna-Sánchez, G.T. Lapidus, I. González, M. Monroy., 2005. An experimental strategy to determine galvanic interactions affecting the reactivity of sulfide mineral concentrates, *Hydrometallurgy* 78 (3-4) 198-208.
- Ruiz-Sánchez, A., Lapidus, G. T., 2022a. A study to understand the role of ethylene glycol in the oxidative acid dissolution of chalcopirite. *Minerals Engineering*, 180, 107502.
- Ruiz-Sánchez, Á., Lapidus, G. T., 2017. Study of chalcopirite leaching from a copper concentrate with hydrogen peroxide in aqueous ethylene glycol media. *Hydrometallurgy*, 169, 192-200.
- Ruiz-Sánchez, A., Lapidus, G. T., 2022b. Electrochemical and leaching studies to better understand the role of ethylene glycol in the oxidative acid dissolution of chalcopirite. *Electrochimica Acta*, 418, 140343.
- Ruiz-Sánchez, A., Lázaro, I., Lapidus, G. T., 2020. Improvement effect of organic ligands on chalcopirite leaching in the aqueous medium of sulfuric acid-hydrogen peroxide-ethylene glycol. *Hydrometallurgy*, 193, 105293.
- Solís-Marcial, O. J., Lapidus, G. T., 2014. Chalcopirite leaching in alcoholic acid media. *Hydrometallurgy*, 147, 54-58.
- Solís-Marcial, O. J., Lapidus, G. T., 2013. Improvement of chalcopirite dissolution in acid media using polar organic solvents. *Hydrometallurgy*, 131, 120-126. <https://ruff.info/>