

Evaluación de la adsorción de un colector tipo hidrocarburo en minerales sulfurosos

Francisco Sánchez¹, Arait Montoya², Rogelio Flores³, Gilberto Rosales Marín⁴, Israel Rodríguez^{2*}

¹Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava – Zona Universitaria, 78210 San Luis Potosí, S.L.P., México.

²Instituto de Metalurgia-Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Sierra Leona 550, Lomas 2ª sección, 78210 San Luis Potosí, S.L.P., México.

³Centro de Investigación Aplicada en Ambiente y Salud-CIACyT, UASLP. Sierra Leona 550, Lomas 2 a sección, 78210 San Luis Potosí, SLP, México.

⁴Unidad Académica Multidisciplinaria Región Altiplano, UASLP. Carretera a Cedral km 5 + 600, 78700 Matehuala, SLP, México.

*learsi@uaslp.mx

RESUMEN

El efecto del colector de tipo hidrocarburo Orfom® MCX en la adsorción y flotabilidad de los minerales molibdenita, calcopirita y pirita fue investigado a través de espectroscopia: UV-Vis y microscopía electrónica de barrido (MEB). Las cinéticas de adsorción muestran que el colector interacciona con los minerales molibdenita, calcopirita y pirita independientemente de la concentración a través de una adsorción química. Esta adsorción fue corroborada a través de MEB ya que se observaron las señales características del colector en la superficie mineral promoviendo cambios en la morfología. Estos resultados indican que el colector MCX no presenta selectividad por la molibdenita, lo cual proporciona una base importante para la optimización en el uso de este colector en procesos de flotación, sugiriendo la necesidad de ajustes en los tiempos de acondicionamiento.

PALABRAS CLAVE: *Colector; Flotación; Molibdenita*

ANTECEDENTES

La molibdenita posee una estructura cristalina formada por enlaces covalentes Mo-S y fuerzas intermoleculares tipo Van der Waals. Las fuerzas de Van der Waals mantienen juntas las capas de S-Mo-S lo que forma capas consecutivas de S-Mo-S. La ruptura de las fuerzas de Van der Waals forma las superficies hidrofóbicas del mineral. Para mejorar la flotabilidad de la molibdenita es común usar aceites de hidrocarburos no polares, dentro de los cuales están el queroseno, aceite transformado y diésel. Estos colectores se adsorben sobre las caras del mineral a través de fuerzas de dispersión (dipolo instantáneo-dipolo inducido) aumentando así la hidrofobicidad del mineral.

Reactivos en la flotación de Cu-Mo

El esquema químico tradicional para producir un concentrado bulk Cu-Mo es mediante el uso de colectores como xantato o tionocarbamato que modifican el estado superficial del concentrado, seguido del uso de un colector secundario para colectar los minerales valiosos deseados (Bulatovic, 2007). En el caso de un concentrado bulk Cu-Mo, la molibdenita se recupera mediante una flotación selectiva. Esta flotación se hace vía la adición de colectores de molibdenita, depresores de sulfuros de cobre (inorgánicos y orgánicos), y espumantes.

Un estudio realizado por Lin y colaboradores (2017) evaluó el desempeño a diferentes colectores (queroseno, diésel y aceite transformado) en la recuperación de molibdenita a pH 7. Los resultados mostraron que el aceite transformado fue el colector más efectivo, logrando un 92% de recuperación, mientras que el queroseno alcanzó un 89% y el diésel un 90%. Sin embargo, a pesar de su menor eficacia, el diésel y el queroseno son los colectores más utilizados y económicos para la separación de la molibdenita, requiriendo además una dosificación menor en comparación con el aceite transformado.

Debido a que la composición del diésel puede cambiar en función del fabricante (He et al., 2011), algunos investigadores se han centrado en el desarrollo de nuevos colectores de molibdenita; uno de estos es el MC-103 (Orfom® MCX), el cual ha mostrado una mejor recuperación de molibdenita que las obtenidas con colector diésel, para un rango de pH de 7-11 (Liu et al., 2011; Cao et al., 2017).

En el estudio de Cao y colaboradores (2017) se evaluó la capacidad del colector MC-103 en la flotación de molibdenita a pH 7. Los resultados mostraron que al aumentar la dosificación de MC-103 en los sistemas de reactivos 1, 2 y 3, se incrementó la recuperación y grado del concentrado de molibdenita, alcanzando una recuperación máxima del 84.14% con 48 g/t de MC-103 en la flotación primaria y 16 g/t en la flotación agotativa. Sin embargo, la combinación de MC-103 con modificadores de pH como CaO y Na₂SiO₃ (sistemas 4 y 5) provocó una disminución en la recuperación y grado de la molibdenita. Además, al utilizar el colector diésel y aceite #2, se obtuvo una recuperación inferior en comparación con los

sistemas que emplearon únicamente MC-103. Los autores concluyeron que el colector MC-103 tiene una mayor selectividad por la molibdenita que el diésel; se supone que no hay adsorción de este colector sobre las superficies de calcopirita y pirita. Por lo tanto, no se han reportado estudios que corroboren la interacción de MC-103 con calcopirita y pirita.

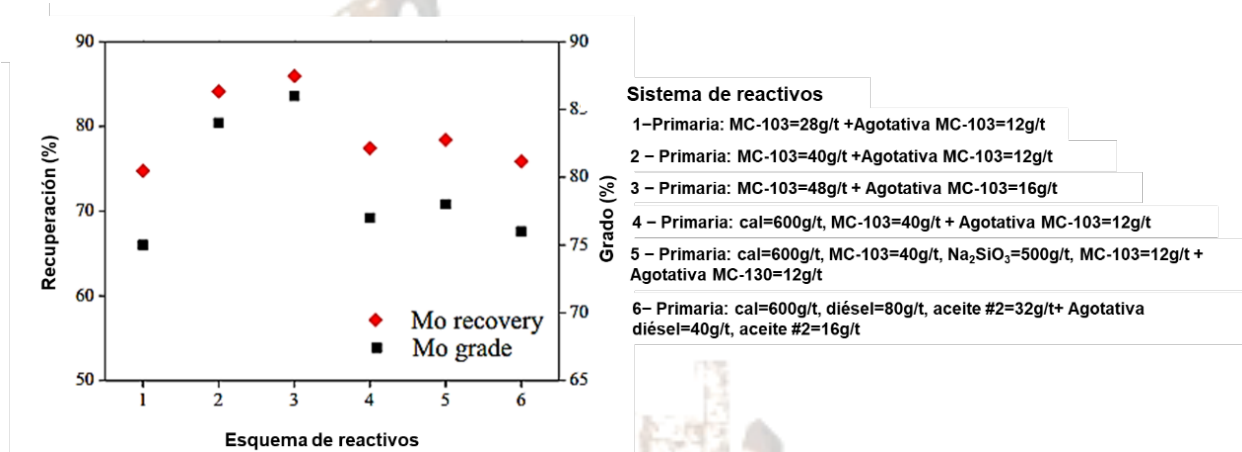


Figura 1. Evaluación a diferentes esquemas de reactivos colectores en la flotación y recuperación de molibdenita a pH 7. (Extraída de Cao et al., 2017)

Actualmente, la separación de Cu y Mo a partir de un concentrado bulk Cu-Mo se lleva a cabo usando colectores de molibdenita, entre los cuales están los aceites de hidrocarburos no polares, como diésel. Sin embargo, su dosificación es alta y la recuperación de molibdeno puede cambiar. Dentro de los nuevos colectores de molibdenita se encuentra el Orfom® MCX, el cual no se tienen información sobre el mecanismo de adsorción en minerales sulfurados, así como la composición química del mismo.

En este trabajo de investigación se establece el mecanismo de adsorción del colector tipo hidrocarburo Orfom® MCX sobre los minerales pirita, calcopirita y molibdenita a través de ajustes cinéticos de adsorción evaluando cambios en la superficie del mineral debido a la adsorción.

METODOLOGÍA Y CONDICIONES EXPERIMENTALES

Minerales y soluciones

Para las pruebas se utilizó mineral de calcopirita, pirita y molibdenita con una pureza de 96.06%, calcosita con una pureza de 95.04%, 96.13% y 92.76 % respectivamente. Las muestras fueron obtenidas de una mina situada en Sonora. Se utilizaron reactivos de grado analítico y agua desionizada para preparar las soluciones de pruebas de microflotación, y para las mediciones electroquímicas.

En los experimentos se usó el colector Orfom® MCX de la marca Chevron Phillips. Se usaron diferentes concentraciones de MCX (0-1000 mg/L). Las concentraciones del colector propuestas fueron usadas para el estudio de calcopirita y molibdenita a pH 8 (Cao et al., 2017).

Difracción de rayos X

Las muestras de estudio fueron difractadas para determinar la especie mineral principal. Se usó un difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance equipado con un ánodo de Cu, detector de estado sólido SOL-X, en la geometría 2θ con barridos de 10° a 90° . El espectro de difracción de rayos X de la Figura 2 a) muestra que la especie mineral presente fue calcopirita (CuFeS_2), en la Figura 2 b) se observa que la principal especie mineral fue pirita (FeS_2) y Figura 2 c) muestra que la especie mineral presente fue molibdenita (MoS_2).

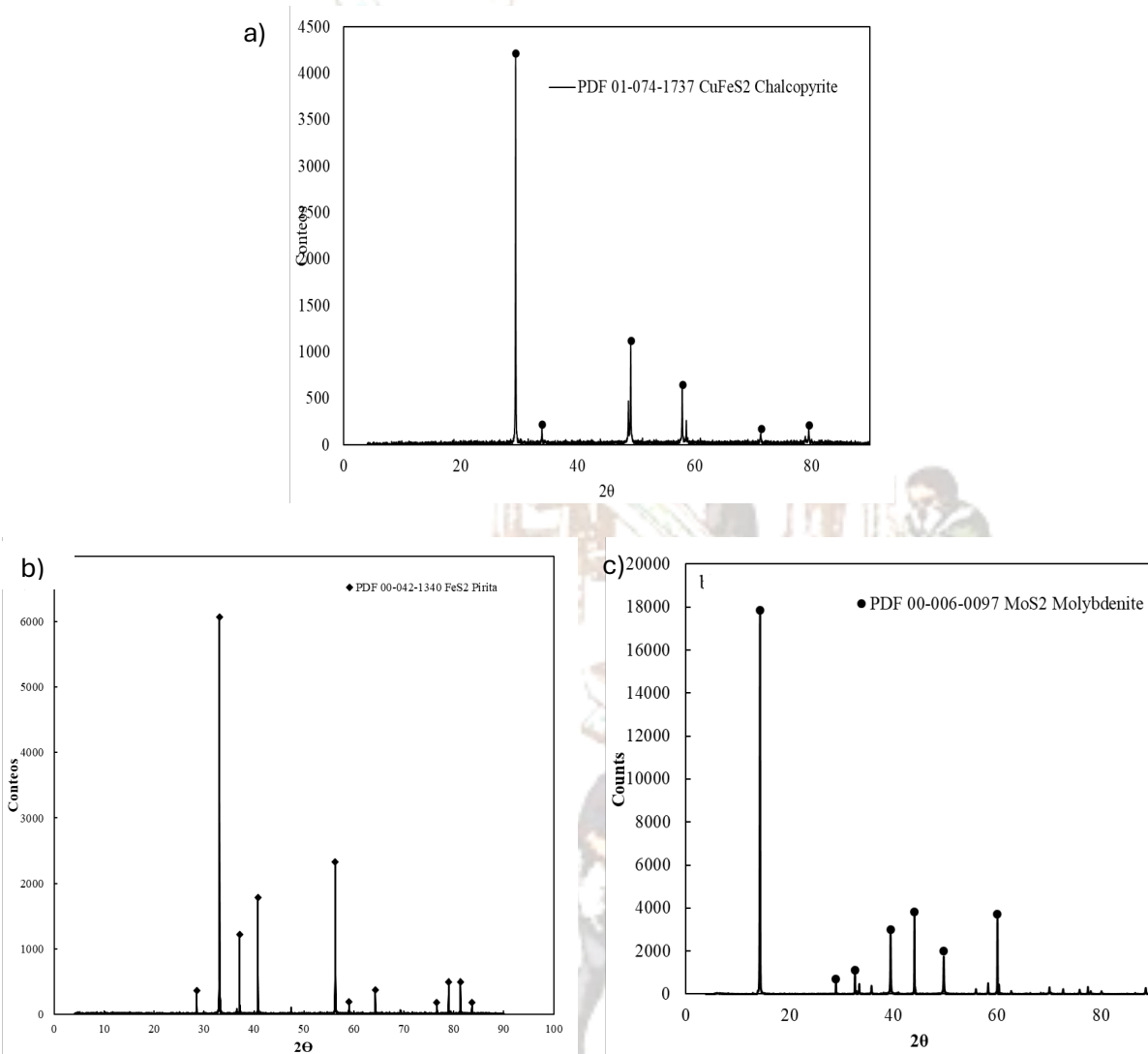


Figura 2. Espectros de difracción de rayos X: a) calcopirita, b) pirita y c) molibdenita.

Espectro UV-Vis de MCX

Debido a que no hay reportes de la longitud de onda de este colector se procedió a la determinación de esta en la región UV-Vis desde 190 a 1100 nm en la que exista una respuesta lineal entre la concentración y la absorbancia a través de diferentes soluciones de referencia a concentraciones de 0 a 1000 mg/L de MCX todas en un volumen final de 10 mL diluido con agua desionizada, usando un espectrofotómetro UV-Vis marca DLAB, modelo SP-1100, con un intervalo de escaneo de 190 a 1100 nm.

Cinética de adsorción

Los análisis se realizaron a los tiempos de 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 min a agitación constante y temperatura ambiente. Se emplearon 100 mg de cada mineral (pirita, calcopirita y molibdenita) y 10 mL de solución de colector MCX a las concentraciones deseadas.

Al finalizar cada tiempo, los sólidos se separaron mediante centrifugación y filtración para posteriormente determinar la cantidad de colector no adsorbido; esto se hizo midiendo la absorbancia inmediatamente después, de la filtración de la solución remanente, empleando una celda de cuarzo.

La capacidad de adsorción, q_t del colector se determinó a partir de la ecuación (2) (Garzón-Pérez et al., 2023).

$$q_t = \frac{V(C_i - C_t)}{m} \quad (2)$$

Donde V es el volumen del adsorbato (L), m es la masa del adsorbente (mg), C_i y C_t son las concentraciones del adsorbato (mg/L) al inicio y en cualquier momento t , respectivamente. Las cinéticas fueron ajustadas a modelos no lineales que fueron simulados con ayuda del software Origin 8.

Microscopía electrónica de barrido

Mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS), se analizó la morfología y la composición elemental en microáreas de los minerales pirita, calcopirita y molibdenita, antes y después de la adición del colector MCX. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido TMJEOL modelo 6610LV para llevar a cabo este análisis. El acondicionamiento de la muestra fue el mismo que el usado para las cinéticas de adsorción.

Mediciones de ángulo de contacto

Las mediciones de ángulo de contacto se realizaron mediante el método de la gota sésil utilizando un goniómetro ramé-hart TM90-U3-CA. Las lecturas se tomaron con la muestra de mineral molibdenita, calcopirita y pirita montadas sobre resina epóxica. Las muestras montadas se pulieron con papel de lija FandeliTM de grano 200 a 1200 hasta obtener un acabado de espejo. Las muestras pulidas se sumergieron en soluciones de colector MCX a diferentes concentraciones. Posteriormente el exceso de solución se

eliminó con papel absorbente. Finalmente, se depositó una gota de agua desionizada sobre la superficie del mineral usando una microjeringa. Las mediciones de ángulo se realizaron por triplicado durante 10 s para obtener una lectura estable, el promedio se informa en este trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Espectro UV-Vis de MCX

Para determinar la longitud de onda del colector MCX se realizó un barrido espectral en la región UV-Vis de las soluciones de referencia (0 a 1000 ppm). La Figura 3 muestra el espectro correspondiente al colector MCX, identificando para todas las soluciones un pico de absorción máxima relacionado a la longitud de onda en 250 nm.

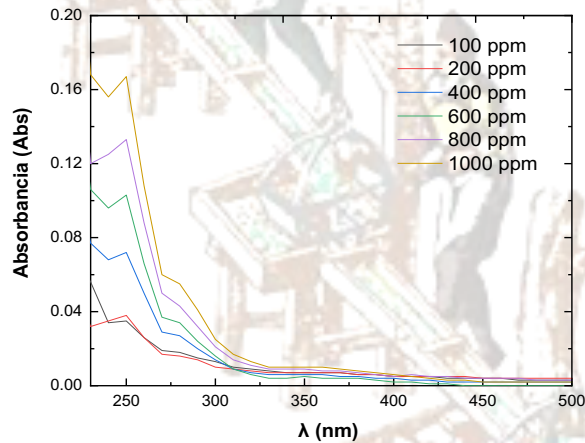


Figura 3. Ampliación del espectro completo de absorbancia de la región UV-Vis para el intervalo de concentración de 0 a 1000 mg/L

Cinética de adsorción

Para determinar el mecanismo que controla el proceso de adsorción, los resultados a las diferentes concentraciones evaluadas se ajustaron al pseudo-primer orden (2), modelos cinéticos de pseudosegundo orden (3), segundo orden (4) y difusión intapartícula (5), que se muestran a continuación:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (4)$$

$$q_t = \left(\frac{1}{b}\right) \ln(ab) + \left(\frac{1}{b}\right) \ln t \quad (5)$$

$$q_t = k_{di} t^{1/2} + C_{di} \quad (6)$$

Donde q_t es la capacidad de sorción en el tiempo t (mg/g), k_1 es la constante de velocidad de la sorción de pseudo-primer orden (1/min), k_2 (g/mg·min) es una constante de pseudo-segundo orden, a es la velocidad de adsorción inicial (mol/g·min), b es la constante de desorción (g/mol) relacionada con el área superficial cubierta y la energía de activación por quimisorción, k_{di} es la constante de velocidad de difusión intrapartícula (mg/g·min²) y C_{di} es el intercepto (mg/g) e indica el espesor de la capa límite. La Figura 4 a muestra la cinética de adsorción donde se aprecia una cinética rápida en el primer minuto, al minuto 2 pareciera que se llega al equilibrio, sin embargo, se observa que el mineral aún tiene capacidad de adsorción en los siguientes minutos. En cuanto al comportamiento de la calcopirita en la Figura 4 b, se observa un patrón similar con una disminución en la capacidad de adsorción, aunque el equilibrio parece que nunca se alcanza. Por su parte, la pirita en la Figura 4 c muestra en los primeros 2 minutos una cinética rápida, para posteriormente llegar al equilibrio en los minutos siguientes, aunque al minuto 10 sigue teniendo una ligera capacidad de adsorción hasta el minuto 20 donde finalmente se llega al equilibrio.

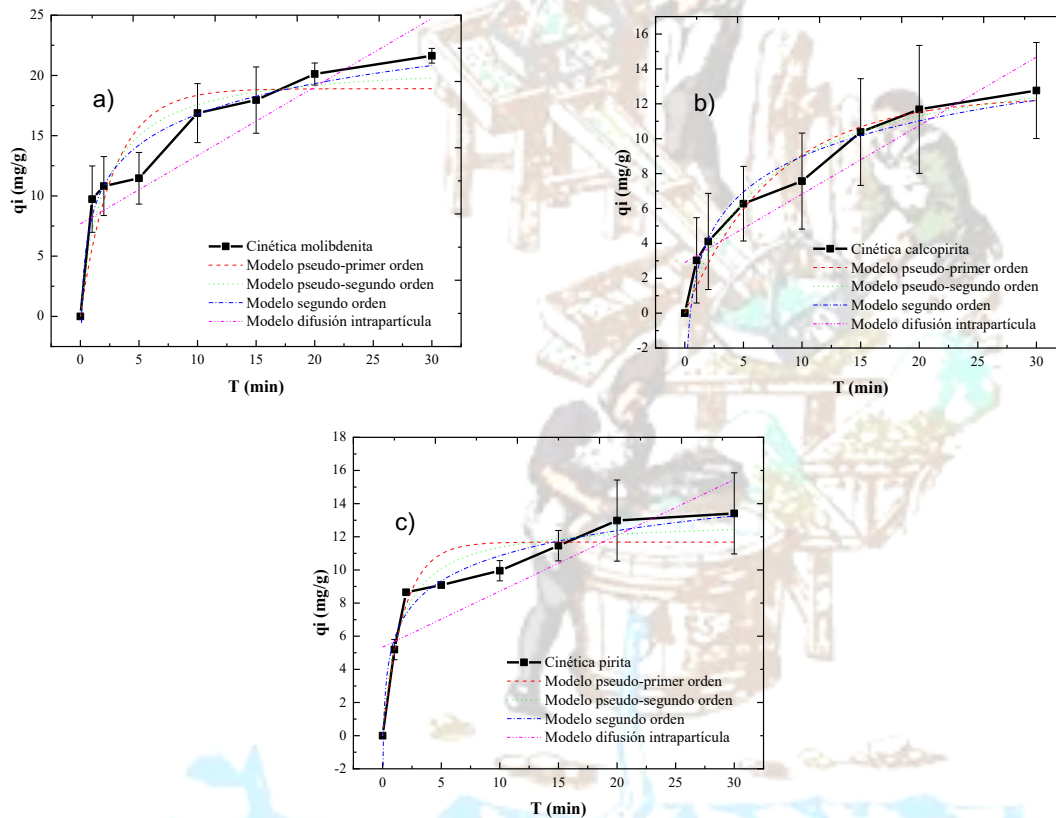


Figura 4. Cinética de adsorción de 80 ppm del colector Orfom® MCX donde; a) MoS₂, b) CuFeS₂ y c) FeS₂

Los datos obtenidos de los diferentes ajustes a una concentración de 80 ppm de colector se encuentran en la **Tabla 2**. En la **Tabla 2**, el modelo de segundo orden muestra el valor más alto de R^2 para la molibdenita, con un valor de 0.968, lo que sugiere que este modelo es el más adecuado para describir la adsorción del colector MCX sobre la superficie mineral. Para la calcopirita, el valor superior de R^2 es de 0.972, también asociado al modelo de segundo orden. De manera similar, la tabla muestra que el R^2 más elevado para pirita es 0.975, igualmente relacionado con el modelo de segundo orden que describe procesos de adsorción química.

Tabla 2. Parámetros cinéticos de la adsorción de 80 ppm del colector Orfom® MCX sobre los minerales molibdenita, calcopirita y pirita.

Parámetros cinéticos	MoS ₂ + 80 ppm MCX ($q_e^a=$ 21.632 mg/g)	CuFeS ₂ + 80 ppm MCX ($q_e^a=$ 12.763 mg/g)	FeS ₂ + 80 ppm MCX ($q_e^a=$ 13.412 mg/g)
Modelo pseudo-primer orden			
q_e^b (mg/g)	18.898 ± 1.496	12.433 ± 0.100	11.681 ± 0.675
k_1 (1/min)	0.355 ± 0.118	0.130 ± 0.030	0.557 ± 0.147
R^2	0.862	0.953	0.914
RSS	47.984	6.611	11.773
χ^2	7.997	1.102	1.962
Modelo pseudo-segundo orden			
q_e^b (mg/g)	21.151 ± 1.622	15.197 ± 1.339	13.041 ± 0.707
k_2 (g/mg·min) (g/mg·min)	0.023 ± 0.010	0.010 ± 0.003	0.052 ± 0.016
R^2	0.927	0.971	0.956
RSS	25.599	4.049	6.117
χ^2	4.266	0.675	1.020
Módulo segundo orden			
a (mol/ g·min)	35.164 ± 14.517	6.258 ± 1.166	31.410 ± 13.633
b (mol/ g·min)	0.272 ± 0.033	0.340 ± 0.031	0.458 ± 0.052
R^2	0.968	0.972	0.975
RSS	11.065	3.910	3.482
χ^2	1.844	0.652	0.580
Módulo difusión intrapartícula			
k_{di} (mg/g·min ²)	1.362 ± 0.278	0.785 ± 0.124	0.674 ± 0.200
C_{di} (mg/g·min)	7.675 ± 2.001	2.905 ± 0.891	5.347 ± 1.438
R^2	0.736	0.870	0.654
RSS	92.198	18.277	47.605
χ^2	15.366	3.046	7.934

^a Experimental^b Calculado

La **Figura 5** muestra la adsorción cinética de a) molibdenita a 200 ppm de colector, b) calcopirita a 200 ppm de colector y c) pirita a 200 ppm de colector. Los datos obtenidos de los diferentes ajustes se resumen en la **Tabla 3**. En la cinética de adsorción en la **Figura 5 a)**, se observa una cinética rápida durante los primeros 2 minutos, luego en el tiempo de 5 min aparentemente se alcanza el equilibrio, sin embargo, a los 10 minutos se observa que el mineral aún tiene una ligera capacidad de adsorción, un valor similar ya que la cinética va aumentando de poco a poco. El comportamiento de la calcopirita en la **Figura 5 b)**, se observa un comportamiento similar con la diferencia que el equilibrio se observa que se alcanza a un tiempo de 20 minutos. La pirita de la **Figura 5 c)** presenta una cinética alta los primeros 5 minutos donde parece alcanzar el equilibrio, aunque aún presenta un aumento no tan grande en la cinética.

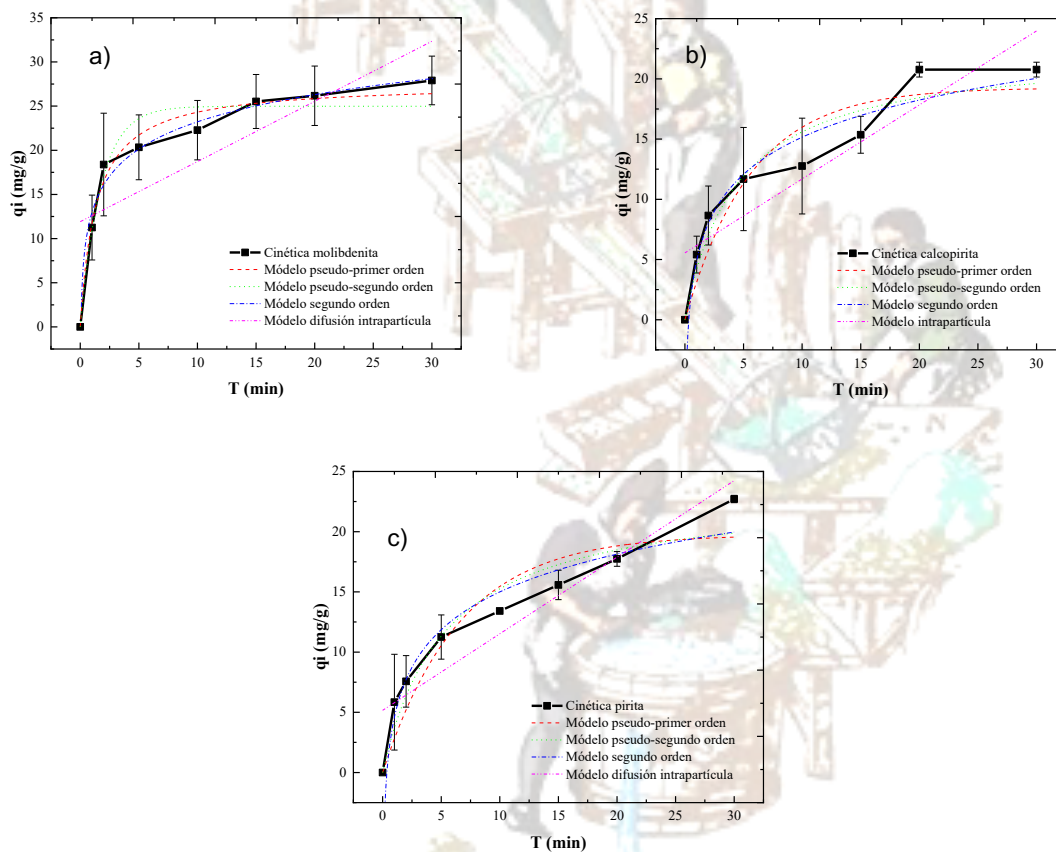


Figura 5. Cinética de adsorción de 200 ppm del colector Orfom® MCX donde; a) MoS₂, b) CuFeS₂ y c) FeS₂.

En la Tabla 3 el valor de R^2 más alto para la molibdenita corresponde al modelo de segundo orden con un valor correspondiente a 0.984 indicando que es el modelo que mejor describe la adsorción del colector MCX sobre la superficie del mineral, esto también se corrobora a partir de los valores de RSS y χ^2 . Los valores de R^2 para CuFeS_2 se muestran en la Tabla 3, donde el valor más alto fue de 0.956 que corresponde al modelo de segundo orden, este modelo describe procesos de adsorción química y supone que los sitios activos del adsorbente son heterogéneos. Se puede observar que la Tabla 3 presenta los valores de R^2 para FeS_2 donde el valor más alto fue de 0.962 correspondiente al modelo de segundo orden, tal y como con los demás minerales.

Tabla 3. Parámetros cinéticos de la adsorción de 200 ppm del colector Orfom® MCX sobre los minerales molibdenita, calcopirita y pirita. ^aExperimental, ^bCalculado

Parámetros cinéticos	$\text{MoS}_2 + 200 \text{ ppm MCX}$ ($q_e^a = 27.905 \text{ mg/g}$)	$\text{CuFeS}_2 + 200 \text{ ppm MCX}$ ($q_e^a = 20.766 \text{ mg/g}$)	$\text{FeS}_2 + 200 \text{ ppm MCX}$ ($q_e^a = 22.713 \text{ mg/g}$)
Modelo pseudo-primero orden			
q_e^b (mg/g)	24.982 ± 1.063	19.260 ± 1.834	19.750 ± 2.008
k_1 (1/min)	0.576 ± 0.113	0.177 ± 0.056	0.152 ± 0.048
R^2	0.951	0.897	0.902
RSS	29.463	37.491	35.513
χ^2	4.911	6.248	5.919
Modelo pseudo-segundo orden			
q_e^b (mg/g)	27.600 ± 0.978	22.532 ± 2.330	23.437 ± 2.512
k_2 (g/mg·min) (g/mg·min)	0.027 ± 0.006	0.010 ± 0.004	0.008 ± 0.004
R^2	0.980	0.936	0.942
RSS	12.368	23.305	20.928
χ^2	2.061	3.884	3.488
Módulo segundo orden			
a (mol/ g·min)	82.319 ± 31.042	13.444 ± 3.831	12.460 ± 3.124
b (mol/ g·min)	0.225 ± 0.021	0.225 ± 0.027	0.221 ± 0.024
R^2	0.984	0.956	0.962
RSS	9.631	16.029	13.774
χ^2	1.605	2.671	2.296
Módulo difusión intrapartícula			
k_{di} (mg/g·min ²)	1.362 ± 0.448	1.229 ± 0.233	1.272 ± 0.190
C_{di} (mg/g·min)	11.918 ± 3.224	5.551 ± 1.676	5.164 ± 1.368
R^2	0.606	0.822	0.882
RSS	239.325	4.652	43.078
χ^2	39.888	10.775	7.180

Al comparar las cinéticas de adsorción del colector a concentraciones de 80 ppm y 200 ppm, se observan comportamientos similares en términos de tendencia, aunque existen diferencias notables en los tiempos para alcanzar el equilibrio y en la capacidad de adsorción de los minerales. A 80 ppm, la molibdenita presenta una adsorción rápida durante el primer minuto, seguido por una desaceleración progresiva sin alcanzar un equilibrio definitivo. A una mayor concentración de 200 ppm (Figura 5), se incrementa tanto la velocidad inicial de adsorción como la capacidad de los minerales para adsorber el colector. En el caso de la molibdenita, la adsorción es rápida en los primeros 2 minutos, pero no se alcanza un equilibrio hasta después de los 10 minutos. Para la calcopirita, el comportamiento cinético es similar al de 80 ppm, aunque el tiempo para alcanzar el equilibrio se extiende a 20 minutos. Este incremento sugiere una mayor interacción entre el colector y el mineral a 200 ppm, lo que refleja un mayor número de sitios activos disponibles para la adsorción. En el caso de la pirita, la cinética de adsorción muestra una tendencia rápida en los primeros 5 minutos a 200 ppm, pero se observa una adsorción prolongada en los minutos siguientes, con un ligero aumento en la capacidad de adsorción hasta los 20 minutos. Estos resultados muestran que independientemente de la concentración de colector existe una adsorción de este sobre la superficie mineral. Mostrando que a 200 ppm se tiene una mayor capacidad de adsorción y tiempos de equilibrio más largos, lo que sugiere una interacción más fuerte y prolongada entre el colector y las superficies minerales. Debido a que a 200 ppm se tiene una mayor interacción con las superficies minerales se ocupó esta concentración para determinar el efecto en la superficie mineral a través de MEB y mediciones de ángulo de contacto.

Microscopía electrónica de barrido

Para visualizar si la adsorción de colector MCX promueve cambios en la morfología de los minerales molibdenita, calcopirita y pirita se analizó la superficie mineral a través de MEB. La Figura 6 a) presenta una micrografía con partículas de molibdenita antes de ser tratadas con el colector MCX. La morfología natural corresponde a partículas formadas por láminas de superficie ligeramente rugosa con presencia de escamas, las cuales forman agregados con bordes rectos y bien definidos. La Figura 6 b) presenta partículas de molibdenita después de la interacción con 200 ppm de colector MCX. La morfología muestra bordes que ya no son rectos sino ligeramente redondeados. Además, se puede observar pequeños agregados en a lo largo de la superficie estos cambios se observaron en la mayoría de las partículas.

La Figura 7 a) presenta una micrografía con partículas de calcopirita antes de ser tratadas con el colector MCX. La morfología natural corresponde a superficies ligeramente rugosas y se observan bordes bien definidos. Después del tratamiento con 200 ppm de MCX en la Figura 7b) se presentan partículas de calcopirita con alteraciones superficiales evidentes. Estas se observan como agregados de diferentes tamaños distribuidos heterogéneamente a lo largo de la superficie. Además, La morfología muestra bordes más redondeados y superficies aún más rugosas, respecto a la Figura 7 a).

Estos cambios indican que existe una interacción del colector con la superficie mineral, lo cual coincide con los resultados obtenidos a través de las cinéticas de adsorción ya que el modelo ajustado indicó una adsorción química heterogénea.

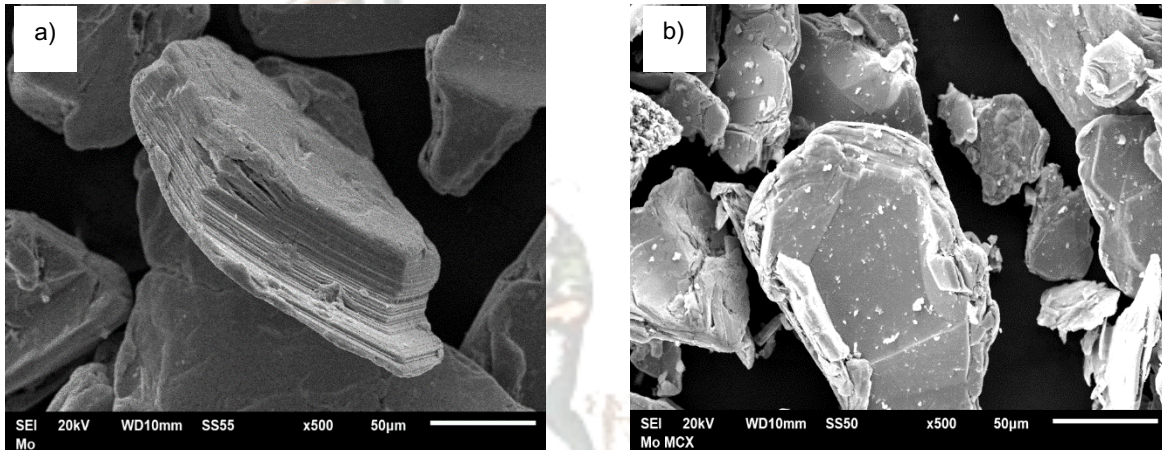


Figura 6. a) Micrografía de la molibdenita antes de la interacción con el colector MCX y b) después de la interacción con el colector MCX.

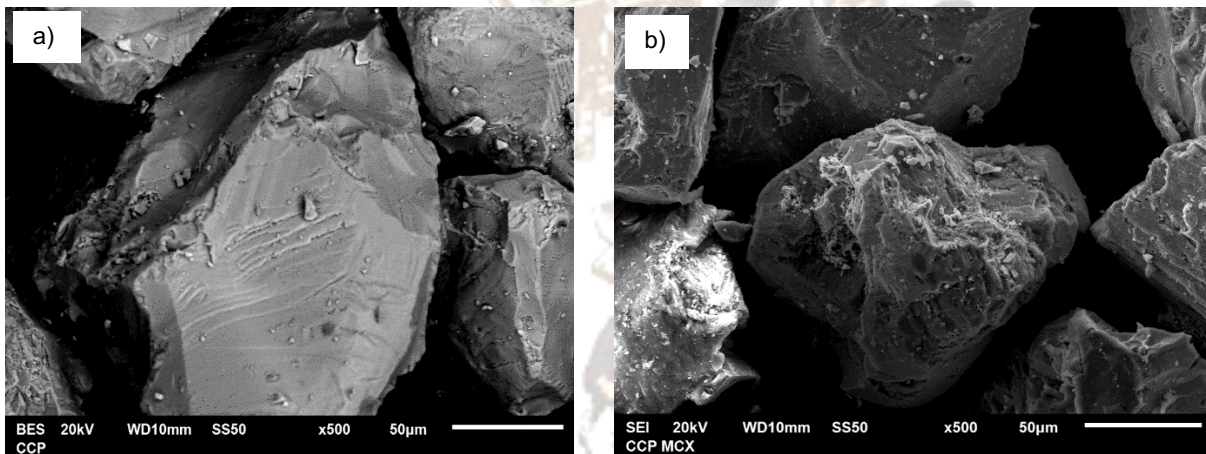


Figura 7. a) Micrografía de la calcopirita antes de la interacción con el colector MCX y b) después de la interacción con el colector MCX.

Las partículas de pirita antes de ser acondicionadas con el colector MCX se presentan en la Figura 8 a), la morfología natural presenta superficies lisas, junto con bordes bien definidos y rectos. Los espectros de EDS muestran la estequiometría correspondiente al mineral. Después del tratamiento con 200 ppm de colector MCX, la Figura 8 b) presenta partículas de pirita con una evidente alteración tanto en su superficie

como en la morfología a través de la formación de agregados de distintos tamaños distribuidos heterogéneamente a lo largo de la superficie. Además, la morfología nos revela bordes más redondeados y superficies aún más rugosas en comparación con el mineral sin tratar, estos factores nos sugieren la interacción mineral con el colector MCX.

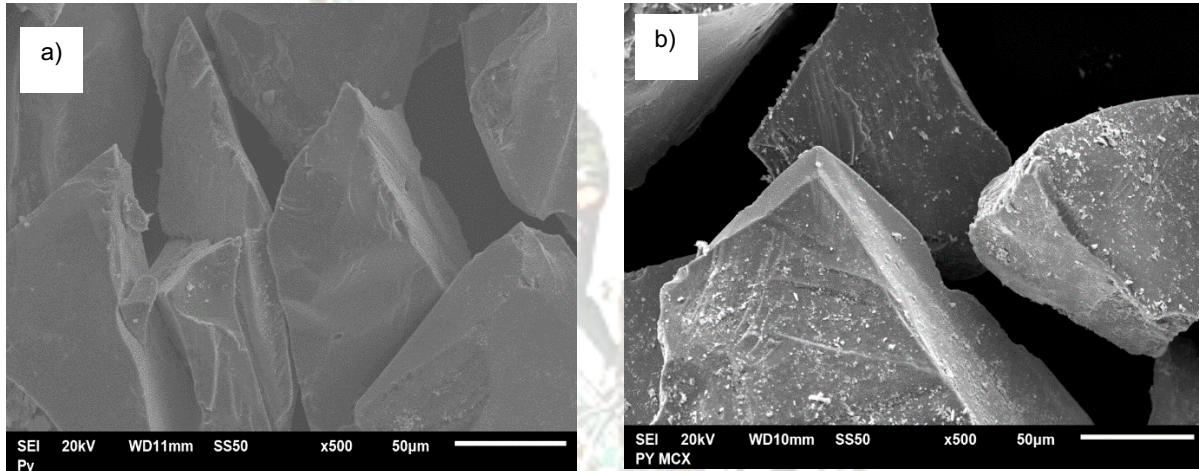


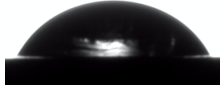
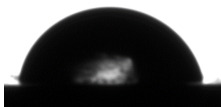

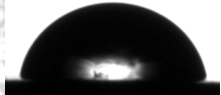


Figura 8. a) Micrografía de la pirita antes de la interacción con el colector MCX y b) después de la interacción con el colector MCX.

Mediciones de ángulo de contacto

El ángulo de contacto se midió en ausencia y presencia de 200 ppm de MCX. Según la Tabla 4, el valor del ángulo de contacto de la molibdenita sin colector fue de 80.02° . Estos datos sugieren que el mineral posee un carácter hidrófobo. Después de la adsorción de 200 ppm de colector se observa un ligero aumento del ángulo a 91.6° lo cual sugiere que el colector intensifica este carácter hidrófobo. Estos resultados están en concordancia con los datos cinéticos (Figura 5), donde se observa una capacidad de adsorción prolongada, reflejando una interacción más fuerte entre el colector y el mineral. En el caso de la calcopirita, su ángulo de contacto también aumenta de 58.87° a 91.7° , reforzando el efecto hidrofóbico del colector. Este aumento en hidrofobicidad se relaciona con el comportamiento cinético observado, lo que sugiere una mayor cobertura del colector sobre la superficie mineral. Para la pirita, aunque su ángulo de contacto aumenta de 57.04° a 90.7° , el cambio es menor en comparación con los otros minerales, lo que se correlaciona con la adsorción menos marcada observada en los primeros minutos de la cinética. Este menor incremento en hidrofobicidad coincide con el comportamiento de equilibrio más rápido de la pirita, que presenta una menor capacidad de adsorción en comparación con la molibdenita y la calcopirita.

Tabla 4. Mediciones del ángulo de contacto de los minerales molibdenita, calcopirita y pirita antes y después del acondicionamiento con 200 ppm de colector MCX.

Mineral	Condiciones	Ángulo (°)	Imagen
Molibdenita	Sin acondicionar	80.02	
	200 ppm de MCX	91.6	
Calcopirita	Sin acondicionar	58.87	
	200 ppm de MCX	91.7	
Pirita	Sin acondicionar	57.04	
	200 ppm de MCX	90.7	

CONCLUSIONES

El estudio de la adsorción del colector tipo hidrocarburo (MCX) en molibdenita, calcopirita y pirita ha mostrado que, en todos los casos, el colector se adsorbe a las superficies minerales, incrementando su hidrofobicidad. Las cinéticas de adsorción a 80 ppm y 200 ppm indican que la adsorción es rápida en los primeros minutos, pero los tiempos para alcanzar el equilibrio varían según el mineral y la concentración de colector. El modelo de segundo orden describe que la adsorción es controlada principalmente por interacciones químicas. La adsorción del colector en los tres minerales sugiere que su uso en concentraciones más altas a 200 ppm, no sería adecuado para un sistema de separación selectiva Cu-Mo, debido a la falta de selectividad hacia la molibdenita. Para mejorar la eficiencia de la separación, sería recomendable reducir la concentración del colector a niveles más bajos, cercanos a 80 ppm, donde la adsorción sobre la molibdenita sigue siendo efectiva, pero la capacidad de adsorción sobre la calcopirita y la pirita es menor, lo que facilitaría una separación más selectiva.

AGRADECIMIENTOS

A la L.Q. Martha Imelda Franco Vázquez por su apoyo en el montaje, adquisición y cotización de material y equipo utilizado en el laboratorio de hidrometalurgia. Al M.I.M. Francisco Galindo Murillo y M.M.I.M. José Manuel Martínez Gutiérrez por su apoyo en la preparación y caracterización de muestras minerales para microscopía electrónica de barrido.

REFERENCIAS

Bulatovic, S. M. (2007). Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and practice. Elsevier.

Cao, Z., Yue, Y., Zhong, H., Qiu, P., Chen, P., Wen, X., Wang, S., & Liu, G. (2017). A novel approach for flotation recovery of molybdenite, galena and pyrite from a complex molybdenum-lead ore. *Metallurgical Research & Technology*, 114(212).

He, T.S., Wan, H., Song, N.P., Guo, L., 2011. The influence of composition of nonpolar oil on flotation of molybdenite. *Miner. Eng.* 24, 1513-1516. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.07.003>.

Liu, GY., Lu, YP., Zhong, H., Cao, ZF., Xu, ZH., 2012. A novel approach for preferential flotation recovery of molybdenite from a porphyry copper-molybdenum ore. *Miner. Eng.* 36-38, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.02.008>

Lin, Q., Gu, G., Wang, H., Liu, Y., Wang, C., Fu, J., Zhao, J., & Huang, L. (2017). Recovery of molybdenum and copper from porphyry ore via iso-flotability flotation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(9), 2260-2271.

