

IMPORTANCIA DE LA POROSIDAD DE LAS PARTÍCULAS QUE SE PROCESAN A TRAVÉS DE FLOTACIÓN DE ESPUMA: UNA REVISIÓN

*IMPORTANCE OF PARTICLE POROSITY IN MATERIALS
PROCESSED THROUGH FROTH FLOTATION: A REVIEW*

RESUMEN

El efecto de los minerales ganga porosos desempeña un papel importante en la flotación de minerales metálicos, no metálicos y rocas como el carbón. Este artículo proporciona una revisión bibliográfica que demuestra los retos que enfrenta la flotación de espuma en la separación de minerales ganga porosos contenidos en minerales comerciales. Sin embargo, en la superficie de los minerales la estructura porosa es compleja y presenta heterogeneidad particular de acuerdo con el tipo de mineral y/o roca. Por lo tanto, para el desarrollo de la revisión bibliográfica se aplicó un enfoque transversal para incluir los diversos fenómenos físicos y químicos relacionados con la porosidad de un mineral y/o roca comercial. El concepto se define como “red estructural de diversos minerales que forman poros”. Con este enfoque y concepto el objetivo del presente trabajo fue ilustrar las características y la importancia de las redes estructurales en la formación de poros y su efecto sobre los fundamentos de la flotación de espuma (e.g., flotabilidad, hidrofobicidad, flotación verdadera etc.). Cinco casos de estudio fueron seleccionados para ilustrar la porosidad de diversos minerales y su impacto en los fundamentos de la flotación (así como en las respuestas metalúrgicas, grado y recuperación). La información se procesó a través de una rutina de análisis de imágenes fácil de comprender y aplicar para analizar la porosidad de los minerales y/o rocas de interés. Los resultados demostraron que la revisión bibliográfica es robusta y crítica. Asimismo, la revisión describe el impacto negativo de la porosidad en la flotación selectiva de minerales metálicos (e.g., CuFeS₂), no metálicos y rocas (e.g., carbón) que fueron seleccionados en el presente trabajo.

Palabras clave: porosidad; minerales ganga porosos; flotación de espuma; partículas porosas.

MACÍAS VIRAMONTES, Luis Alberto ¹

LÓPEZ SAUCEDO, Felipe de Jesús ²

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl ¹

DÍAZ FLORES, Laura Lorena ³

BATISTA RODRÍGUEZ, José Alberto ²

BATISTA CRUZ, Ramón Yosvanis ²

ALMAGUER CARMENATES, Yuri ²

1. Facultad de Metalurgia,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Monclova, Coahuila,
México.

2. Escuela Superior de Ingeniería
“Lic. Adolfo López Mateos”,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Nueva Rosita,
Coahuila, México.

3. División Académica de Ingeniería
y Arquitectura, Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco.
Cunduacán, Tabasco, México.

Correspondencia
albertoviramontes@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0009-2522-7176>

Fecha de recepción

19 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación

13 de marzo de 2026.

ABSTRACT

Non-metallic minerals, and rocks such as coal. This article provides a literature review that highlights the challenges faced by froth flotation in the separation of porous gangue minerals contained in commercial ores. However, on the surface of minerals, the porous structure is complex and exhibits specific heterogeneity depending on the type of mineral and/or rock. Therefore, for the development of this literature review, a cross-sectional approach was applied to include the various physical and chemical phenomena related to the porosity of a commercial mineral and/ or rock. The concept is defined a “structural network of various minerals that form pores”. With this approach and definition, the objective of the present work was to illustrate the characteristics and importance of structural networks in pore formation and their effect on the fundamentals of froth flotation (e.g; floatability, hydrophobicity, true flotation, etc.). Five case studies were selected to illustrate the porosity of different minerals and its impact on flotation fundamentals (as well as on metallurgical responses, grade, and recovery). The information was processed through an easy-to-understand image analysis routine designed to evaluate the porosity of the minerals and/or rocks of interest. The results demonstrated that the literature review is robust and critical. Additionally, the review describes the negative impact of porosity on the selective flotation of metallic minerals (e.g; CuFeS_2), non-metallic minerals, and rocks (e.g; coal) selected in this study.

Keywords: porosity; porous gangue minerals; froth flotation; porous particles.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería de procesos minero-metalúrgicos, la flotación es una de las técnicas más empleadas para la concentración de minerales con valor económico y tecnológico (Azizi y col., 2015; Batjargal y col., 2023; Masdarian y col., 2020). No obstante, la eficiencia de este proceso se ve comprometida significativamente con la presencia de minerales porosos presentes en la ganga mineral (NSG) (Hassanzadeh y col., 2021; Krūmiņš y col., 2022; Laskowski y col., 2023; Tabatabaei y col., 2014). A diferencia de los minerales de estructura compacta aquellos que presentan una alta porosidad interna poseen una superficie específica mucho mayor, lo que se

traduce en una tendencia elevada a retener agua en sus estructuras capilares (Aksu y col., 2015; Mercedes y col., 2022; Molina y col., 2009; Rosas Licona y col., 2024; Uribe y col., 2021). Esta retención de agua no solo altera las condiciones físico-químicas de la superficie del mineral, sino que también limita la adsorción de los colectores y la adherencia de las burbujas (Caballero y col., 2022; Elizondo-Alvarez y col., 2022; Laskowski y col., 2023; Ran y col., 2019). Recientes investigaciones han demostrado que la porosidad de los minerales desempeña un papel crucial en su comportamiento hidrodinámico y de mojabilidad (Hassanzadeh y col., 2021; Shen y col., 2020; Xia y col., 2021; Zhu y col., 2020). Los poros actúan como estructura que permite almacenar agua y que favorece la formación de películas líquidas internas, las cuales son difíciles de desplazar mediante métodos convencionales de acondicionamiento (Shen y col., 2020; Xia y col., 2021). Esta condición impide una adecuada transición de una superficie hidrofílica a hidrofóbica, incluso bajo la acción de colectores ampliamente utilizados (Atrafi y col., 2012; Cook y col., 2023; Elizondo-Alvarez y col., 2021; Elizondo-Alvarez y col., 2020; Pugh y col., 1985; Shu y col., 2020; Xing y col., 2017). A ello se suma la influencia de parámetros operativos como el tiempo de pre-mojado y el tipo de acondicionamiento empleado, los cuales afectan directamente el grado de saturación de los poros y, por ende, la eficiencia global del proceso de flotación (Chambi y col., 2020; Hassanzadeh y col., 2021; Hassanzadeh y col., 2022; Kemp Cañon y col., 2018; Mao y col., 2019; Szmiguel y col., 2024; Zhang y col., 2024). En respuesta a esta problemática, se han propuesto alternativas como el uso de colectores más específicos (e.g., Oleato de sodio) o incluso esquemas sin acondicionamiento previo (Atrafi y col., 2012; Mao y col., 2020a; Mao y col., 2020b; Pugh y col., 1986; Xie y col., 2021).

Diversas investigaciones han demostrado la importancia de los minerales ganga no sulfurados (NSG), particularmente las arcillas y el carbono orgánico como factores críticos que agravan la ineficiencia en procesos de flotación de sulfuros metálicos (Cordeiro y col., 2018; Elizondo-Alvarez y col., 2022; Foszcz y col., 2011; Gredelj y col., 2009; Konieczny y col., 2011; Laskowski y col., 2000; Pan y col., 2022; Tabatabaei y col., 2014). Estos minerales NSG, al interactuar con los minerales de interés, reducen la recuperación y la calidad del concentrado final. Casos de estudio de diversas compañías mineras han evidenciado el impacto negativo de la porosidad de los minerales NSG (Azañero y col., 2002; Elizondo-Alvarez y col., 2021; Tabatabaei y col., 2014). Por lo tanto, para favorecer el éxito de la flotación, es importante conocer las características de porosidad de los minerales NSG.



La adsorción de colector es un proceso clave para la flotación, el cual está relacionado significativamente con la estructura porosa de los minerales NSG. Sin embargo, la estructura porosa es compleja y presenta heterogeneidad particular de acuerdo con el tipo de mineral. Las tecnologías disponibles para determinar las características de la porosidad en minerales NSG se clasifican fundamentalmente en: inyección de fluidos, observación microscópica y espectroscopia. Estas tecnologías han contribuido a la caracterización de las estructuras porosas en diversos minerales y con ello se ha mejorado la comprensión de subprocesos como: la humectación, selectividad, la flotabilidad, etc. Del proceso de flotación frente al procesamiento de minerales NSG.

En el contexto anterior, el presente trabajo propone el desarrollo de una revisión bibliográfica que permita dimensionar la importancia de la porosidad de diversos minerales que comúnmente se procesan por flotación de espuma. La revisión se enfocará en ilustrar las redes estructurales de diversos minerales que forman poros, los cuales se medirán a través de una rutina de análisis de imágenes fácil de comprender y aplicar. La expectativa es que la metodología permita analizar con detalle la complejidad y la heterogeneidad de los poros. Por lo tanto, la presente revisión tiene como objetivo ilustrar las características y la importancia de las redes estructurales de diversas rocas y minerales que forman poros sobre los fundamentos de la flotación de espuma (e.g., adsorción de colector, humectación, hidrofobicidad, etc.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión bibliográfica sobre minerales porosos (particularmente minerales ganga no sulfurosos, NSG) que se procesan en la flotación de minerales. La revisión permitió generar una base de imágenes (adquirida de la literatura) que ilustran las redes estructurales de diversos minerales que forman poros. La porosidad se determinó a través de una rutina de análisis de imágenes, que en particular se enfoca en la segmentación y cuantificación de áreas en una imagen en modo semiautomático. Posteriormente, la base de datos producto del análisis de imágenes se procesó para evaluar la distribución de tamaños de poros. Dada la naturaleza de estos datos (variable aleatoria continua) se utilizó la función de densidad (Montgomery y Runger,



1996) para describir la distribución de tamaños. Esto permitirá analizar detalladamente la distribución de los datos en un intervalo determinado (i.e., en una escala geométrica determinada).

Los resultados se presentarán en dos secciones, la primera denominada *demonstración* y una segunda que se reconoce como *aplicación*. En la sección de *demonstración* se desarrollará una discusión crítica sobre la congruencia entre la porosidad (determinada con análisis de imágenes) y los fundamentos fisicoquímicos de la flotación de espuma. En la sección de *aplicación* se utilizará la rutina de análisis de imágenes para analizar el papel de la porosidad en la flotación de partículas de carbón. Para este caso, se procesará la base de datos de Carrizales Méndez y col. (2021). La base de datos está compuesta por 3 set de imágenes, que ilustran la distribución de las partículas de carbón (y diversos minerales ganga) en las corrientes de alimentación, concentrado y colas de un banco de celdas industrial.

RUTINA DE ANÁLISIS DE IMÁGENES

Para evaluar la porosidad de los minerales NSG se propone la aplicación de un método de análisis de imágenes con el software Image-Pro Plus, el diagrama de flujo del método se ilustra en la Figura 1. En la Etapa 1 del proceso se define la relación entre el número de píxeles y las dimensiones reales de los objetos en la imagen (minerales, poros, grietas, etc.). Esto es posible por la medición de la longitud de la escala que se encuentra en la imagen. Una vez que se definió la calibración espacial de la imagen (e.g., 111 píxeles equivalen a $60\ \mu\text{m}$) inicia la Etapa 2 del proceso. Esta etapa permite aislar los poros, los cuales se definen como áreas de interés, esta acción se realiza a través de la "segmentación" como se ilustra en la Figura 1. Después de la segmentación, se favorece el contraste objeto/fondo y se facilita la detección de los poros. Posteriormente se dibuja el contorno

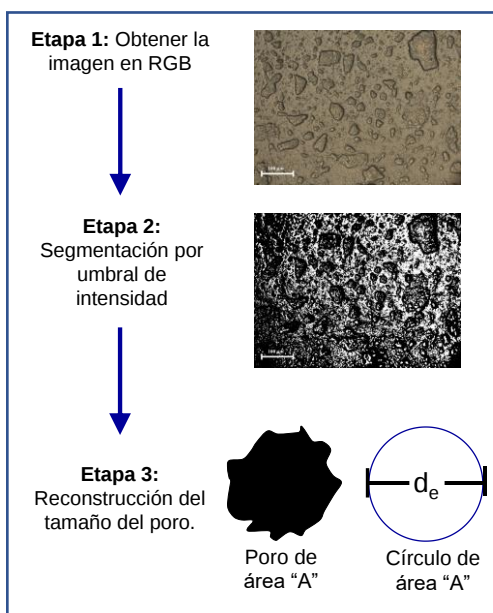


Figura 1. Análisis de imágenes.

del objeto y se define un polígono, el software realiza el cálculo del área (en pixeles) automáticamente, los datos se almacenan y quedan listos para su tratamiento posterior.

La Etapa 3 del proceso describe la reconstrucción del tamaño de poro, el cual es función del área "A" del objeto medido como se indica en la Ecuación 1.

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

El procesamiento concluye con la definición de la escala geométrica de los poros, para efecto de estandarización se utilizará la clasificación IUPAC (microporo $<0.002 \mu\text{m}$; mesoporo $0.002-0.05 \mu\text{m}$; macroporo $>0.05 \mu\text{m}$).

RESULTADOS

DEMOSTRACIÓN

La Figura 2 permite demostrar el alcance y la sensibilidad de la rutina de análisis de imágenes propuesta. De acuerdo con la revisión bibliográfica sobre los minerales porosos y su influencia en la flotación se definieron cinco casos de estudio.

En cada caso de estudio se describen los fundamentos físicos y/o químicos relacionados con la

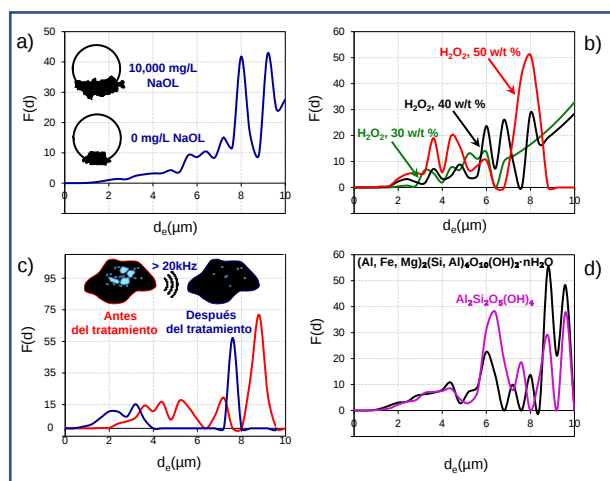


Figura 2. Redes estructurales de diversas rocas y minerales que forman poros; Caso de estudio 1(a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d).



porosidad, la composición química/mineralógica de los minerales de estudio, la distribución del tamaño de poro y su influencia en la flotación de minerales.

El Caso de Estudio 1 (Xia y col., 2021) describe la relevancia de los minerales porosos durante el acondicionamiento químico de la pulpa (proceso previo a la flotación). El fundamento que describe el caso de estudio es la humectación de los poros. Xia y col. (2021) emplearon carbón activado, un material versátil y un excelente material de referencia para estudiar este subproceso de flotación. La composición química del carbón activado incluye C, H, O y N, en donde el contenido de C > 88%. Los resultados de la red estructural del carbono activado se muestran en la Figura 2a, los resultados indicaron la formación de macroporos (entre 1 y 10 μm). La función de densidad describe un comportamiento multimodal, sin embargo, en $d = 8 \mu\text{m}$ y $9 \mu\text{m}$ se observa la mayor concentración de poros medidos. Estos resultados permiten conjeturar que la flotabilidad del carbón activado presentará serias limitaciones (Mao, 2020). En el contexto anterior Xia y col. (2021) estudiaron la aplicación de oleato de sodio (NaOL) en el proceso de humectación de poros de carbón activo. A través de técnicas analíticas como ^1H LF-NMR y FTIR los autores reconocieron que altas concentraciones de NaOL retarda y/o previene el proceso de humectación, sobre todo en la escala de macroporos.

Los autores demostraron que el ángulo de contacto (máximo) incrementó de 86° a 108° (en un tiempo de humectación de 0 a 10 min.) para soluciones de 0 y 10,000 mg/L de NaOL, respectivamente. La solución con alta concentración NaOL mejoró significativamente la hidrofobicidad del carbón activado. La influencia de la concentración del reactivo también se refleja en los resultados de adhesión burbuja-partícula. Al respecto, la Figura 2a ilustra cualitativamente el tamaño del aglomerado en el tiempo 0 (min.) para la concentración de 0 y 10,000 mg/L de NaOL. Por lo tanto, el control sobre la humectación de los poros conduce al fortalecimiento y comprensión del proceso de flotación de materiales y/o minerales porosos.

El Caso de Estudio 2 (Chen y col., 2017) describe la importancia de los cambios en la estructura química y la morfología superficial que produce la oxidación del carbón de bajo rango. Los autores estudiaron las propiedades superficiales y su papel en la flotación; particularmente cambios en la estructura química y morfología superficial. Chen y col. (2017) deliberadamente oxidaron el carbón con una solución de H_2O_2 , el grado de oxidación quedó definido de acuerdo con la concentración de H_2O_2



aplicada. Las propiedades superficiales se analizaron a través de XPS (y otras técnicas como FTIR, BET y SEM) asimismo, se desarrollaron pruebas de flotación (asimismo, pruebas de tiempo de inducción y ángulo de contacto) para analizar la flotabilidad del carbón oxidado.

Los resultados de XPS indicaron que la composición química del carbón de bajo rango antes del proceso de oxidación es de C1s = 70.62 % (O1s = 23.17 %). Después de la oxidación con 30, 40 y 50 w/t % H₂O₂ la composición química cambió a C1s= 69.83 % (O1s=23.99 %), C1s= 68.99 % (O1s= 24.65 %) y C1s= 68.08 % (O1s= 25.46 %) respectivamente. Los resultados de los cambios que experimentan las redes estructurales se muestran en la Figura 2b. Los resultados indicaron la presencia de macroporos (entre 1 y 10 μm) y la presencia de grietas que incrementan en el orden 30 w/t % < 40 w/t % < 50 w/t % H₂O₂ (longitud de las grietas incrementó de 140 a 285 μm ; ancho de las grietas incrementó de 2 a 16 μm). La función de densidad describe un comportamiento multimodal, también se observa que a medida que incrementa el grado de oxidación la función de densidad indica que la porosidad incrementa (tanto en el tamaño como en el número de poros). Los autores concluyen que a medida que incrementa la oxidación la superficie de la partícula de carbón pierde grupos hidrofóbicos (i.e., C1s disminuye de 70.62 % a 68.08 %). Esta condición se refleja notablemente en la flotabilidad del carbón al observar que el ángulo de contacto disminuye de 99° (antes del proceso de oxidación) a 74°, 70° y 69° para 30, 40 y 50 w/t % H₂O₂, respectivamente. Asimismo, el rendimiento metalúrgico del proceso de flotación se ve limitado, la recuperación de combustible disminuye de 72 % (antes del proceso de oxidación) a < 10 % para todas las condiciones de oxidación que se experimentaron.

El Caso de Estudio 3 (Mao y col., 2019) describe la importancia de las arcillas en la flotación del carbón de bajo rango. El fenómeno describe que la superficie de los minerales arcillosos (que normalmente se presentan en tamaños ultrafinos < 10 μm) tienen carga negativa natural, cuyo efecto al tener contacto con las partículas de carbón (>150 μm) se fortalece la fuerza electroestática entre ellas (fuerzas de atracción). El resultado de esta interacción es la formación de una capa delgada de arcilla sobre la superficie de las partículas de carbón, alterando la textura, reduciendo la hidrofobicidad e intensificando la porosidad de las partículas de carbón. Al respecto, Mao y col. (2019) indican que la aplicación del ultrasonido, a través de la cavitación produce un efecto mecánico que representa una importante estrategia para mejorar el rendimiento de la flotación de carbón fino. El efecto mecánico



producido elimina la capa de arcilla e incluso la capa de óxido de la superficie del carbón. Esta acción permite restablecer las propiedades hidrofóbicas a la superficie de las partículas de carbón. Asimismo, la cavitación genera una gran cantidad de microburbujas que actúan como puente entre las partículas y las burbujas de aire del proceso (de flotación). Los resultados de la Figura 2c muestran que la red estructural de los minerales que forman poros cambia por efecto del ultrasonido, los resultados ilustran el antes y el después del tratamiento. En términos generales se reconoce la presencia de macroporos entre 1 y 10 μm . No obstante, después de la aplicación del ultrasonido en la red estructural se observa que la formación de poros disminuye considerablemente. Este cambio también se reconoce en la composición química de la superficie de las partículas de carbón a través de los resultados de XPS. Antes del tratamiento de ultrasonido C1s = 89.01 % (O1s = 8.83 %), después del tratamiento en un rango de frecuencia entre 20 y 40kHz la composición química cambió a C1s= 91.08 % (O1s=7.09 %). Estos cambios se relacionan con importantes fundamentos de la flotación como la hidrofobicidad y selectividad. Asimismo, se manifiestan en la operación en términos del consumo de reactivos de flotación y estabilidad de la zona de espuma.

El Caso de Estudio 4 (Jeldres y col., 2019) describe la importancia de las arcillas en la flotación de minerales de cobre, particularmente la caolinita y bentonita. Al respecto los resultados de la Figura 2d demuestran que estos minerales en sus redes estructurales forman macroporos en el rango de 1 a 10 μm . Para el caso de la bentonita se observa una cantidad considerable de poros en el rango de 8 a 10 μm . Mientras que la caolinita presenta su mayor presencia en el rango de 5 a 8 μm . En ambos casos se observa un comportamiento multimodal. La composición química de la bentonita se caracteriza por 63 wt. % de montmorillonita, 25 wt. % de albita y 12 wt. % de cuarzo. La caolinita por su parte se presenta en 85 wt. % con 4wt.% de cuarzo y 11wt. % moscovita. Jeldres y col. (2019) indican que los depósitos minerales con un alto contenido de arcilla, por ejemplo, la bentonita y/o caolinita representan un importante desafío para las operaciones de flotación. Un alto contenido de arcilla incrementa la viscosidad de la pulpa y la define como un fluido no newtoniano. Bajo esta condición disminuye la frecuencia de colisiones burbuja-partícula y la dispersión de las burbujas. La estrategia más común para enfrentar este reto es la adición de reactivos que modifican la reología de la pulpa, sin embargo, los costos de operación incrementan. Asimismo, las arcillas consumen colector y recubren la superficie del mineral valioso a través de un fenómeno conocido como efecto de recubrimiento



(equivalente al fenómeno que se presentó en el Caso de Estudio 3 de Mao y col. (2019)).

Otra preocupación importante es el arrastre de las arcillas a la corriente de concentrado, fenómeno que se conoce como arrastre de minerales ganga. Dado el tamaño ultrafino ($<30\mu\text{m}$) de las arcillas fácilmente son arrastradas por la película de fluido intersticial entre las burbujas de aire que forman la capa de espuma. En la flotación de cobre y plomo se ha observado que la recuperación de minerales ganga no metálica se ve notablemente influenciada por la presencia de arcillas.

APLICACIÓN

Caso de estudio 5. El trabajo de Carrizales Méndez y col. (2021) es un caso de estudio de la industria minero-metalúrgica del noreste de Coahuila. La investigación describe la problemática sobre la baja recuperación de un circuito de flotación. El estudio se realizó en la planta de preparación de carbón industrial del municipio de Múzquiz, Coahuila. La planta ha procesado carbón de minas locales durante los últimos treinta años. Sin embargo, una baja recuperación de carbón caracteriza el rendimiento del circuito de flotación, particularmente del banco de celdas primario con una recuperación $< 50\%$ ($\pm 5\%$).

Carrizales Méndez y col. (2021) revelaron que el bajo rendimiento metalúrgico del banco de celdas fundamentalmente se debe al tamaño de las partículas de carbón. Los autores reconocieron la presencia de partículas de carbón entre 3 y $67\mu\text{m}$ en las corrientes de alimentación, concentrado y colas del banco de celdas (para sistemas de flotación el tamaño de partícula óptimo oscila entre 50 y $250\mu\text{m}$). Asimismo, reportaron que las partículas en el concentrado son más grandes (media de $25\mu\text{m}$) en comparación con las partículas en la corriente de colas (media de $13\mu\text{m}$). Por lo tanto, debido al tamaño, las partículas de carbón que se procesan en el banco de celdas no desarrollan suficiente energía cinética para romper la película líquida y hacer contacto con las burbujas de aire (Wang, 2018). Esto significa que disminuyen las colisiones burbuja-partícula, en términos operacionales, este efecto se refleja en una baja recuperación. Carrizales Méndez y col. (2021) confirmaron esta observación y reconocieron que la recuperación del banco de celdas es del 51.02%. Un resultado que coincide con la tendencia histórica del circuito de flotación.



Sin embargo, después del procesamiento actual de la base de datos, se observa que en la superficie de las partículas de carbón las redes estructurales forman poros entre 5 y 10 μm en ambos productos (concentrado y colas), ver Figura 3. En promedio, los resultados indicaron que el tamaño de poro en las partículas del concentrado es 67 % menor en comparación con el tamaño de poro promedio en las partículas de la corriente de colas.

Otra diferencia notable es que, en el rango de 5 a 9.5 μm la cantidad de poros es sustancialmente mayor en la superficie de las partículas de colas. Por lo tanto, la flotabilidad de estas partículas se limita considerablemente por el efecto combinado del tamaño de partícula y de las redes estructurales que forman una gran cantidad de poros. Bajo esta condición la humectación es más intensa, entonces las partículas de carbón se hidratan y adquieren un carácter hidrófilo. Asimismo, no se descartan los efectos de otros factores como la oxidación y el recubrimiento (de la superficie de las partículas de carbón con partículas de minerales arcillosos).

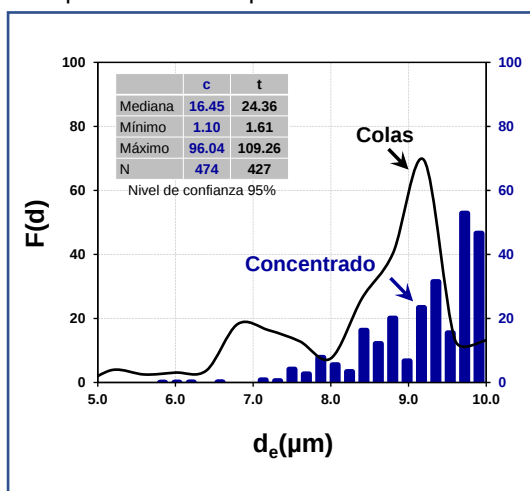


Figura 3. Redes estructurales que forman poros; partículas de carbón en la corriente de concentrado y colas del banco de celdas de flotación.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una revisión bibliográfica sobre la porosidad de diversos minerales y su importancia en la flotación de espuma. La revisión muestra y describe el impacto negativo de la porosidad en la flotación selectiva de minerales metálicos (e.g., CuFeS_2) y no metálicos (e.g., carbón). Asimismo, la revisión ofrece una visión general de las diversas estrategias técnicas que se han reportado en la literatura para disminuir y/o

controlar el efecto negativo de la porosidad en el contexto de la flotación de minerales.

Para fortalecer la revisión bibliográfica y profundizar en el análisis y discusión de la información se utilizó una rutina de análisis de imágenes. Con esta herramienta se logró desarrollar la discusión de cinco casos de estudio reportados en la literatura. El análisis de imágenes utilizado permitió fortalecer la comprensión de las alteraciones que ocurren en la superficie de las partículas y su relación con los fundamentos de la flotación de espuma (e.g., hidrofobicidad, flotabilidad, flotación verdadera, etc.).

REFERENCIAS

- Aksu, I., Bazilevskaya, E., & Karpyn, Z. T. (2015). Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability. *GeoResJ*, 7: 1–13.
- Atrafi, A., Gomez, C. O., Finch, J. A., & Pawlik, M. (2012). Frothing behavior of aqueous solutions of oleic acid. *Minerals Engineering*, 36–38: 138–144.
- Azañero Ortiz, A., Núñez Jara, P., Figueroa Loli, A., León Delgado, E., Fernández Salinas, S., Orihuela Salazar, R., Caballero Ríos, M., Bazán Reyes, R., & Yi Choy Aragón, S. (2002). Flotación de minerales oxidados de plomo. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 5(10): 34-43. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v5i10.757>
- Azizi, A., Masdarian, M., Hassanzadeh, A., Bahri, Z., Niedoba, T., & Surowiak, A. (2020). Parametric Optimization in Rougher Flotation Performance of a Sulfidized Mixed Copper Ore. *Minerals*, 10(8): 660. <https://doi.org/10.3390/min10080660>
- Batjargal, K., Guven, O., Ozdemir, O., Karakashev, S. I., Grozev, N. A., Boylu, F., & Çelik, M. S. (2023). Frothing Performance of Frother-Collector Mixtures as Determined by Dynamic Foam Analyzer and Its Implications in Flotation. *Minerals*, 13(2): 242. <https://doi.org/10.3390/min13020242>
- Caballero Garduño, P. (2022). Estado del arte sobre la electroflotación en celda [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000823964/3/0823964.pdf>
- Carrizales-Méndez, Y. N., López-Saucedo, F., Rodríguez Vega, A., Carillo Pedroza, F. R., Beltrán Cruz, J. M., & Batista Rodríguez, J. A. (2021). Análisis de la distribución de partículas ultrafinas en la flotación de carbón y su relación con las variables metalúrgicas: recuperación y contenido de cenizas. *CienciAcierta*, 65(enero-marzo): 139–152.



- Caudillo-Landeros, K. A., Jimenez-Jacobo, A. T., Palafox-Rivas, L., Torres-Villanueva, I., Delgadillo-Castañón, X. Y., Corona-Arroyo, M., & Salazar-Hernández, M. (2023). Uso del potencial zeta en la caracterización de superficies de adsorbentes (MS-Nx-Fe). *Jóvenes en la Ciencia*, 21: 1–6. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenla-ciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3948>
- Chambi Huanca, L. M. (2020). Optimización del proceso de flotación para la mejora de la recuperación de minerales plomosos [Tesis, Universidad Nacional del Altiplano de Puno].
- Chen, S., Tang, L., Tao, X., Chen, L., Yang, Z., & Li, L. (2017). Effect of oxidation processing on the surface properties and floatability of Meizhiyou long-flame coal. *Fuel*, 210: 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.053>
- Cook, B. K., & Gibson, C. E. (2023). A review of fatty acid collectors: Implications for spodumene flotation. *Minerals*, 13(2): 212. <https://doi.org/10.3390/min13020212>
- Cordeiro, P. F. O., Oliveira, C. G., Paniago, L. N., Romagna, G., & Santos, R. V. (2018). The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. *Ore Geology Reviews*, 101: 437–452. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.002>
- Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe Salas, A., Bello Teodoro, S., & Alonso González, O. (2022). Comportamiento de flotación y mecanismos de interacción entre minerales sulfurados. *Epistemos*, 15(31): 22–30. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i31.182>
- Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe-Salas, A., & Bello-Teodoro, S. (2021). Chemical stability of xanthates under different environmental conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207: 111509.
- Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe-Salas, A., & Nava-Alonso, F. (2020). Flotation studies of galena, cerussite, and anglesite. *Minerals Engineering*, 155: 106456.
- Foszcz, D., & Drzymała, J. (2011). Differentiation of organic carbon in Polish copper concentrates. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 47: 17–26.
- Gredelj, S., Zanin, M., & Grano, S. R. (2009). Selective flotation of carbon. *Minerals Engineering*, 22(3): 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.08.006>
- Hassanzadeh, A., Gholami, H., Özkan, S. G., Niedoba, T., & Surowiak, A. (2021). Effect of Power Ultrasound on Wettability and Collector-Less Floatability of Chalcopyrite, Pyrite and Quartz. *Minerals*, 11(1): 48. <https://doi.org/10.3390/min11010048>
- Hassanzadeh, A., Safari, M., Hoang, D. H., Khoshdast, H., Albijanic, B., & Kowalczyk, P. B. (2022). Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems. *Minerals Engineering*, 180: 107509. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107509>

- Huang, Z., Wang, G., Lei, Q., Liu, G., Fu, Y., Li, N., & Liu, J. (2022). Genetic Relationship between Mississippi Valley-Type Pb–Zn Mineralization and Hydrocarbon Accumulation in the Wusihe Deposits, Southwestern Margin of the Sichuan Basin, China. *Minerals*, 12(11): 1447. <https://doi.org/10.3390/min12111447>
- Izydorczyk, G., Mikula, K., Skrzypczak, D., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2021). Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. *Environmental Research*, 197: 111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
- Jeldres, R. I., Uribe, L., Cisternas, L. A., Gutiérrez, L., Leiva, W. H., & Valenzuela, J. (2019). The effect of clay minerals on the flotation of copper ores: A critical review. *Applied Clay Science*, 170: 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.01.013>
- Kemp Cañón, A. (2018). *Análisis crítico de las eficiencias en flotación* [Tesis de maestría, Universidad de Chile].
- Konieczny, A., Pawlos, W., Krzeminska, M., Kaleta, R., & Kurzydło, P. (2013). Evaluation of organic carbon separation from copper ore by pre-flotation. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii. Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49: 189-201. <https://doi.org/10.5277/ppmp130117>
- Krūmiņš, J., Kļaviņš, M., Ozola-Davidāne, R., & Ansone-Bērtiņa, L. (2022). Clay minerals for carbon capture. *Minerals*, 12(3): 349. <https://doi.org/10.3390/min12030349>
- Laskowski, J. S., & Yu, Z. (2000). Oil agglomeration of oxidized coals. *International Journal of Mineral Processing*, 58(1): 237–252.
- Liang, L., Tan, J., Li, B., & Xie, G. (2019). Reducing quartz entrainment in fine coal flotation by polyaluminum chloride. *Fuel*, 235: 150–157.
- Mao, Xia, W., Xie, G., & Peng, Y. (2019). Effects of pre-wetting time on surface topography and floatability of lignite particles. *Powder Technology*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.049>
- Mao, Z., Xia, W., Wang, D., & Yang, X. (2020a). Zero-conditioning flotation. *Minerals Engineering*, 152: 106366.
- Mao, Z., Xia, W., Wang, D., & Yang, X. (2020b). Wettability modification and its effect on lignite flotation. *Separation and Purification Technology*, 248: 117074.
- Mao, Y., Xia, W., Xie, G., & Peng, Y. (2020). Effects of pre-wetting time on surface topography and floatability of lignite particles. *Powder Technology*, 359: 1–7.
- Masdarian, M., Azizi, A., & Bahri, Z. (2020). Mechanochemical sulfidization in mixed sulfide-oxide copper ores. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(3): 743–748.

- Suárez, M., García-Rivas, J., Morales, J., Lorenzo, A., García-Vicente, A., & García-Romero, E. (2022). Review and new data on the surface properties of palygorskite: A comparative study. *Applied Clay Science*, 216: 106311. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106311>
- Midekessa, G., Godakumara, K., Ord, J., Viil, J., Lättekivi, F., Dissanayake, K., Kopanchuk, S., Rinken, A., Andronowska, A., Bhattacharjee, S., Rinken, T., & Fazeli, A. (2020). Zeta Potential of Extracellular Vesicles: Toward Understanding the Attributes that Determine Colloidal Stability. *ACS Omega*, 5(27): 16701-16710. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01582>
- Molina Ballesteros, E., García Talegón, J., & Alonso Gavilán, G. (2009). Papel de la porosidad en el proceso de silicificación del borde occidental de la cuenca terciaria del Duero. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22(3-4): 145-154.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (1996). *Applied statistics and probability for engineers*. Wiley.
- Pan, Z., Xiong, J., Cui, Y., Wei, Q., Jia, W., Zhang, Z., Jiao, F., & Qin, W. (2022). Effect mechanism of carbonaceous materials on the flotation separation of lead-zinc ore. *Separation and Purification Technology*, 294: 121101. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121101>
- Pugh, R., & Stenius, P. (1985). Solution chemistry and flotation of apatite. *International Journal of Mineral Processing*, 15(3): 193-218.
- Ran, J.-C., Qiu, X.-y., Hu, Z., Liu, Q.-J., Song, B.-X., & Yao, Y.-Q. (2019). Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. *Powder Technology*, 344: 654-664. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.045>
- Retamal, J. I., Robles, P. A., Quezada, G. R., & Jeldres, R. I. (2024). Molecular Design and Spodumene Flotation—A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6): 3227. <https://doi.org/10.3390/ijms25063227>
- Rosas Licon, P. M., Badillo Morales, A. G., Cerna Cortez, J. R., & Alatraste Bueno, V. G. S. (2024). Fisicoquímica de Superficies: la Ciencia de los Materiales Porosos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5): 7307-7324. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14148
- Sánchez, F. G., Solís, R. P., Partida, E. G., & Camprubí, A. (2007). Estratigrafía del noreste de México y su relación con yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1): 43-62.
- Shen, J., Xia, W., Mao, Z., Wang, D., & Yang, X. (2020). Effect of pore size on wetting. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 601: 124997.

- Shu, K., Xu, L., Wu, H., Peng, L., Xu, Y., Luo, L., Yang, J., & Tang, Z. (2020). In situ adsorption of mixed collectors BHA/DDA in spodumene-feldspar flotation system. *Separation and Purification Technology*, 251: 117325. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117325>
- Szmigiel, A., Apel, D.B., Skrzypkowski, K., Wojtecki, L. y Pu, Y. (2024). Avances en aprendizaje automático para un rendimiento óptimo en procesos de flotación: Una revisión. *Minerals*, 14 (4): 331. <https://doi.org/10.3390/min14040331>
- Tabatabaei, R. H., Nagaraj, D. R., Vianna, S. M. S. M., Napier-Munn, T. J., & Gorain, B. (2014). The effect of non-sulphide gangue minerals on the flotation of sulphide minerals from Carlin-type gold ores. *Minerals Engineering*, 60: 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.02.004>
- Uribe, R., Camillo, F., & Lascano, L. (2021). Minerales arcillosos: propiedades, clasificación y aplicaciones. *InfoANALÍTICA*, 9(2): 15–57. <https://doi.org/10.26807/ia.v9i2.202>
- Wang, G., Bai, X., Wu, C., Li, W., Liu, K., & Kiani, A. (2018). Recent advances in the beneficiation of ultrafine coal particles. *Fuel Processing Technology*, 178: 104–125.
- Xie, G. Mao, Y., Xia, W., & Peng, Y. (2022). Dynamic pore wetting and its effects on porous particle flotation: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(6): 1365-1378. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.09.014>
- Xie, R., Zhu, Y., Liu, J., & Li, Y. (2021). Flotación y adsorción de un nuevo colector catiónico. *Separation and Purification Technology*, 264: 118445.
- Xing, Y., Gui, X., Karakas, F., & Cao, Y. (2017). Role of collectors and depressants in mineral flotation. *Minerals*, 7(11), 223. <https://doi.org/10.3390/min7110223>
- Zhang, H., Du, M., Hu, H., Zhang, H. y Song, N. (2024). Revisión del tratamiento ultrasónico en la flotación de minerales: Mecanismo y desarrollo reciente. *Molecules*, 29 (9): 1984. <https://doi.org/10.3390/molecules29091984>
- Zhu, Z., Yin, W., Wang, D., Sun, H., Chen, K., & Yang, B. (2020). The role of surface roughness in the wettability and floatability of quartz particles. *Applied Surface Science*, 527: 146799. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146799>