

## Estrategias para la remoción de calcio y magnesio de las aguas del proceso de flotación de sulfuros complejos

SANDRA DANIELA OJEDA-VILLEGAS<sup>1</sup>, ALEJANDRO URIBE-SALAS<sup>2</sup>, NOEMÍ ORTIZ-LARA<sup>3</sup>

### RESUMEN

**La minería está estrechamente relacionada con el uso del agua, ya que es fundamental para la operación de sus procesos. En respuesta a la necesidad de preservar este recurso, se han desarrollado prácticas para reducir el consumo de agua fresca en los procesos de flotación. Sin embargo, el aumento en el uso de agua reciclada en la flotación, en ocasiones tiene efectos negativos en la recuperación del mineral valor y en la ley del concentrado obtenido. Los efectos adversos observados se traducen en la disminución de la selectividad y rendimiento, por la presencia de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en las aguas de reciclaje. En el presente artículo se revisan algunas técnicas de tratamiento que pueden ser aplicables al agua de reciclaje en la flotación de minerales de sulfuro.**

**Palabras clave:** Minería, Flotación de minerales, Tratamiento de agua.

<sup>1</sup>M.C. Sandra Daniela Ojeda Villegas, CINVESTAV IPN, Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica 1062 Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe, C.P. 25900, Ramos Arizpe, Coah., México. [Sandra.ojeda@cinvestav.edu.mx](mailto:Sandra.ojeda@cinvestav.edu.mx), <https://orcid.org/0000-0003-1557-435X>

<sup>2</sup>Dr. Alejandro Uribe Salas, CINVESTAV IPN, Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica 1062 Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe, C.P. 25900, Ramos Arizpe, Coah., México. [Alejandro.uribe@cinvestav.edu.mx](mailto:Alejandro.uribe@cinvestav.edu.mx), <https://orcid.org/0000-0003-4549-9557>

<sup>3</sup>Dra. Noemí Ortiz Lara, Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, [nortiz@umich.mx](mailto:nortiz@umich.mx), <https://orcid.org/0000-0002-3545-4059>.

**Autor de Correspondencia:** Sandra Daniela Ojeda Villegas ([sandra.ojeda@cinvestav.edu.mx](mailto:sandra.ojeda@cinvestav.edu.mx))

**Recibido:** 19 / 04 / 2024

**Aceptado:** 17 / 10 / 2024

**Publicado:** 10 / 12 / 2024

#### Cómo citar este artículo:

Ojeda Villegas, S. D., Uribe Salas, A., & Ortiz Lara, N. (2024). Estrategias para la remoción de calcio y magnesio de las aguas del proceso de flotación de sulfuros complejos. *EPISTEMUS*, 18(37), e3706377. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i37.377>

## Strategies for the removal of calcium and magnesium from waters in the flotation process of complex sulfides.

### ABSTRACT

*Mining is closely related to the use of water, as it is essential for the operation of its processes. In response to the need to preserve this resource, practices have been developed to reduce the consumption of fresh water in the flotation processes. However, the increased use of recycled water in flotation sometimes has negative effects on both the recovery of valuable minerals and grade of the obtained concentrate. The adverse effects observed result into decreased selectivity and yield due to the presence of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  ions in the recycled waters. This article reviews some treatment techniques that may be applicable to recycling water in the flotation of sulfide minerals.*

**Key words:** Mining, Mineral flotation, Water treatment.





## Introducción

El mundo moderno no podría ser como es ahora sin la minería. Hoy en día, la mayoría de los bienes y objetos que nos rodean tiene su origen en los minerales del subsuelo. Estos minerales se utilizan de diversas maneras en la sociedad, como en la elaboración de las diversas herramientas tecnológicas, desde la punta del lápiz de grafito hasta las baterías de los autos. La importancia de la minería radica en que provee de materias primas a gran parte de las otras industrias.

La fase de extracción de metales se lleva a cabo a través de procesos de beneficio y de transformación. El beneficio de minerales, que incluye las etapas de lavado, trituración, molienda, y concentración, utiliza el agua como medio de transporte y procesamiento. La concentración de minerales por flotación es uno de los procesos más importantes por su versatilidad y selectividad. Sin embargo, consume una gran cantidad de agua: esta representa entre el 80-85 % del volumen (50 % w/w considerando un mineral de densidad  $4 \text{ g/cm}^3$ ) de la pulpa mineral procesada en los circuitos de molienda y flotación [1], [2]-[5]. Es evidente que el uso del agua en las unidades mineras debe mejorarse con la implementación de buenas prácticas que permitan la reducción del volumen de agua utilizado, así como la aplicación de técnicas amigables con el medio ambiente para proteger las fuentes de agua presentes y para futuras generaciones [6], [7].

Por lo anterior, es urgente buscar estrategias para el uso sustentable del recurso hídrico en los procesos de beneficio. En el presente artículo se discuten algunas técnicas de tratamiento de efluentes industriales que pueden ser aplicables al agua de reciclaje en la flotación de minerales de sulfuro.



## PROBLEMÁTICA

La industria minera es una de las industrias que requiere de grandes cantidades de agua y también es una de las industrias que dispone una cantidad importante de sustancias nocivas en el medio ambiente, tales como cianuro, tiosales, surfactantes orgánicos y metales pesados. Debido a lo anterior, se han buscado medidas que ayuden a lograr un uso eficiente de los recursos hídricos. Un ejemplo de estas medidas es la aplicación de tratamientos de remoción de especies químicas específicas, que afectan adversamente la separación selectiva de los minerales con valor, de aquellos que constituyen la ganga, con el objetivo de hacer posible reciclar aguas al proceso de flotación de sulfuros complejos [1], [8]-[12]. Cabe señalar que las aguas de proceso comúnmente contienen altas concentraciones de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , que alteran la química del agua fresca, lo cual impacta de forma negativa el proceso [10], [13], [14]. Bajo las condiciones del proceso, las especies mencionadas forman complejos que se adhieren a la superficie del mineral de interés, lo cual afecta la selectividad y, por ende, su recuperación [10], [14], [15]. El tratamiento de aguas de proceso y su recirculación es una alternativa sustentable. Sin embargo, resulta complejo tratar el agua de proceso y al mismo tiempo tener en cuenta que la flotabilidad del mineral de interés no debe verse afectada.

### Tratamientos de aguas de proceso

#### Objetivos y principios del reúso de aguas

El reciclaje de agua en la industria de procesamiento de minerales tiene dos objetivos principales:

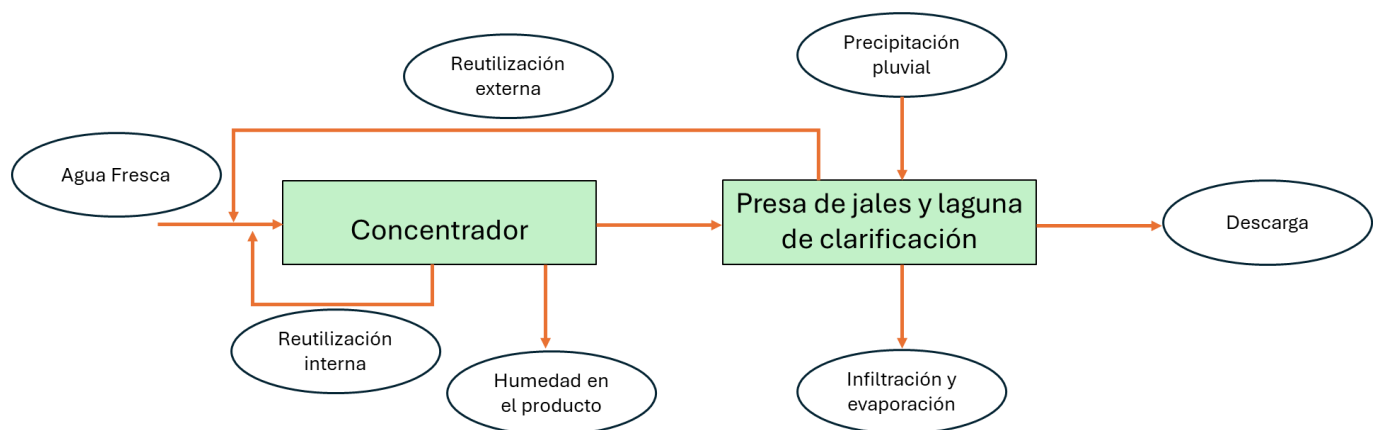
- 1) Reducir la demanda de agua fresca, lo que implica algunas cuestiones ambientales y económicas. Algunas minas se encuentran a grandes distancias de cuerpos de agua dulce,



por lo que es necesario utilizar el agua de los mantos acuíferos de la región, lo cual es un problema debido al impacto en la reducción de disponibilidad de agua de la localidad. Otra alternativa de la industria minera para obtener agua fresca es transportarla, lo cual resulta costoso [3], [16-18].

- 2) Reducir el volumen de los desechos contaminantes que resultan de los procesos de la industria minera [10], [14], [16].

En la Figura 1 se presenta un diagrama general del flujo de agua en una planta típica de procesamiento de minerales. En el diagrama se puede observar que el agua recuperada del concentrador puede ser reciclada y mezclada con el agua fresca; a esta alternativa se le denomina reutilización interna. Por su parte, la reutilización externa consiste en la reutilización de agua acumulada en la presa de jales, donde los sólidos se separan mediante el proceso de asentamiento natural [16].



**Figura 1. Diagrama general del flujo de agua en una planta típica de procesamiento de minerales. Adaptado de Rao and Finch, 1989 [16].**

Existen plantas de procesamiento de minerales que reciclan su agua de proceso utilizando diferentes estrategias. Por ejemplo, la compañía minera de Guemassa en Marruecos (en 2019)

[19] produce tres concentrados a partir de un mineral de sulfuros complejos. En la planta el proceso de flotación el agua se recicla según sus efectos en las reacciones en la superficie mineral: las aguas de plomo y cobre se reutilizan en estas dos unidades, mientras que el agua del proceso del circuito de zinc se reutiliza solo en dicho circuito. De esta manera, se busca que el agua reciclada no tenga impacto en la eficiencia del proceso. Por razones económicas y la escasez de agua debida a la geografía (es un país semiárido), la gestión del agua de proceso es crucial. El consumo global diario de agua en la planta es de 4700 m<sup>3</sup>, solo el 25 % se recicla de las presas de jales, el resto es agua fresca [19].

Por otro lado, concentradores de América del Norte emplean agua de sus tanques espesadores (agua tratada de los jales lo suficientemente limpia para ser liberada al medio ambiente) para el proceso de molienda. En ese sentido, en [20] se estudiaron los efectos del reciclaje de agua en proceso de flotación con la finalidad de aumentar la recirculación del agua del tanque espesador y reducir el consumo de agua de proceso. Los resultados del estudio mostraron que se obtuvieron recuperaciones más altas de pirrotita (Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>) utilizando agua recirculada del tanque espesador. Se sugirió que el aumento en la recuperación de pirrotita con agua recirculada podría ser consecuencia de la presencia de sólidos disueltos (e.g., fuerza iónica del agua), ya que estos sólidos aumentan el flujo de área superficial de burbujas y generan burbujas más pequeñas.

En otro ejemplo, la mina Boliden Kevitsa en Finlandia realiza investigaciones para desarrollar un enfoque de gestión de agua en el procesamiento de minerales, con el objetivo de aumentar la sustentabilidad y la rentabilidad en sus operaciones. La mina consiste en un concentrador de cobre, níquel y elementos del grupo del platino, y recicla el 90-95 % de su agua para su reuso en la planta. Sin embargo, el uso de dicha agua reciclada influye directamente en el proceso porque





la calidad del agua se deteriora con la acumulación de especies como Ca, Na, Mg, K,  $\text{SO}_4^{2-}$ , entre otros reactivos presentes en ella. En este sentido, la investigación se centró en el monitoreo del xantato (colector) en el agua de proceso, con el fin de evaluar una posible reducción de este reactivo. Un menor consumo de reactivos para el concentrador de Kevitsa significa una reducción del impacto ambiental y ahorro en costos asociados con la operación de la planta [21].

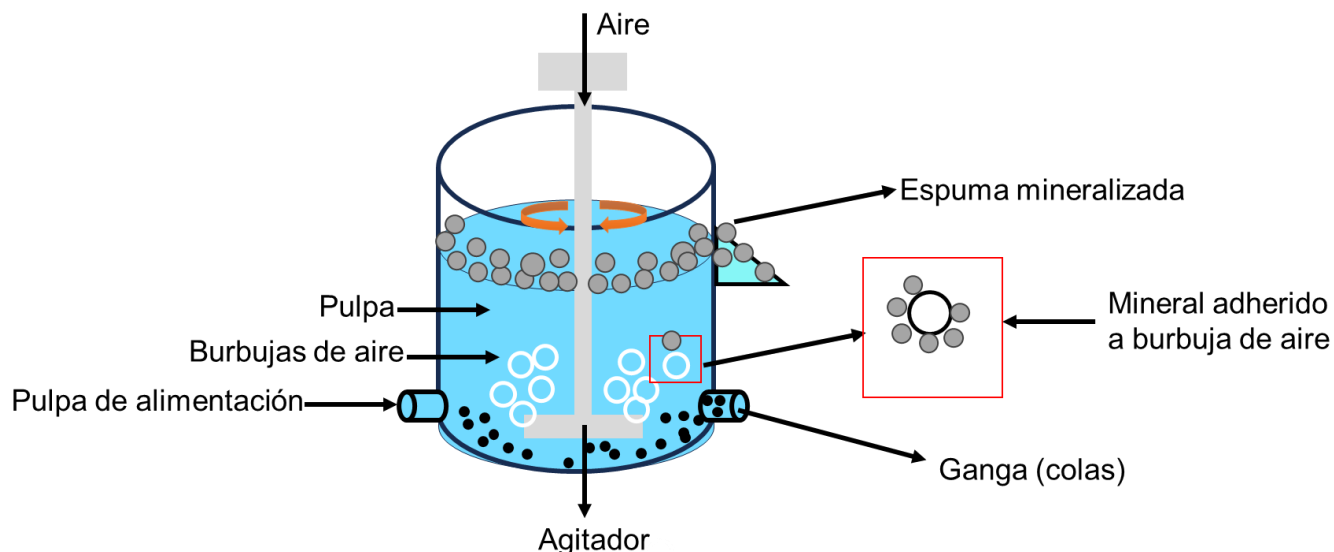
### **PRINCIPIOS DE LA CONCENTRACIÓN DE MINERALES MEDIANTE FLOTACIÓN**

La flotación es uno de los procesos de concentración más eficaces para la separación de minerales. Se utiliza para procesar la mayoría de los minerales sulfuro y su uso se extiende también para los minerales metálicos no sulfuros y los minerales industriales [22]. La flotación es un proceso muy selectivo que utiliza las diferencias entre las propiedades químicas y físicas de los minerales de interés y de la ganga o estériles [23]. La teoría de la flotación es compleja debido a que involucra tres fases (sólido, agua y gas, usualmente aire), con muchos subprocesos e interacciones. La adhesión del mineral de interés a las burbujas de aire es el mecanismo más importante y esto representa la mayoría de las partículas que se recuperan en el concentrado (la minoría se recuperan por arrastre).

En la Figura 2 se ilustra el principio de flotación en una celda mecánica de flotación. El agitador genera turbulencia en la pulpa mineral con el objetivo de ocasionar una colisión entre las partículas minerales y las burbujas de aire, lo cual permite la adhesión del mineral de interés, el cual es transportado a la superficie para ser recuperado en forma de una espuma, dejando la ganga en la pulpa (colas). La flotación es un proceso muy selectivo y utiliza una gran variedad de reactivos para lograrlo (espumantes, colectores, depresores, reguladores y activadores) [24]. Estos



reactivos son seleccionados de acuerdo con las propiedades del mineral de interés y del proceso de la planta.



**Figura 2. Diagrama esquemático de una celda mecánica de flotación que ilustra el principio de la flotación.**

## COMPOSICIÓN DEL AGUA DE PROCESO EN PLANTAS DE FLOTACIÓN DE MINERALES DE SULFURO

El agua de proceso en los circuitos de flotación típicos contiene una variedad de iones metálicos que pueden introducir efectos indeseables, tales como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  [12], [25]. La concentración de estos iones varía de acuerdo con la ubicación de la planta, el mineral que procesan y algunas otras condiciones; sin embargo, el calcio y el magnesio son dos de los iones que se encuentran típicamente en las aguas de proceso [9], [12], [26]. El calcio presente en las aguas de proceso se debe al uso de cal ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para modificar y regular el pH [2], [27]; mientras que la presencia de magnesio se debe a la existencia de algunos minerales que lo







contienen, tales como la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) y brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), los cuales son ligeramente solubles en soluciones acuosas [2], [4], [8], [9].

La Tabla 1 muestra las concentraciones de calcio y magnesio reportadas en aguas de proceso de diferentes plantas, en distintos países.

**Tabla 1 Concentración de calcio y magnesio de las aguas de proceso en algunas plantas concentradoras de sulfuros.**

Planta	Concentración (mg/L)		Referencia
	Calcio	Magnesio	
Louvicourt, Canadá.	1245	55	[26]
Selbaine, Canadá.	565	95	
HBM&S, Canadá.	661	28.8	
Westmin, Canadá.	615	70	
Balya, Turquía.	507	81	[10]
Harmony, Sudáfrica.	613	147	[28]
Nickel Rim, Canadá.	690	-	[29]
Kristineeberg, Suecia.	511	-	[30]

El efecto del calcio y el magnesio en el proceso de flotación de minerales sulfuros complejos ha sido estudiado previamente. Los resultados han sugerido que estos iones metálicos tienen un efecto adverso, ya que disminuyen la recuperación y selectividad de la flotación de minerales sulfuro como la galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), entre otros [2], [9-11], [26], [27], [30], [31]. Estos efectos adversos podrían ser la consecuencia de que algunas especies de calcio y magnesio precipitan en forma de hidróxidos sólidos sobre la superficie de los minerales, donde se adhieren sin formar enlaces químicos; o bien, se adsorben en forma de



complejos hidroxos sobre sus superficies, con lo que establecen enlaces químicos con las superficies minerales [10], [14].

Las principales especies de calcio y magnesio encontradas en el rango de pH típico de la flotación (entre 6 y 12) son en forma de ion hidroxos e hidróxido, con la posibilidad de precipitar como carbonatos y sulfatos. Estas especies son hidrofílicas, por lo que tienden a deprimir la flotación: compiten por los sitios activos o bloquean la adsorción del colector, un reactivo crucial en la flotación que favorece la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire [32]. Como consecuencia, varios investigadores han explorado técnicas para eliminar los iones de calcio y magnesio del agua de proceso, con el objetivo de evitar la depresión del mineral de interés y mejorar la eficiencia del proceso de flotación.

### **TÉCNICAS DE TRATAMIENTO UTILIZADAS PARA LA REMOCIÓN DE CALCIO Y MAGNESIO DE LAS AGUAS DE PROCESO**

En el tratamiento de agua residual de las operaciones mineras, es crucial eliminar o reducir los iones metálicos y compuestos orgánicos, ya que imponen riesgos potenciales tanto para la producción industrial como para el ecosistema. Estos elementos también son responsables de gran parte de los problemas durante el proceso de flotación cuando se utilizan aguas de reciclo, además de provocar incrustaciones severas en los equipos y tuberías. Las técnicas principales de tratamiento incluyen principalmente la precipitación química, la ósmosis inversa, la electrodiálisis, el intercambio iónico y la precipitación electroquímica. La precipitación química es la técnica más comúnmente empleada debido a su versatilidad y rapidez de aplicación. Por otro lado, la precipitación electroquímica ha despertado interés recientemente por ser amigable con el





medio ambiente y por tener una tasa de reacción rápida [33]. Las técnicas más importantes y utilizadas en la industria minera se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Resumen de técnicas para el tratamiento de agua de proceso. Adaptado de Rao and Finch, 1989 [16].**

Técnica	Aplicación	Ventajas	Desventajas
Adsorción en la interfase líquido-gas.	Remoción de compuestos orgánicos tensoactivos (sulfatos de alquilo).	Operación sencilla; el concentrado puede ser recirculado.	Requiere celdas especiales y poco convencionales.
Adsorción mediante carbón activado	Remoción de compuestos orgánicos.	Eficaz en la eliminación de orgánicos en una sola etapa; los adsorbentes pueden ser reciclados.	Necesita unidades especiales para la regeneración del carbón o la deshumidificación.
Precipitación química.	Remoción de iones metálicos y algunos compuestos orgánicos.	Proceso rápido.	Requiere un control preciso del precipitante para evitar problemas.
Oxidación química (ozonación).	Oxidación de compuestos orgánicos de alto peso molecular a moléculas más simples.	La mayoría de los compuestos orgánicos son oxidados; técnicas de fácil manipulación.	Costosa debido al uso de ozono y la necesidad de equipamiento especializado.
Resinas de intercambio iónico.	Remoción de especies iónicas.	Las resinas pueden ser regeneradas en un proceso continuo con columnas.	Costosa y requiere una infraestructura para la regeneración.
Precipitación electroquímica	Remoción de iones metálicos	Proceso rápido y sustentable; útil para grandes volúmenes de agua.	Costoso por su consumo de electricidad

La remoción de calcio y magnesio ha sido objeto de estudio por parte de diversos investigadores, quienes han empleado una variedad de técnicas para este fin. Aunque la precipitación química es ampliamente utilizada debido a su rapidez y versatilidad, es crucial realizar un análisis cinético y termodinámico para determinar los reactivos adecuados que actúen como precipitantes, ya que

las especies que precipitan no deben interferir con la flotación de los minerales valiosos. La Tabla 3 presenta los resultados de varias investigaciones sobre la remoción de calcio y magnesio.

**Tabla 3. Resumen de estudios sobre la remoción de calcio y magnesio.**

Técnica	Resultados-Ventajas	Referencia
Remoción de calcio y magnesio mediante $\text{CO}_2$	La concentración de calcio se redujo de 400 mg/L a 134 mg/L y la de magnesio de 1250 mg/L a 75 mg/L. Esta técnica muestra una reducción efectiva de ambos iones.	[34]
	La remoción de $\text{Ca}^{2+}$ en las aguas residuales fue aproximadamente del 50 %. Esta técnica es relativamente sencilla y puede ser aplicada en sistemas de tratamiento de agua.	[35]
Remoción de calcio y magnesio con la adición de $\text{Na}_2\text{CO}_3$	La concentración de calcio se redujo de 400 mg/L a 176 mg/L y la de magnesio de 1280 mg/L a 190 ppm. Esta técnica es eficaz para grandes concentraciones de iones.	[36]
	Se logró remover hasta el 90 % de calcio en solución, mostrando una alta eficiencia en la reducción de calcio mediante el uso de carbonato de sodio.	[4]
	Disminución de 77.5 % en los iones de calcio y 66.67 % en los iones de magnesio, indicando un buen desempeño del $\text{Na}_2\text{CO}_3$ para la reducción de ambos iones.	[37]
Remoción de calcio mediante la adición de $\text{CaO}$	Se logró remover el 80 % del calcio originalmente presente en la solución saturada (640 mg/L), formando etringita. Esta técnica es efectiva para altas concentraciones de calcio.	[15]
Remoción de calcio y magnesio mediante la adición de fosfatos	La remoción de magnesio alcanzó el 97 % con la adición de fosfato de sodio, mostrando una alta eficiencia en la eliminación de magnesio	[38]
	La concentración de calcio se redujo de 641 mg/L a 0.1 mg/L, con la formación de hidroxiapatita como sólido precipitado. Esta técnica es muy efectiva para aguas saturadas de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	[13]
Remoción electroquímica	La remoción electroquímica de los iones de calcio y magnesio de soluciones acuosas es posible mediante la precipitación de calcita y brucita.	[39]
	La remoción electroquímica es una opción viable para la eliminación de calcio y magnesio en soluciones acuosas, ofreciendo un método sustentable.	[33]





De entre las técnicas mencionadas en la Tabla 3 para la remoción de los iones calcio y magnesio, la precipitación de estos iones utilizando como precipitante carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ha sido ampliamente estudiada y utilizada, porque se ha observado que tiene un efecto positivo en la flotación de algunos sulfuros complejos. Por ejemplo, Uribe-Salas and Espinosa-Gómez, 2010 [40] estudiaron el uso del carbonato de sodio en las aguas de alimentación de molinos de la Unidad Sabinas del Grupo Peñoles. En pruebas de laboratorio se demostró que la adición de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  mejoraba la flotación de cobre y zinc [41]. Levay et al., 2001 [1] también estudiaron la remoción de Ca y Mg en solución en pruebas de planta. El análisis de las soluciones remanentes mostró que la concentración de calcio y magnesio disminuye con la adición de altas concentraciones de carbonato de sodio. Grano et al., 1995 [11] estudiaron la adición de carbonato de sodio al circuito de molienda del concentrador Hilton en Australia. Se encontró que la velocidad de flotación se incrementó con la adición de carbonato de sodio, aparentemente debido a la eliminación del sulfato de calcio que interfiere. Sin embargo, a pesar de los diferentes estudios realizados, hasta este momento aún no se ha reportado una razón fundamental que explique el comportamiento observado en distintas investigaciones. Por lo anterior, es necesario que la investigación continúe hasta determinar los mecanismos de reacción que ocurre entre los iones metal-carbonato, así como los mecanismos de interacción entre los minerales valor y los precipitados eventualmente formados.

## CONCLUSIÓN

El tratamiento y reciclaje de las aguas de flotación en la industria minera es crucial para reducir el alto consumo de agua fresca. Se ha demostrado que el reciclaje del agua utilizada en la flotación



puede ser benéfico para la conservación de los recursos hídricos locales, pero también puede alterar la química de la pulpa mineral y afectar negativamente el rendimiento de la flotación. Sin embargo, mediante el uso de técnicas de tratamiento adecuadas, es posible reducir significativamente la concentración de impurezas inorgánicas y orgánicas en el agua reciclada, lo que mejora la recuperación del mineral valioso y la ley de los concentrados obtenidos. Por lo tanto, es fundamental implementar estrategias efectivas de tratamiento de agua reciclada en las plantas de flotación, a fin de garantizar operaciones mineras más eficientes y sostenibles en el futuro.

## Referencias

- [1] G. Levay, R. S. C. Smart y W. M. Skinner, "The impact of water quality on flotation performance," *The journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. marzo/abril, pp. 69-75, 2001.
- [2] S. D. Ojeda-Villegas y A. Uribe-Salas, "Remoción de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  de las aguas de flotación de sulfuros complejos mediante la adición de carbonato de sodio," *Epistemus*, vol. 17, pp. 124-1831, 2023, DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.255>.
- [3] C. Moraga, W. Kracht y J. M. Ortiz, "Water consumption assessment in mineral processing integrating weather information and geometallurgical modeling," *Minerals Engineering*, vol. 201, 108162, 2023/10/01/ 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108162>
- [4] S. D. Ojeda Villegas, A. Uribe-Salas, G. Pérez, Roberto y M. Elizondo-Álvarez, "A kinetic and thermodynamic study of the removal of calcium and magnesium from aqueous solutions similar to those of complex sulphide flotation by the addition of sodium carbonate," *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2023.2285587>.





- [5] L. M. Shengo, S. Gaydardzhiev y N. M. Kalenga, "Malachite and heterogenite behavior during the locked-cycled recycling of process water in flotation of copper-cobalt oxide ores," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 157, pp. 152-162, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2016.10.009>.
- [6] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Buenas prácticas para el uso del agua en la industria minera de México*. DOI: <https://doi.org/10.24850/b-imta-2021-02>
- [7] E. R. Bazúa-Rueda *et al.*, "Mining, Water and Society: Recycling of Mining Effluents as a Social Solution to the Use of Water in Mexico," in *Water Availability and Management in Mexico*, E. M. Otazo-Sánchez, A. E. Navarro-Frómeta y V. P. Singh Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 389-411. DOI: 10.1007/978-3-030-24962-5\_19.
- [8] G. I. Dávila-Pulido y A. Uribe-Salas, "Effect of calcium, sulphate and gypsum on copper-activated and non-activated sphalerite surface properties," *Minerals Engineering*, vol. 55, pp. 147-153, 6 octubre 2013-2014.
- [9] M. Sinche-Gonzalez y D. Fornasiero, "Understanding the effect sulphate in mining-process water on sulphide flotation," *Minerals Engineering*, vol. 165, pp. 1-10, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106865>.
- [10] G. Bulut y Ü. Yenial, "Effects of major ions in recycled water on sulfide minerals flotation," *Minerals & Metallurgical Processing*, vol. 33, pp. 137-143, 2016, DOI: <https://doi.org/10.19150/mmp.6750>.
- [11] S. R. Grano, P. L. M. Wong, W. Skinner, N. W. Johnson y J. Ralston, "Detection and control of calcium sulphate precipitation in the lead circuit of the Hilton concentrator of Mount Isa



- Mines Limited, Australia," *Proc. XIX International Mineral Processing Congress*, vol. 10, pp. 1139-1163, 1995.
- [12] G. I. Dávila-Pulido, A. A. González-Ibarra, M. Garza-García y D. A. Charles, "Effect of Magnesium on the Hydrophobicity of Sphalerite," *Minerals*, vol. 11, no. 12, DOI: 10.3390/min11121359.
- [13] E. Bustos-Flores, M. Elizondo-Álvarez y A. Uribe-Salas, "Thermodynamic and experimental studies on the removal of calcium and sulfate ions from recycling waters of complex-sulfide flotation operations.," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 31, pp. 3116-3127, 2021, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65720-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65720-5).
- [14] M. Ejtemaei, C. Plackowski y A. V. Nguyen, "The effect of calcium, magnesium and sulphate ions on the surface properties of copper activated sphalerite," *Minerals Engineering*, vol. 89, pp. 45-51, enero 2016.
- [15] A. D. Guerrero-Flores, A. Uribe-Salas, G. I. Dávila-Pulido y J. M. Flores-Álvarez, "Simultaneous removal of calcium and sulfate ions from flotation water of complex sulfides" *Minerals Engineering*, vol. 123, pp. 28-34, 2018.
- [16] S. R. Rao y J. A. Finch, "A review of water re-use in flotation," *Minerals Engineering*, vol. 2, pp. 65-85, 1989.
- [17] J. H. Salgado, "Agua y minería (parte II)," *Perspectivas IMTA*, vol. 8, 2021, DOI: <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-07>
- [18] L. A. Pacheco Pérez y M. d. C. Durán Domínguez de Bazúa, "Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua del proceso," *Tecnología, Ciencia, Educación* vol. 22, pp. 15-29, 2007







- [19] A. Abidi, K. Boujounoui, E. Amari, A. Bacaoi y A. Yaacoubi, "Contribution to Improve Water Process Recycling in the Flotation Plant of a Complex Zn-Pb-Cu Sulphide Ore," *Journal of Mining Science*, vol. 55, pp. 658-667, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739119046014>.
- [20] A. Di Feo, C. M. Hill-Svehla, B. R. Hart, K. Volchek, L. Morin y A. Demers, "The effects of water recycling on flotation at a North American concentrator," *Minerals Engineering*, vol. 170, pp. 1-25, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107037>.
- [21] I. Muzinda y N. Schreithofer, "Water quality effects on flotation: Impacts and control of residual xanthates," *Minerals Engineering*, vol. 125, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.032>.
- [22] M. Elizondo-Álvarez, "Colectores alternativos al xantato: Estudio de la adsorción de hidroxamatos sobre galena (PbS), cerusita (PbCO<sub>3</sub>) y anglesita (PbSO<sub>4</sub>) y evaluación de su respuesta a la flotación," Doctorado, Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, CINVESTAV-IPN, México, 2021.
- [23] J. Chen, "The interaction of flotation reagents with metal ions in mineral surfaces: A perspective from coordination chemistry," *Minerals Engineering*, vol. 171, p. 107067, 2021/09/01/ 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107067>.
- [24] B. A. Wills, "Tratamiento de menas y recuperación de minerales," in *Tecnología de procesamiento de minerales*, A. H. Cerdán y A. T. Reyes Eds., 2 ed. México: Limusa, S.a. de C.V., 1994, cap. 12, pp. 345-420.



- [25] A. M. Nowosielska, A. N. Nikoloski y D. F. Parsons, "The effects of saline water on the recovery of lead y zinc sulfide during froth flotation," *Minerals Engineering*, vol. 202, p. 108236, 2023/11/01/ 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108236>.
- [26] E. El-ammouri, M. Mirnezami, D. Lascelles y J. A. Finch, "Aggregation index and methodology to study the role of magnesium in aggregation of sulphide slurries," *CIM Bulletin* vol. 95, pp. 67-72, 2002.
- [27] M. Zanin, H. Lambert y C. A. d. Plessis, "Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review," *Minerals Engineering*, vol. 143, pp. 1-14, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105922>.
- [28] S. Motaung, J. Maree, M. D. Beer, L. Bologo, D. Theron y J. Baloyi, "Recovery of Drinking Water and By-products from Gold Mine Effluents," *International Journal of Water Resources Development*, vol. 24, pp. 433-450, 2008, DOI: <https://doi.org/10.1080/07900620802150475>.
- [29] S. G. Benner, D. W. Blowes y C. J. Ptacek, "A full-scale porous reactive wall for prevention of acid mine drainage," *Groundwater Monitoring & Remediation*, pp. 99-107, 1997.
- [30] F. Ikumapayi, B. Johansson y H. R. Kota, "Recycling of process water : effect of calcium and sulphate ions on flotation of galena," *Minerals Engineering*, vol. 39, pp. 77-88, 2012, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.07.016>.
- [31] L. L. October, K. C. Corin, M.S. Manono, N. Schreithofer y J. G. Wiese, "A fundamental study considering specific ion effects on the attachment of sulfide minerals to air bubbles," *Minerals Engineering*, vol. 151, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106313>.



- [32] D. Lascelles, J. A. Finch y C. SUI, "Depressant action of Ca and Mg on flotation of Cu activated sphalerite," *Canadian Metallurgical Quarterly* vol. 42, pp. 133-140, 2002.
- [33] H. Jin, Y. Yu y X. Chen, "Electrochemical precipitation for water and wastewater treatment," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 184, pp. 1011-1016, 2024/04/01/ 2024, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.044>.
- [34] R. I. Jeldres, E. C. Pieceros, J. A. Valenzuela y P. A. Robles, "Remoción de calcio y magnesio en agua de mar para mejorar la concentración de sólidos en la descarga de espesadores " *Información tecnológica* vol. 30, pp. 291-298, 2019.
- [35] S. Farmanbordar, D. Kahfroushan y E. Fatehifar, "A new method in the removal of Ca and Mg ions from industrial wastewater," *Desalination and Water Treatment*, vol. 57/60, pp. 37-41, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1024744>.
- [36] R. I. Jeldres, M. P. Arancibia-Bravo, A. Reyes, C. E. Aguirre, L. Cortes y L. A. Cisternas, "The impact of seawater with calcium and magnesium removal for the flotation of copper-molybdenum sulphide ores," *Minerals Engineering*, vol. 109, pp. 10-13, 2017.
- [37] C. Pujiastuti, Y. Ngatilah, K. Sumada y S. Muljani, "The effectiveness of sodium hydroxide (NaOH) and sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) on the impurities removal of saturated salt solution," *The 2nd International Joint Conference on Science and Technology*, vol. 953, pp. 1-5, 2018.
- [38] C. Pujiastuti, K. Sumada, Y. Ngatilah y P. Hadi, "Removal of Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> ions from seawater by precipitation method," *MATEC Web of Conferences*, vol. 58, pp. 1-4, 2016.
- [39] K. Zeppenfeld, "Electrochemical removal of calcium and magnesium ions from aqueous solutions," *Desalination* vol. 277, pp. 99-105, 2011.



- [40] A. Uribe-Salas y R. Espinosa-Gómez, "Tratamiento del agua de alimentación a molinos de la Planta 2 Unidad Sabinas ", ed, 2010.
- [41] R. Espinosa-Gómez, A. Uribe-Salas, J. Lira y A. Guerra, "Integral metallurgy-the case of peñoles mines and concentrators," presentado en Proc. XXVIII International Mining Convention, AIMMGM, Veracruz, México, 2009.

**Cómo citar este artículo:**

Ojeda Villegas, S. D., Uribe Salas, A., & Ortiz Lara, N. (2024). Estrategias para la remoción de calcio y magnesio de las aguas del proceso de flotación de sulfuros complejos. *EPISTEMUS*, 18(37), e3706377. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i37.377>

