



Universidad de Concepción

USO DE AGUA DE MAR EN MINERÍA

AVANCES EN EL ESPESAMIENTO DE RELAVES RICOS EN ARCILLAS

Francisco Pulgar / Ricardo I. Jeldres / Fernando Concha / Pedro G. Toledo

Serie Comunicacional CRHIAM

Recursos Hídricos

Agricultura Tecnología Innovación Investigación

Cambio Climático Reutilización de aguas

Ecosistemas Gestión Sustentable Aguas Subterráneas

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Uso de agua de mar en minería.

Avances en el espesamiento de relaves ricos en arcillas.

Francisco Pulgar, Ricardo I. Jeldres,

Fernando Concha y Pedro G. Toledo.

Abril 2022.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

USO DE AGUA DE MAR EN MINERÍA AVANCES EN EL ESPESAMIENTO DE RELAVES RICOS EN ARCILLAS

Francisco Pulgar / Ricardo I. Jeldres / Fernando Concha / Pedro G. toledo

USO DE AGUA DE MAR EN MINERÍA

Avances en el espesamiento de relaves ricos en arcillas

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Francisco Pulgar

Ingeniero Civil Metalúrgico,
Universidad Católica del Norte.
Estudiante de Magíster en Ciencias de la Ingeniería,
Mención Ingeniería de Procesos de Minerales,
Universidad de Antofagasta.
Becario CRHIAM.



Ricardo I. Jeldres

Doctor en Ingeniería Química,
Universidad de Concepción.
Profesor Asistente del Departamento de
Ingeniería Química y Procesos de Minerales,
Universidad de Antofagasta.
Investigador Adjunto CRHIAM.



Fernando Concha

Ingeniero Químico.
Doctor en Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Minnesota. EEUU.
Profesor Emérito de la Universidad de Concepción.
Investigador Asociado CRHIAM.



Pedro G. Toledo

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.
Doctor of Philosophy in Chemical Engineering,
University of Minnesota, EEUU.
Profesor Titular del Departamento de
Ingeniería Química,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal y Sub-Director CRHIAM.

RESUMEN

La escasez hídrica que afecta a diversas regiones del mundo y especialmente a Chile ha llevado a la industria minera a realizar grandes cambios en sus procesos y a buscar tecnologías que fomenten una minería responsable y sustentable. El uso de agua de mar ha aumentado constantemente en los últimos años, con numerosos proyectos de plantas desaladoras y proyectos mineros que contemplan el uso de agua de mar, ya sea desalada o sin desalar; sin embargo, este aumento trae consigo problemas ambientales al ecosistema marino. Por eso, la etapa de espesamiento de relaves ricos en arcillas es clave para la sustentabilidad de la industria, porque permite recuperar agua que es reciclada del proceso, liberándola para actividades no mineras. La salinidad del agua no necesariamente atenta contra el proceso, tanto así que algunos iones de las sales pueden ayudar a las moléculas de floculante a formar aglomerados de partículas más grandes que sedimenten más fácilmente. Sin embargo, otros iones como calcio y magnesio son incompatibles con la separación sólido-líquido y por tanto con la recuperación de agua. Estos últimos iones deben ser separados previamente. En esta Serie se revisa la situación actual del país respecto al uso de agua de mar en minería con una mirada de desarrollo sustentable, con atención especial a la etapa de clarificación y recuperación de agua, y al impacto de relaves ricos en arcillas.

INTRODUCCIÓN

En la industria minera, los residuos conocidos como relaves son producidos por las plantas que concentran minerales valiosos, como cobre y molibdeno. El mayor desafío de la industria es eliminar estos relaves de manera costo-efectiva y especialmente respetuosa del medio ambiente. Muchos de estos relaves contienen minerales difíciles de manejar como las arcillas, que se presentan como partículas de tamaño muy pequeño y con cargas eléctricas distintas en sus diferentes superficies dificultando su asentamiento y consolidación. Además, como la mayoría de las plantas concentradoras se encuentran en el norte de Chile, zona que se ha visto afectada por la escasez de recursos hídricos debido al agotamiento de agua continental y mayor consumo de agua por el aumento de mineral procesado, producto del agotamiento de minerales oxidados y mayor cantidad de proyectos mineros, existe una necesidad en la industria de mejorar las técnicas de recuperación de agua desde la etapa de espesamiento de relaves, con el fin de aumentar el flujo de agua recirculada a procesos aguas arriba.

En la actualidad el agua de mar se ha instalado como una alternativa atractiva ante el aumento de la demanda hídrica que impulsa el tratamiento de los minerales sulfurados, como calcopirita y calcosina, cuya demanda va en crecimiento a una tasa promedio de 12,2% anual, alcanzando a 10,8 m³/s (Cochilco, 2019a). Este aumento se debe principalmente al mayor mineral procesado en las plantas concentradoras por la disminución en leyes del mineral a extraer e incremento en proyectos cupríferos de sulfuros. Hay empresas emblemáticas que han utilizado agua de mar desalada en sus procesos, como Minera Escondida, o directamente sin proceso previo de desalinización, como Minera Centinela.

En este contexto, la etapa de espesamiento y transporte de relaves surge como uno de los principales focos de estudio, debido al potencial impacto en términos de ahorro hídrico y energético. Debido a la escasez hídrica, la industria minera se ha visto obligada a ser más eficiente en sus sistemas de recuperación de agua y, por ende, la etapa de espesamiento ha tomado mayor relevancia. El uso de agua de mar implica un estudio del comportamiento de las diferentes etapas del proceso de obtención de cobre, especialmente en la etapa de espesamiento para la recuperación de agua.

ESTADO ACTUAL DEL CONSUMO DE AGUA

Chile es sin duda un país minero. Es el principal productor de cobre en el mundo, la producción en 2019 fue de 5,6 millones de toneladas métricas, y posee las mayores reservas. Los depósitos de cobre más grandes en Chile corresponden a Codelco (Chuquicamata, El Teniente, Radomiro Tomic, entre otros), BHP (Escondida), Antofagasta Minerals (Centinela, Antucoya), Collahuasi y Zaldívar. También es un actor importante en la producción de minería no metálica, cuyos principales productores son SQM y Albemarle enfocados en la producción de cloruro de potasio (KCl) y carbonato de litio (Li_2CO_3). Y, finalmente, cuenta con grandes fundiciones y refinerías, como Fundición Altonorte (Glencore), Hernán Videla Lira (ENAMI) y Chuquicamata (Codelco).

Cada uno de los procesos involucrados en las actividades mineras requiere agua, con el consumo más significativo en la etapa de concentración (Cochilco, 2018), que se basa en flotación por espuma para separar el mineral valioso de la ganga consistente en minerales sin valor económico. De las aguas continentales utilizadas en minería, el 71% es consumido en el proceso de flotación, sigue el área de hidrometalurgia (para el tratamiento de minerales oxidados de cobre) y finalmente la fundición y refinería. Se espera que el consumo de agua sea mayor con el paso de los años, alcanzando $23,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ con una tasa de crecimiento anual de 2,7% para el año 2030 (Cochilco, 2019b). Este aumento se debe a la importancia creciente de la etapa de concentración por flotación de minerales sulfurados, debido al agotamiento o disminución crítica de minerales oxidados, y a la disminución de las leyes de los yacimientos, que requiere procesar una mayor cantidad de mineral por tonelada de cobre fino.

Las principales fuentes de agua para la minería son cuatro: aguas superficiales, que se encuentran naturalmente a la vista y que pueden ser corrientes o detenidas; aguas subterráneas, que están ocultas en el seno de la tierra como embalses subterráneos; aguas adquiridas a terceros; y agua de mar, que corresponde a toda agua de mar extraída desde el océano, que se usa tal cual o desalada. El agua de origen continental (superficial) es escasa, sobre todo en regiones del norte del país que son afectadas por sequías permanentes; su consumo irá en disminución a través de los años, llegando a $12,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ en el año 2030. La escasez de agua ha impulsado una cantidad importante de proyectos mineros que utilizan agua de mar en sus procesos, por lo que su consumo en 2030 aumentaría un 156% respecto al

Uso de agua de mar en minería.
Avances en el espesamiento de relaves ricos en arcillas

año 2019. Cochilco estima que para el 2030 el uso de agua de mar en procesos mineros alcanzará un 69% en la región de Antofagasta, un 14% en la región de Tarapacá, un 13% en la región de Atacama y un 4% en la región de Coquimbo (Cochilco, 2020a). La Tabla 1 resume los proyectos más importantes asociados a la extracción y consumo de agua de mar.

Tabla 1.

Grandes proyectos mineros asociados a la extracción y consumo de agua de mar.

Empresa	Proyecto	Región	Marcha	Desarrollo	Capacidad desalación (l/s)	Capacidad uso agua mar (l/s)
ANTOFAGASTA MINERALS	INCO	Coquimbo	2021	Construcción	400	
CAPSTONE Mining	Santo Domingo	Atacama	2024	Factibilidad	30	400
COPEC	Diego de Almagro	Atacama	2023	Factibilidad	-	315
BHP BILLITON	Spence Growth Option	Antofagasta	2021	Construcción	800	-
MANTOS COPPER	Desarrollo Matoverde	Atacama	2022	Construcción	260	
TECK	Quebrada Blanca QB2	Tarapacá	2023	Construcción	850	-
CODELCO	Planta Desaladora	Antofagasta	2023	Factibilidad	840	-
COLLAHUASI	Collahuasi	Tarapacá	2024	Factibilidad	525	-
ANTOFAGASTA MINERALS	Minera Centinela	Antofagasta	2025	Factibilidad	-	1650
FREEPORT McMORAN	Concentradora El Abra	Antofagasta	2027	Sin EIA	500	-
ENAPAC	-	Atacama	2022	Aprobado y en factibilidad	2630	-
AGUAS PACIFICO SpA*	Proyecto Aconcagua	Valparaíso	2021	Construcción	1000	

*Información pública

Fuente: Cochilco, (2020b).

DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR

Proceso de osmosis inversa

El proceso de desalinización de agua de mar se basa principalmente en osmosis inversa, también se le denomina osmosis reversa, a través de una membrana semipermeable. El producto es agua desalada libre de iones, moléculas y partículas de mayor tamaño. El proceso de osmosis inversa es reconocido como el método más avanzado de filtración para la purificación de agua. Unas 14,000 plantas en el mundo utilizan este mecanismo. En tanto, otras 6,000 plantas se basan en procesos térmicos que evaporan agua de mar y luego la condensan libre de sales. Con el tiempo, y frente a situaciones de escasez de agua y eventos de sequía, se ha considerado la desalación de agua de mar como alternativa clave para la industria minera. Sin embargo, los mayores esfuerzos de la industria se enfocan en mejorar la reutilización del recurso que en los últimos años ha alcanzado 75% y ya se plantea la posibilidad de llegar a un 80% (Scales, 2020). Por tanto, la desalinización se identifica como un complemento clave para la industria (Radic, 2019).

La osmosis es un fenómeno de difusión pasiva del agua (u otro solvente) desde una solución de menor concentración de solutos a una de mayor concentración, a través de una membrana semipermeable. Este fenómeno se produce de manera espontánea sin necesidad de energía exógena. La presión osmótica es la presión extra necesaria para detener el flujo de agua a través de la membrana. La osmosis inversa es lo contrario a la osmosis. El agua es forzada a pasar desde una solución concentrada a una diluida a través de una membrana semipermeable mediante presión, cuyo valor es superior al de la presión osmótica. Como resultado, la salmuera se concentra aún más. Según la presión aplicada y la membrana escogida, el agua que entra al proceso puede ser separada de bacterias, coloides (partículas sólidas muy pequeñas), virus, material orgánico, y iones monovalentes y multivalentes.



Figura 1.

Planta desalinizadora Aguas Antofagasta.
Fuente: Prensa Aguas Antofagasta.

La desalinización de agua de mar por osmosis inversa cuenta con cuatro etapas principales, captación del agua, pretratamiento (filtrado previo), osmosis inversa y rechazo de salmuera. Algunas plantas desaladoras pueden tener una quinta etapa conocida como desinfección y remineralización, cuya existencia depende de la calidad de agua requerida. La primera etapa puede ser por captación cerrada, que ocurre mediante la filtración del terreno costero, o por captación abierta, directa del océano, que conlleva cantidades importantes de material biológico y materia orgánica. La segunda etapa de pretratamiento consta de una filtración previa necesaria para adecuar las características fisicoquímicas y biológicas del agua captada que será ingresada a la etapa de osmosis inversa, para evitar el deterioro prematuro de los equipos. Esta etapa se preocupa de eliminar sólidos en suspensión, evitar la precipitación de óxidos metálicos y de sales minerales, reducir el contenido de materia orgánica y la actividad biológica. La tercera etapa es de osmosis inversa en la que ocurre la desalación del agua de mar, aquí salen dos corrientes, una con agua de permeado (es el producto, es decir, agua desalada) y otra con agua de descarte (salmuera concentrada), esta última típicamente tiene el doble de la concentración de sales del agua de mar fresca. La cuarta etapa se encarga del descarte de la salmuera concentrada, que es depositada en el mar o acumulada en tierra. La devolución al mar produce el efecto "pluma salina" debido a la lenta dilución de la salmuera concentrada.

Diversas técnicas de mitigación han sido implementadas, pero los daños son inevitables, más aún considerando el aumento de proyectos de plantas desalinizadoras en el país. Para acelerar la dilución se utilizan dispersores ubicados en la boca de descarga de la salmuera, al igual que una dilución previa de la salmuera con agua de mar antes de la descarga y, en algunos casos, se realiza una descarga superficial directa. Para la estrategia de descarga se debe considerar tanto la ubicación geográfica de la planta desaladora como también la zona de descarga de la salmuera. En esta zona se deben identificar todas las posibles especies que podrían ser afectadas, y el oleaje y las corrientes marinas que pudieran ayudar a la dilución de la salmuera. Estas variables y algunas otras características de la planta desaladora y su entorno deben ser definidas rigurosamente para llevar a cabo un proceso óptimo. Una alternativa de descarte de salmueras es identificar la química y las sales con valor agregado para ser utilizada, por ejemplo, como fertilizantes en la agricultura y en el almacenamiento de energía.

Impactos ambientales de las plantas desalinizadoras

Los impactos ambientales sobre el ambiente marino y la vida acuática son asociados a una serie de componentes del proceso como suministro de agua, pretratamiento del agua, desalinización, descarga de salmuera hiperconcentrada, y requerimientos energéticos exigentes. Sin embargo, el mayor impacto ambiental es ocasionado por la salmuera descargada que contiene todos los residuos del proceso global de desalinización como sales, bioproductos de desinfección, aditivos químicos, productos de corrosión, metales pesados y, en algunos casos, a pH y temperatura diferentes a los valores normales de los lugares intervenidos. A continuación, se resumen los impactos abióticos y bióticos de la descarga de salmueras concentradas en la desalinización de agua de mar mediante osmosis inversa (Elsaid *et al.*, 2020).

a) Salinidad:

La salmuera descargada se considera la principal amenaza contra el ambiente marino, considerando que típicamente la salinidad de la salmuera es 1.5 a 2 veces la salinidad del agua de mar alimentada a las plantas. Los impactos físicos incluyen cambios en la estratificación de la columna de agua debido a corrientes convectivas originadas en diferencias de densidad. Los impactos químicos incluyen aumento de salinidad del agua en el punto de descarga y en la zona de mezclado, aumento de salinidad de sedimentos, reducción de la solubilidad del oxígeno y, por tanto, del

contenido de oxígeno disuelto. Los impactos biológicos incluyen mortalidad de organismos marinos, cambios en la estructura de la comunidad bentónica, posible introducción de especies no autóctonas y cambios en las tasas de fotosíntesis, metabolismo y crecimiento.

b) Bioproductos de desinfección:

Los impactos químicos incluyen formación de compuestos tóxicos para los organismos acuáticos. Los impactos biológicos incorporan la mortalidad de organismos marinos debido a la toxicidad de los bioproductos y cambios en las tasas metabólicas y de crecimiento.

c) Aditivos químicos:

Entre ellos encontramos anti-incrustantes, coagulantes, floculantes entre otros. Los impactos físicos incluyen aumento de turbidez del agua que impide la penetración de la luz. En tanto, los impactos químicos incorporan la introducción de químicos ajenos al ambiente marino, y decoloración del agua debido a sales de hierro usadas como coagulantes que limitan la penetración de la luz. Los impactos biológicos incluyen mortalidad de organismos marinos y cambios en las tasas metabólicas y de crecimiento.

d) Metales pesados y productos de corrosión:

Los impactos físicos incluyen aumento de la turbidez del agua debido a óxidos metálicos que impide la penetración de la luz. Los impactos químicos incorporan el aumento de productos de corrosión. Los impactos biológicos abarcan la mortalidad de organismos marinos por su intolerancia a los metales pesados, y cambios en las tasas metabólicas y de crecimiento por asimilación de metales pesados y falta de luz. Debido a estos impactos negativos, en la mayoría de los países se exigen evaluaciones de impacto ambiental a fin de minimizar y mitigar los impactos ambientales de las plantas de desalinización.

Otro efecto perjudicial de las plantas desalinizadoras incluye las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂, provenientes del proceso de osmosis inversa que es energéticamente intenso y cuya principal fuente son los combustibles fósiles. Una de las grandes preocupaciones con las plantas desalinizadoras es su potencial contribución al cambio climático. Elsaïd *et al.*, (2020) indica que existe una diferencia entre disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir el consumo de combustible fósil, pero que cuando se utilizan energías renovables, como eólica y solar, se pueden reducir ambas al mismo tiempo.

CONCENTRACIÓN DE MINERALES

Para minerales sulfurados de cobre, como calcopirita, bornita, calcosina, covelina y enargita, el proceso de concentración consiste de tres grandes etapas, molienda, flotación y espesamiento (Figura 2). En la etapa de molienda se reduce el tamaño del mineral hasta liberar la especie de interés, el tamaño debe ser suficientemente pequeño para que las partículas puedan flotar en la espuma producida en la etapa de flotación. En esta última etapa, el uso de agua y aire, junto con la ayuda de reactivos químicos, permite separar la especie valiosa en un concentrado con alta ley del mineral comerciable del material no deseado que llamamos ganga, una pulpa espesa que contiene todos los minerales sin valor suficiente para ser comercializados. Para recuperar la mayor cantidad de agua en la pulpa espesa, conocida como relave, esta se somete al proceso de separación sólido-líquido en grandes espesadores.

Con la ayuda de reactivos químicos, conocidos como floculantes, se logra separar una cantidad de agua importante, junto con aumentar el tamaño de los flóculos de los relaves, facilitando su transporte y depositación definitiva en tranques de relave. El proceso de concentración permite obtener un concentrado de cobre con una ley cercana a 30% y una cantidad porcentual de agua de 40% para el transporte del concentrado, mientras que el relave contiene toda la ganga del mineral inicial y algunos arrastres de mineral valioso junto con un 70% de agua.

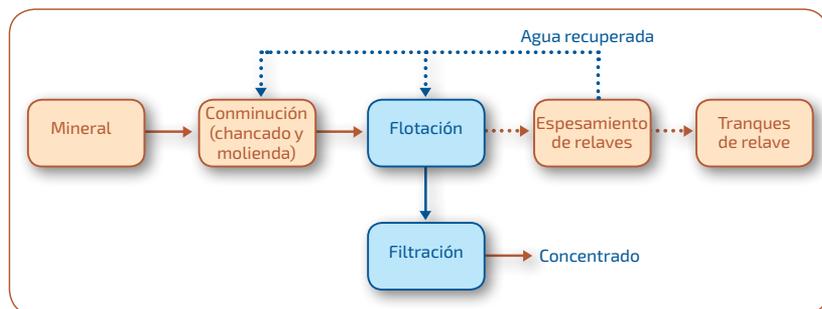


Figura 2.

Diagrama de proceso de concentración de minerales sulfurados de cobre. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los desafíos clave de la industria minera, en la actualidad, es producir de manera sustentable apuntando a una "minería verde", responsable con el medio ambiente y, por supuesto, cumpliendo con las necesidades de los consumidores y las partes involucradas. Los relaves mineros representan la mayor problemática del sector. En la actualidad existe un total de 757 depósitos de relaves en el país (Figura 3), la mayoría ubicados en la región de Coquimbo (389 depósitos correspondientes al 51% del total) y en otras regiones como Atacama y Antofagasta, con 168 y 52 depósitos, respectivamente. El manejo de los relaves para recuperar la mayor cantidad de agua requiere una comprensión acabada de la etapa de espesamiento. A continuación, se revisan los elementos claves de esta etapa.



Figura 3.

Depósitos de relaves en Chile. Fuente: Cochilco, (2019).

Espesamiento

La finalidad del proceso de espesamiento es aumentar la densidad de la pulpa de descarga (relave) con el fin de recuperar la mayor cantidad de agua. La sedimentación convencional se realiza por fuerzas gravitacionales. La Figura 4 muestra los espesadores Puente Coloso Escondida en Antofagasta. Los espesadores son de forma cilíndrica, alimentados por la parte superior en el centro del tanque, tienen dos salidas una por el centro-fondo y la otra

por la periferia-superior del tanque. La apertura centro-fondo descarga la pulpa espesa y la periferia-superior descarga el líquido limpio. Este proceso es ayudado por rastras ubicadas en el fondo del espesador, las cuales giran a bajas revoluciones llevando al mineral a la zona de descarga y a su vez facilitan la interacción de los reactivos químicos con las partículas sólidas para formar partículas de mayor tamaño, esto último es conocido como floculación.



Figura 4.

Espesadores Puerto Coloso Escondida (Antofagasta).
Fuente: Fotografía propia.

La etapa de espesamiento se ubica al final del proceso de concentración de minerales (Figura 2). Las variables más importantes incluyen la composición mineralógica de la pulpa y las condiciones del medio (% de sólido, pH, carga iónica y especies disueltas). El tamaño de partículas es una de las variables más importantes en la concentración de minerales. Se requiere de un tamaño menor a 10^{-4} m en la etapa de flotación, proceso que genera relaves con partículas de tamaño coloidal, entre 10^{-9} a 10^{-6} m, muy difíciles de asentar porque no les afecta la gravedad. El espesamiento de relaves involucra la superposición de dos fenómenos, la sedimentación y la consolidación. La Figura 5 muestra un esquema del proceso que se revisa con mayor detalle a continuación.

Sedimentación

Sedimentación es el asentamiento de partículas sólidas contenidas en una pulpa. Existen tres formas de sedimentación.

- Independiente, las partículas sedimentan sin interacciones.
- Floculada, la sedimentación es ayudada con un agente químico para formar partículas más grandes y por tanto más pesadas.
- Impedida, la velocidad de sedimentación se reduce por la alta concentración de partículas que chocan entre sí.

Consolidación

Durante la sedimentación, el proceso termina cuando las partículas llegan al fondo del equipo de espesamiento y comienzan a descansar unas sobre otras. La consolidación ocurre justo en el fondo, donde las partículas se comprimen liberando agua.

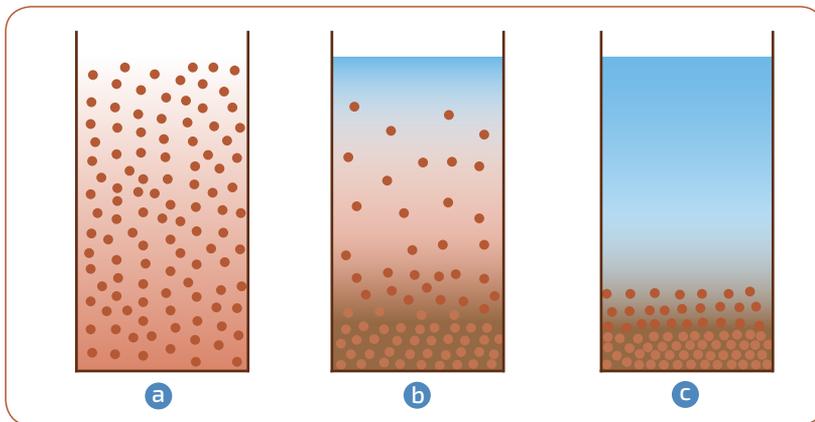


Figura 5.

Esquema del proceso de sedimentación-consolidación. (a) estado inicial, (b) formación de sedimento y separación de fases, (c) consolidación del sedimento y clarificación del líquido.

Fuente: Elaboración propia.

Floculación

Es clave que las partículas sólidas de tamaño pequeño se puedan adherir entre sí para formar partículas más grandes, que sedimenten más rápido favoreciendo el proceso industrial. Para esto se agregan agentes floculantes, que son polímeros o polielectrolitos de cadena larga y alta masa molecular y solubles en agua. Los floculantes se adhieren a partículas diversas, generalmente mediante enlaces iónicos, dando lugar

a aglomerados de partículas o flóculos con densidad y tamaño adecuados para sedimentar. Se pueden clasificar de acuerdo a su naturaleza como minerales, orgánicos naturales y orgánicos sintéticos, y también según su carga eléctrica como aniónicos, catiónicos y neutros. Los floculantes más utilizados en la industria son los sintéticos orgánicos, de carácter aniónico y de alto peso molecular (Tabla 2).

Tabla 2.
Floculantes comunes en la industria minera.

Fabricante	Nombre
SNF	Floerger 913-SH Floerger 923-SH Tec-2050
BASF	Magnafloc 1011 Magnafloc 155 Magnafloc 2025 Magnafloc 333 Rheomax 1050
Orica	Orifloc AP 2020
Kemira	Superfloc A-110

Fuente: Cochilco, (2019).

El tipo de floculante y la dosis en que es suministrado se debe escoger cuidadosamente a fin de que los flóculos resultantes posean una densidad adecuada para minimizar el consumo energético de transporte hacia los tranques y maximizar la recuperación de agua clara para ser recirculada a proceso. Para los próximos años, hasta 2028, se espera un aumento en el consumo de floculantes en la industria, debido al aumento de proyectos mineros.

Es importante señalar que los floculantes se escogen de la oferta disponible y la dosificación es de acuerdo a pruebas y errores en el laboratorio, plantas pilotos y, en algunos pocos casos, en pruebas de campo. Actualmente existen esfuerzos basados en simulación molecular para diseñar floculantes adecuados para los procesos exigentes de hoy, caracterizados por baja ley y abundancia de arcilla coloidal en agua de baja calidad metalúrgica (Toledo *et al.*, 2021). Esta aproximación permite analizar ex-ante la efectividad de floculantes de distinto tamaño, distinta densidad de carga, y estructura (lineal, ramificada, entrelazada, tipo estrella) (Figura 6). La selección de un floculante o de una mezcla de floculantes en base a simulación molecular hace que la elección sea asertiva.

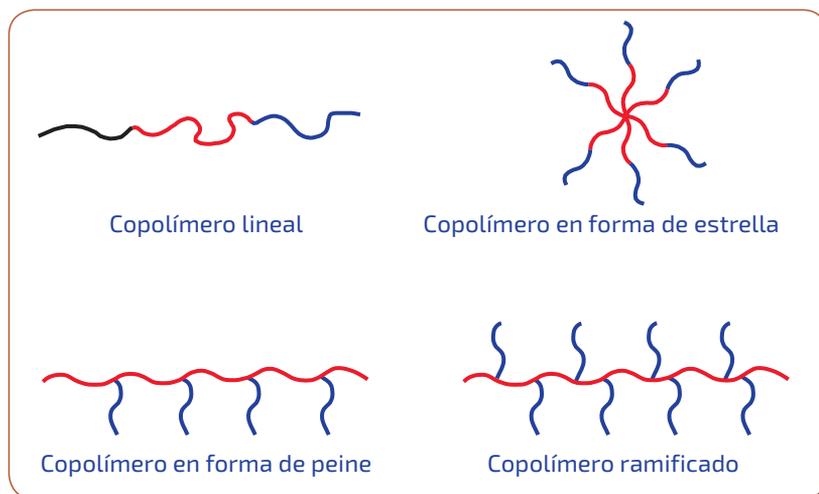


Figura 6.

Floculantes poliméricos y sus estructuras más comunes.
Fuente: Adaptado de Feng *et al.*, (2017).

ESPESAMIENTO DE RELAVES MINEROS EN AGUA DE MAR

Variables que afectan al espesamiento

El espesamiento es la última etapa del proceso de concentración de minerales y busca recuperar agua de los relaves producto de la flotación y producir un relave espesado para ser depositado en tranques, su destino final. Para que ocurra efectivamente este proceso se deben considerar diversos factores que afectan la floculación de las partículas. El primero es la cantidad de sólidos en la pulpa, ya que a mayor cantidad de partículas en el sistema existen choques constantes que impiden una rápida sedimentación. El segundo es que en relaves de minerales existe abundancia de partículas finas, producto de la reducción de tamaño (conminución) requerida para la etapa de flotación, partículas que se encuentran suspendidas en el fluido muy difíciles de flocular y que por tanto afectan la turbidez del agua recuperada (rebose).

Por otro lado, el principio fundamental en que se basa este proceso es que existe una concentración de sólidos, ni muy alta ni muy baja, que aumentan la probabilidad de agregación o unión de partículas. Finalmente, la agregación depende del balance de diversas fuerzas existentes entre las pequeñas partículas que componen la pulpa, que dependen fuertemente del medio (por ejemplo, agua fresca o agua de mar) y las características del floculante (peso molecular, tipo de carga, entre otros). Las fuerzas incluyen van der Waals (generalmente atractiva), electrostáticas (pueden ser atractivas o repulsivas según la carga de las partículas), poliméricas (entre partículas y floculante) y gravitacional, que provoca la decantación de las partículas aglomeradas (Pérez, 2011). El balance de estas fuerzas determina el éxito o fracaso de la floculación de los relaves.

Los factores que afectan el proceso de floculación se pueden clasificar como físicos, que incluyen características del mineral en suspensión, floculante utilizado (peso molecular, estructura, densidad de carga, dosificación) y características de las partículas (porcentaje de sólidos, distribución granulométrica, densidad); químicos, principalmente composición mineralógica de la pulpa (existencia de arcillas en la pulpa) y condiciones del medio (pH y especies disueltas); y externos, que se atribuyen a la agitación del sistema. Las características más importantes al momento de elegir un floculante son (Pillai, 1997):

a) Tipo de polímero: Los floculantes más utilizados en la industria minera son sintéticos, específicamente copolímeros de grupos acrilamida y acrilato de sodio. Estos grupos pueden tener un comportamiento diferente dependiendo del sistema, debido a los mecanismos de adsorción y función de cada grupo, y a la carga iónica del polímero.

b) pH: La selección del floculante depende del pH de la pulpa, ya que la ionicidad de los polímeros aumenta con este parámetro. Por ejemplo, para un pH de pulpa menor a 4, los polímeros no iónicos presentan un mejor rendimiento, mientras que, para pH más alcalinos, entre 6 a 8, se prefiere un floculante aniónico moderado. Al aumentar el pH también aumenta la carga iónica del floculante.

c) Contenido de sólidos: La concentración de sólidos de la pulpa afecta la dispersión del floculante en la solución, como también la distribución granulométrica. Mientras mayor sea la concentración de sólidos, más difícil es la distribución uniforme del floculante en la pulpa. Mientras más pequeñas las partículas, mayor es el área superficial total, lo que facilita el contacto con el floculante.

d) Peso molecular del floculante: En la mayoría de las aplicaciones de sedimentación, se prefiere floculantes de alto peso molecular porque permite una mayor interacción del floculante con las partículas del medio, aumentando así la velocidad de sedimentación al formar flóculos más grandes. De acuerdo con Jenkel y Rumbach (1951), los floculantes de alto peso molecular se adsorben sobre las partículas formando *trains*, *loops* y *tails* (Figura 7). Los *trains* corresponden a subpartes del polímero adsorbidas sobre la superficie de las partículas, los *loops* corresponden a subpartes no adsorbidas, y los *tails* corresponden a los extremos colgantes de las cadenas poliméricas.

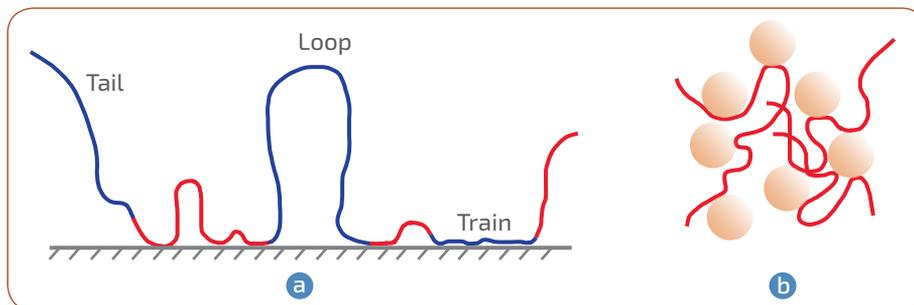


Figura 7.

Esquema de la interacción de un floculante con partículas de caolinita. (a) adsorción del polímero sobre las partículas y (b) agregación de las partículas. Fuente: Elaboración propia.

En la práctica es muy complicado controlar el proceso de floculación, sin embargo, la tarea se simplifica con un adecuado conocimiento de la fisicoquímica que controla el comportamiento del sistema a nivel microscópico que da origen a los observables macroscópicos que se pueden medir. Los observables son:

- **Velocidad de sedimentación:** En separación sólido-líquido la velocidad de sedimentación es la propiedad más estudiada, dado que es un indicador directo de la eficiencia del proceso. En presencia de un floculante catiónico, el tamaño de los agregados disminuye al aumentar la densidad de carga y al reducir el peso molecular del floculante. Con ello se reduce la velocidad de sedimentación (Nasser y James, 2006). Sin embargo, además del tamaño se debe considerar la permeabilidad de los agregados, porque muchas veces flóculos pequeños con baja permeabilidad sedimentan más rápido que flóculos más grandes altamente permeables (Troncoso, 2012).

- **Propiedades mecánicas:** La consolidación de los sedimentos es la segunda etapa de la separación sólido-líquido. La consolidación es controlada por la compresibilidad y permeabilidad del sedimento. La compresibilidad de la suspensión es caracterizada por el esfuerzo de corte compresivo, un indicador de la fracción volumétrica final de sólidos que una suspensión puede alcanzar cuando se somete a una fuerza de compresión, una vez alcanzado el equilibrio (Nasser y James, 2006).
- **Propiedades reológicas:** Las propiedades de flujo de los sólidos espesados (corriente de descarga del espesador), como esfuerzo de corte, esfuerzo crítico y viscosidad, son muy importantes para especificar las bombas necesarias para impulsar el material que sale del espesador hacia los depósitos. El control de las propiedades de flujo de la suspensión es clave debido a que una alta viscosidad de la suspensión con un alto esfuerzo de corte (esfuerzo mínimo necesario para que una pulpa pueda iniciar el movimiento) requiere excesos de energía para su transporte.
- **Calidad del agua recuperada (rebose):** El agua recuperada debe ser suficientemente clara para evitar problemas en las etapas hacia donde se recircula.
- **Dosis óptima de floculante:** Se determina mediante pruebas de laboratorio que son ajustadas en el campo.

Interacción del floculante con relaves arcillosos

La floculación de arcillas presentes en la mayoría de los yacimientos, y con gran presencia en los relaves, es difícil debido a que las partículas son muy pequeñas (tamaño coloidal), asimétricas en sus caras y bordes, y con distribución de carga distinta dependiendo de cada cara cristalina.

Uno de los tipos de arcillas más estudiadas es la caolinita. Cada cara de su estructura cristalográfica (forma sólida de cómo se ordenan y empaquetan los átomos, moléculas o iones) presenta una carga diferente a la otra dependiendo de las condiciones del medio. La cara basal siempre tiene carga negativa mientras que los bordes adquieren carga negativa (condiciones ácidas) o carga positiva (condiciones alcalinas) debido a que la erosión y disminución de tamaño rompen enlaces químicos en la superficie de las partículas (Yin *et al.*, 2012). Es precisamente en estos bordes donde ocurre la interacción del floculante con las partículas.

Otra característica importante de las arcillas es la hinchabilidad o capacidad de absorber agua que depende de la estructura de la partícula. Arcillas del tipo caolinita no son hinchables debido a los fuertes enlaces que la conforman, impidiendo que moléculas de agua puedan penetrar dentro de la estructura. En tanto, la esmectita absorbe agua y se hincha producto de sus enlaces más débiles. En términos prácticos, comprender la interacción entre las partículas de arcilla y los polímeros floculantes es fundamental para el éxito de los procesos de clarificación de agua. Los floculantes utilizados para promover la agregación de las partículas sólidas pueden provocar diversos efectos según sus características, por lo que su elección depende de la aplicación de interés. A continuación, se resumen características de las poliacrilamidas y sus efectos.

a) Tipo de carga: Para floculantes catiónicos de alto peso molecular el mecanismo de neutralización de carga se vuelve predominante. En el caso de los floculantes aniónicos, el principal mecanismo es el puente polimérico; debido a la repulsión electrostática entre las cadenas de polímero y las partículas aniónicas, el floculante se puede adsorber puntualmente mediante puentes de hidrógeno, formando así *loops* y *tails* sobre las partículas de caolinita.

b) Densidad de carga y peso molecular: La carga del polímero, sea positiva o negativa, afecta fuertemente su adsorción sobre las partículas. En floculantes aniónicos, mientras mayor sea la densidad de carga del floculante, mayor es la repulsión entre las cadenas poliméricas y las partículas, impidiendo la floculación. Por otra parte, un alto peso molecular del floculante provoca un aumento en el tamaño de los flóculos (Shaikh *et al.*, 2017). La velocidad de sedimentación es mayor con polímeros aniónicos de alto peso molecular. A bajas dosis de este tipo de floculantes se obtienen turbidez aceptable y altas velocidades de sedimentación (Nasser y James, 2006).

c) Tipo y estructura: El tipo y estructura del polímero utilizado puede afectar la interacción entre las partículas sólidas y con ello limitar la adsorción del polímero. Mpofu *et al.*, (2003) encontraron que el óxido de polietileno, un polímero lineal, presenta mayor afinidad por la caolinita que la poliacrilamida comúnmente utilizada. Una línea de investigación interesante y actual es analizar el comportamiento de diferentes estructuras de floculantes en la sedimentación de arcillas, en condiciones con y sin sal.

Espesamiento de relaves en agua de mar

El agua utilizada para la concentración de minerales es clave para diseñar los procesos y establecer las variables operacionales, sin embargo, la calidad del agua más adecuada no siempre es totalmente desalada, porque en algunos procesos ciertos iones son inocuos y en otros procesos su presencia puede ser favorable (Cisternas y Gálvez, 2018).

El agua de mar puede ser utilizada sin desalar, pero requiere que los procesos sean adaptados porque los iones en el agua pueden interactuar con minerales, reactivos químicos y materiales de los equipos utilizados. Los cationes que se encuentran en mayor cantidad en el agua de mar son sodio, magnesio, potasio y calcio, mientras que los aniones en mayor cantidad son cloruro, sulfato y bicarbonato. La interacción de estos iones disueltos afecta el comportamiento fisicoquímico del agua de mar, siendo diferente al agua de proceso utilizada en la minería. Esta diferencia puede tener un efecto tanto negativo como positivo. El uso de agua de mar puede traer consigo aumentos en el consumo de reactivos, cambio de pH de operación en los procesos, precipitaciones que provocan una disminución en la cantidad y calidad de los productos, entre otros.

La fuerza iónica del agua de mar influye directamente en el modo en que se agrega la caolinita, afectando así su velocidad de sedimentación, volumen y tiempo de formación del sedimento (Kang *et al.*, 2019). Sin embargo, los iones divalentes (como el Ca^{2+}) tienen un efecto mayor en la agregación y floculación de la caolinita en comparación con iones monovalentes (como Na^+). Estos cationes (y otros como Li^+ y Mg^{2+}), pequeños y generadores de altos campos eléctricos, son conocidos como iones *maker*, los que producen que una cierta cantidad de moléculas de agua sea orientada hacia ellos, mientras que iones más grandes (como Cs^+ , K^+ , Cl^- , I^-), que inducen campos eléctricos pequeños, son conocidos como iones *breaker* porque no ordenan la estructura del agua a su alrededor (Jeldres *et al.*, 2019a, b).

En condiciones salinas se reduce la repulsión eléctrica entre los grupos aniónicos del floculante, lo que resulta en un enrollamiento de las cadenas poliméricas que disminuye la eficacia del proceso de floculación al reducir la cantidad de enlaces entre el floculante y las partículas sólidas (Jeldres *et al.*, 2017a). Por otra parte, la adsorción del floculante sobre las partículas minerales es más efectiva a mayor concentración de iones debido a la formación de un mayor número de enlaces de hidrógeno. De esta forma se reduce la formación de *loops* y aumenta la formación de *trains*. Esto quiere decir que la floculación puede ser efectiva e incluso favorecida por

una alta salinidad en aplicaciones de baja velocidad de sedimentación, pero puede tener un efecto perjudicial cuando se requieren velocidades de sedimentación más altas (Quezada *et al.*, 2018).

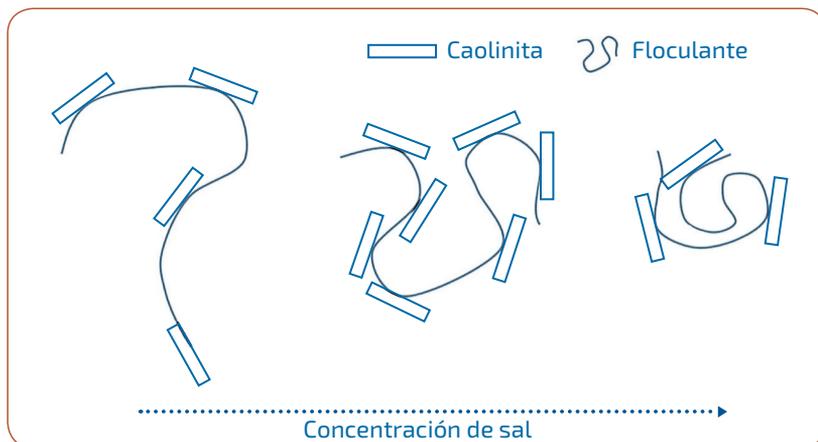


Figura 8.

Efecto de la salinidad en la conformación del floculante.
Fuente: Jeldres *et al.*, (2017a).

Un aspecto fundamental del espesamiento es la formación de precipitados de magnesio y calcio en la etapa de flotación debido a la hidrólisis de estos cationes divalentes, que según el pH de la operación y concentraciones de estos iones, forman diversos complejos de hidróxidos (combinación derivada del agua tras la sustitución de uno de sus átomos de hidrógeno por la de un metal) que pueden precipitar en la superficie de los minerales de interés haciéndola hidrofílica (que tiene afinidad por el agua). La precipitación de $Mg(OH)_2$, que requiere pH mayor a 9, ocurre en etapas de recuperación (flotación primaria) que operan típicamente a pH 10. La precipitación de $Ca(OH)_2$, que comienza a pH mayor a 12.5, ocurre generalmente en etapas de limpieza, ya que la adición de cal en esta etapa aumenta las concentraciones de calcio y provee un pH altamente alcalino necesario para depresar la pirita, ambas condiciones propician la formación de este precipitado (Jeldres *et al.*, 2017b).

En el espesamiento estos precipitados adquieren una forma de gel alrededor de las partículas sólidas, cubriéndolas parcial o totalmente, impidiendo

la interacción del floculante con las partículas de arcilla. Esto afecta la estructura y forma de los flóculos formados que resultan más frágiles y pequeños, todo lo contrario de lo que requiere la industria. Ramos *et al.*, (2020) han encontrado que los precipitados de magnesio y calcio añaden más partículas finas a la suspensión, por lo cual el consumo de floculante aumenta.

DESALACIÓN PARCIAL DEL AGUA DE MAR

En la actualidad, las empresas utilizan agua de mar de dos calidades en sus procesos, agua de mar desalada y agua de mar sin tratamiento, sin embargo, recientemente se ha estudiado una tercera opción, agua de mar parcialmente desalada (Pulgar *et al.*, 2021). La literatura considera que la salinidad del agua no es del todo perjudicial en los procesos de espesamiento, pero si lo es en los procesos metalúrgicos, porque modifica el comportamiento de las variables metalúrgicas y genera residuos químicamente más complejos (tanto rebose como relave). Lo anterior no implica necesariamente que la mejor agua sea la desalada, solo que agua con distintas calidades ofrecen ventajas y desventajas, y cuando se decide por una calidad, entonces el proceso debe ser adaptado. El uso de agua de mar involucra ajustes en las variables de operación, siendo el pH la más significativa por la posible precipitación de hidróxidos, que limitan la recuperación de molibdenita o la depresión de pirita.

La formación de precipitados no es el único factor preocupante al utilizar agua de mar, ya que los cationes de magnesio que contiene (que son muy pequeños y con alta carga eléctrica positiva) se adsorben fuertemente sobre las partículas (negativas) con diversos efectos. Entre ellos se encuentre un mayor consumo de floculante, rango de pH del proceso limitado (siendo factible trabajar solo a pH natural de la pulpa), disminución de la velocidad de sedimentación de los agregados y aumento de los valores de esfuerzo de corte del sedimento, lo que produce una pérdida de selectividad del polímero floculante, entre otros. Todos estos efectos negativos del agua de mar invitan a aumentar su recuperación para procesos y a desarrollar tecnología para tratar esta agua, a fin de remover los iones incompatibles con los procesos. La remoción de iones, que da origen a agua de mar pretratada, se puede lograr mediante tecnologías como las siguientes.

a) Reactivos alcalinizantes: Con reactivos que aumentan el pH, como carbonato de sodio y cal, se pueden precipitar algunos iones del agua de mar (como magnesio y calcio) produciendo sólidos que son descartados mediante filtración (Castro, 2010). Se ha estudiado esta metodología con resultados prometedores, ya que con agua pretratada a pH 11 se obtiene una velocidad de sedimentación de 27 m/h con 21 g/t de floculante, mayor que con agua de mar al mismo pH, e incluso al pH natural de la pulpa (7,4) evitando la formación de precipitados (Jeldres *et al.*, 2017b). La mejora en sedimentación lleva asociada una menor turbidez, indicador de agregados grandes y densos. Además, para alcanzar una velocidad de sedimentación de 15 m/h (típica en las operaciones de espesamiento) se necesita cerca de 70 g/t de floculante en condiciones alcalinas (pH 11); pero, si se remueven los cationes de magnesio, el requerimiento de floculante disminuye a 15 g/t, siendo la recuperación de agua mayor que la obtenida a pH natural.

b) Atmósfera rica en dióxido de carbono: Otra forma de remoción parcial de iones del agua de mar es someterla a una atmósfera rica de dióxido de carbono gaseoso, que actúa como precipitador, y una solución de hidróxido de sodio, como agente alcalinizante.

c) Uso de biotecnología: Otro método para la remoción de iones del agua de mar se basa en el uso de un biorreactor de lecho fluidizado (FBB) relleno con bacterias ureolíticas *Bacillus subtilis* LN8B que aumentan el pH de la solución por la liberación de amonio promoviendo la precipitación de los cationes de magnesio y calcio. Con este método, se obtiene la mayor velocidad de sedimentación en presencia de agua de mar pretratada biológicamente (Arias *et al.*, 2020).

El agua de mar pretratada no solo afecta la velocidad de sedimentación, sino que también la concentración de sólidos que se obtiene en la descarga de los espesadores. Jeldres *et al.*, (2019b) han demostrado que el uso de agua de mar en el espesamiento de relaves a pH natural (sin precipitación de hidróxidos), conduce a un porcentaje de sólidos cercano al 60% p/p, sin embargo, a pH mayor a 9 y producto de la precipitación de magnesio, el contenido de sólidos en la descarga se reduce a un 30% p/p. Al utilizar agua de mar pretratada, la concentración de sólidos en la descarga es significativamente mayor que en agua de mar sin tratar y con una baja dosificación de floculante, lo cual es una clara ventaja para los procesos de concentración porque permite trabajar con agua de mar en condiciones altamente alcalinas.

CONCLUSIONES

Debido a la fuerte escasez hídrica y sequía en el país, especialmente en las zonas áridas en el norte de Chile, es necesario disminuir el consumo de agua en los procesos minero-metalúrgicos para la obtención de cobre y otros minerales de interés. La industria realiza grandes esfuerzos por cerrar el circuito de agua y reciclar la mayor cantidad posible. Hasta ahora, las plantas concentradoras recirculan un 70% de agua aproximadamente, pero existe tecnología para llegar a 80%. Como alternativa la industria minera utiliza agua de mar, y la usa en forma directa (sin desalar) o desalada. Sin dudas es una gran solución, aunque permanece sin resolver la contaminación por el alto consumo de combustibles fósiles y el impacto negativo de la descarga de salmueras concentradas sobre el ecosistema marino.

La calidad del agua en las operaciones metalúrgicas tiene un gran impacto en los resultados, sin embargo, el agua de mejor calidad no siempre es la que está libre de iones (ya sea agua continental o desalada). Aunque la salinidad puede ayudar a producir flóculos de relave más fuertes y compactos en la etapa de espesamiento, aumentando la velocidad de sedimentación y produciendo un rebose más claro, algunos iones son definitivamente perjudiciales para la agregación de partículas y la mejor disposición del floculante en la solución.

De esta manera, un proceso de desalinización parcial favorece la etapa de espesamiento, aumentando la recuperación de agua y velocidad de sedimentación, y produciendo un rebose menos turbio. Respecto al agua, la industria minera va encontrando soluciones, las que para ser definitivas requieren demostrar que son parte del desarrollo sustentable de todos los actores involucrados.

REFERENCIAS

- Arias, D., Villca, G., Pánico, A., Cisternas, L. A., Jeldres, R. I., González-Benito, G., Rivas, M. 2020. Partial desalination of seawater for mining processes through a fluidized bed bioreactor filled with immobilized cells of *Bacillus subtilis* LN8B. *Desalination*. 482, 114388.
- Castro, S. 2010. Use of seawater and other saline water (salinity between 1-7‰) pre-treated with lime or other alkalinizing reagents, on mineral flotation process, where the pre-treatment removes the ions of seawater hardness without significantly altering its salinity. Chilean Patent 52248. Concepción, Chile.
- Cisternas, L. A., Gálvez, E. D. 2018. The use of seawater in mining. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 39(1), 18–33.
- Cochilco, Comisión Chilena del Cobre. 2018. Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2018-2029. Ministerio de Minería. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/proyeccion%20agua%20minería%20del%20cobre%202018-2029%20-%20vf.pdf>
- Cochilco, Comisión Chilena del Cobre. 2019a. Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2018. Ministerio de Minería. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%ADa%202018.pdf>
- Cochilco, Comisión Chilena del Cobre. 2019b. Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030. Ministerio de Minería. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/proyeccion%20agua%20minería%20del%20cobre%202019-2030%20VF.pdf>
- Cochilco, Comisión Chilena del Cobre. 2020a. Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2020-2031. Ministerio de Minería. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyecci%C3%B3n%20Consumo%20EE%202020-2031.pdf>
- Cochilco, Comisión Chilena del Cobre. 2020b. Consumo de agua en la minería del cobre al 2019. Ministerio de Minería. Disponible en: https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2010%2030%20Consumo%20de%20agua%20en%20la%20minería%20del%20cobre%20al%202019_version%20final.pdf

- Cruz, C., Ramos, J., Robles, P., Leiva, W. H., Jeldres, R. I., Cisternas, L. A. 2020. Partial seawater desalination treatment for improving chalcopyrite floatability and tailing flocculation with clay content. *Minerals Engineering*. 151, 106307.
- Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Olabi, A. 2020. Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of the Total Environment*. 748, 141528.
- Feng, H., Lu, X., Wang, W., Kang, N.-G., Mays, J.W. 2017. Block copolymers: Synthesis, self-Assembly, and applications. *Polymers*. 9, 494.
- Jeldres, R. I., Piceros, E. C., Leiva, W. H., Toledo, P. G., Herrera, N. 2017a. Viscoelasticity and yielding properties of flocculated kaolinite sediments in saline water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 529, 1009-1015.
- Jeldres, R. I., Arancibia-Bravo, M. P., Reyes, A., Aguirre, C. E., Cortes, L., Cisternas, L. A. 2017b. The impact of seawater with calcium and magnesium removal for the flotation of copper-molybdenum sulphide ores. *Minerals Engineering*. 109, 10-13.
- Jeldres, R. I., Piceros, E. C., Leiva, W. H., Toledo, P. G., Quezada, G. R., Robles, P. A., Valenzuela, J. 2019a. Analysis of silica pulp viscoelasticity in saline media: The effect of cation size. *Minerals*. 9(4), 1–15.
- Jeldres, R. I., Piceros, E. C., Valenzuela, J. A., Robles, P. A. 2019b. Removal of calcium and magnesium from seawater to increase the solid concentration in thickener underflow. *Información Tecnológica*. 30(5), 291–298.
- Jenkel, E., Rumbach, B. 1951. Adsorption of high polymers from solution. *Z. Elektrochem*. 55, 612.
- Kang, X., Xia, Z., Chen, R., Sun, H., Yang, W. 2019. Effects of inorganic ions, organic polymers, and fly ashes on the sedimentation characteristics of kaolinite suspensions. *Applied Clay Science*. 181, 105220.
- Morel, J.T. 2015. Minería, agua y sustentabilidad. Foro Chileno-Alemán de Minería, Consejo Minero.

- Mpofu, P., Addai-Mensah, J., Ralston, J. 2003. Investigation of the effect of polymer structure type on flocculation rheology and dewatering behaviour of kaolinite dispersions. *International Journal of Mineral Processing*. 71, 247-268.
- Nasser, M.S., James, A.E. 2006. The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions. *Separation and Purification Technology*. 52(2), 241-252.
- Pérez, F., Urrea, M. 2011. Abastecimiento de aguas. Coagulación y floculación. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.
- Pillai, J. 1997. Flocculants and coagulants: The keys to water and waste management in aggregate production. *Nalco Company*.
- Pulgar, F., Ayala, L., Jeldres, M., Robles, P., Toledo, P. G., Salazar, I., Jeldres, R. I. 2021. Lime/sodium carbonate treated seawater to improve flocculation and sedimentation of clay-based tailings. *Polymers*, manuscript 1456590 en prensa.
- Quezada, G. R., Jeldres, R. I., Fawell, P. D., Toledo, P. G. 2018. Use of molecular dynamics to study the conformation of an anionic polyelectrolyte in saline medium and its adsorption on a quartz surface. *Minerals Engineering*. 129, 102-105.
- Radic, I. 2019. Desalación de agua de mar: situación en Chile y en el mundo. *Presentación Comisión Especial Sobre Recursos Hídricos del Senado de Chile*. Asociación Latinoamericana de Desalación y Reúso de Agua.
- Ramos, J. J., Leiva, W. H., Castillo, C. N., Ihle, C. F., Fawell, P. D., Jeldres, R. I. 2020. Seawater flocculation of clay-based mining tailings: Impact of calcium and magnesium precipitation. *Minerals Engineering*. 154, 106417.
- Scales, P. J. 2020. Can the mining industry reduce its water consumption by 80%? Webinar Internacional CRHIAM. Disponible en: <https://www.crhiam.cl/cuarta-charla-del-webinar-internacional-de-crhiam-abordo-la-optimizacion-del-agua-en-la-mineria/>

- Shaikh, S., Nasser, M.S., Hussein, I.A., Benamor, A. 2017. Investigation of the effect of polyelectrolyte structure and type on the electrokinetics and flocculation behavior of bentonite dispersions. *Chemical Engineering Journal*. 311, 265-276.
- Toledo, P. G. 2021. Simulación molecular de polímeros en agua de mar. Consultar publicaciones en <https://www.crhiam.cl/investigacion/lineas-de-investigacion/>
- Troncoso, P. 2012. Floculación de suspensiones de sílice: efecto del floculante. Memoria de Título, Ingeniería Química, Universidad de Concepción.
- Yin, X., Gupta, V., Du, H., Wang, X., Miller, J. 2012. Surface charge and wetting characteristics of layered silicate minerals. *Advances in Colloid and Interface Science*. 43-50, 179-182.



Universidad de Concepción

USO DE AGUA DE MAR EN MINERÍA AVANCES EN EL ESPESAMIENTO DE RELAVES RICOS EN ARCILLAS

Francisco Pulgar / Ricardo I. Jeldres / Fernando Concha / Pedro G. Toledo

Serie Comunicacional CRHIAM

