



Universidad de Concepción

INNOVAR EN EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA INDUSTRIA MINERA

Andrés Ramírez / Leopoldo Gutiérrez / Fernando Betancourt
Ramón Díaz-Noriega / Juan D. Giraldo



Serie Comunicacional CRHIAM

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:

Innovar en el uso de los recursos hídricos en la industria minera.

Andrés Ramírez, Leopoldo Gutiérrez, Fernando Betancourt,

Ramón Díaz-Noriega y Juan D. Giraldo.

Abril 2023

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

INNOVAR EN EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA INDUSTRIA MINERA

Andrés Ramírez / Leopoldo Gutiérrez / Fernando Betancourt
Ramón Díaz-Noriega / Juan D. Giraldo

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

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, conocimientos 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



Andrés Ramírez

Ingeniero de Materiales.
Doctor en Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Profesor asistente del
Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.



Leopoldo Gutiérrez

Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor of Philosophy in Mineral Processing,
University of British Columbia, Canadá.
Profesor Asociado del Departamento de
Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM



Fernando Betancourt

Doctor en Ciencias Aplicadas, mención Ingeniería
Matemática, Universidad de Concepción.
Profesor Asociado Facultad de Ingeniería,
Universidad de Concepción.
Investigador Centro de Investigación en
Ingeniería Matemática (CIZMA).
Investigador Asociado CRHIAM.



Ramón Díaz-Noriega

Doctor en Minería, Obra Civil, Medio Ambiente
y Dirección de Proyectos
Universidad de Oviedo, España.
Profesor Asistente del Departamento de Ingeniería
Metalúrgica, Universidad de Concepción.



Juan David Giraldo

Ingeniero Químico.
Doctor en Ciencias con Mención en Química.
Profesor Auxiliar
Escuela de Ingeniería Ambiental,
Instituto de Acuicultura
Universidad Austral de Chile.

INTRODUCCIÓN

Innovar, según la definición de la Real Academia Española de la lengua es "... alterar algo, introduciendo novedades" (RAE, 2022). Aplicar el concepto de innovar al ámbito de la minería, consiste en mejorar cualquiera de los procesos u operaciones unitarias, para seguir obteniendo los productos estratégicos que demanda la sociedad.

En la minería, innovar es un proceso complejo y difícil, debido a que pequeñas alteraciones implican grandes inversiones económicas para su desarrollo e implementación. Además, los procesos y operaciones mineras son muy sensibles a pequeñas modificaciones y esto da lugar a que errores producidos en el intento de innovar puedan tener grandes repercusiones negativas en la producción y la obtención de metales u otros productos de la minería, que son necesarios para mantener la calidad de vida actual.

Los procesos de innovación centran su interés en hacer de la minería una industria más sostenible y eficiente, en la reducción de la demanda de los recursos como el agua, que es el foco de este documento.

RETOS ACTUALES DE LA INDUSTRIA MINERA

En términos generales, el sector productivo minero enfrenta actualmente un cambio de paradigma y transformación, que implica innovar con una visión más integradora las necesidades sociales, incluyentes y sostenibles, que contribuya al desarrollo económico del país, mejorando la calidad de vida de las personas sin comprometer las capacidades de las generaciones futuras.

La industria minera chilena asume sus responsabilidades en todos los aspectos mencionados, y ayuda a que se puedan cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en el Pacto Global de Naciones Unidas (Figura 1).



Figura 1.

Aportación de la gran minería chilena a los ODS.
Fuente: Consejo Minero, (2022).

La sociedad debe ser consciente de las exigencias en recursos minerales que de manera indirecta se hace a la minería, para cumplir con estos objetivos y alcanzar un desarrollo sostenible (Figura 2).

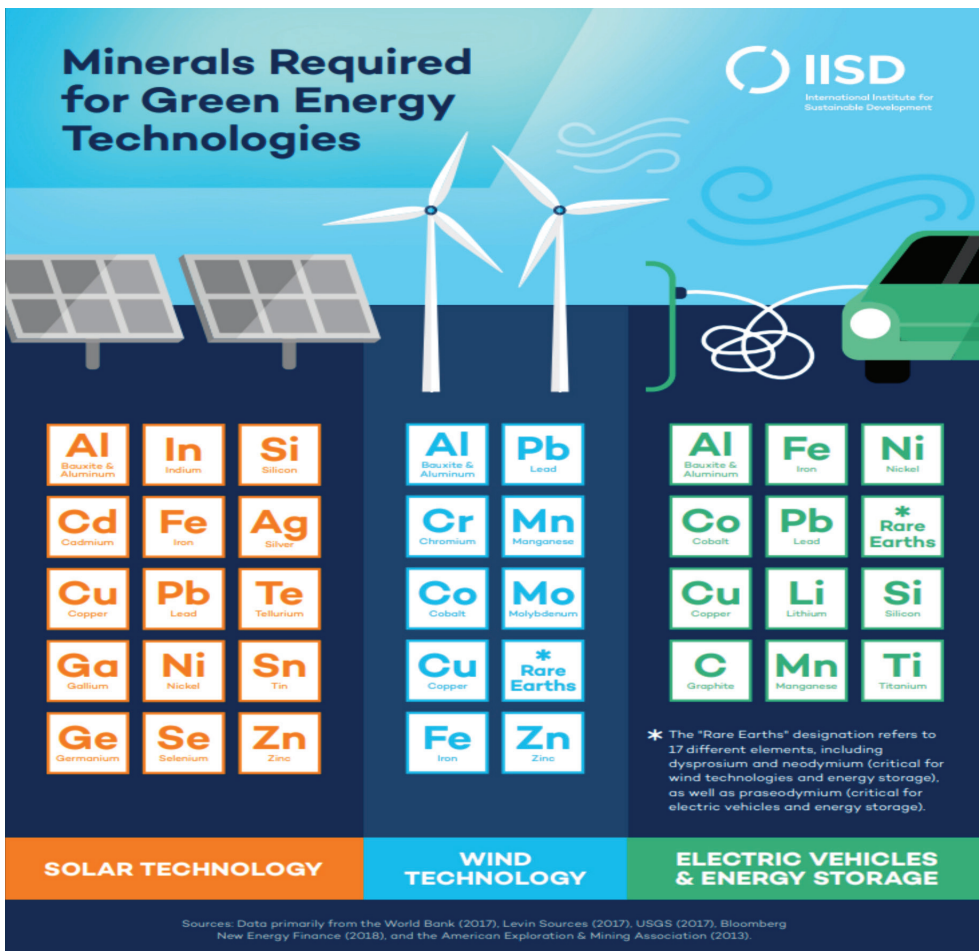


Figura 2.

Minerales requeridos para las tecnologías verdes.

Fuente: Clare Church, C & Crawford, A., (2018).

Este conocimiento de la minería es necesario para no menoscabar los esfuerzos que se están haciendo desde el ámbito industrial, académico, institucional o político, para que la explotación minera mejore y, al mismo tiempo, siga cumpliendo con su función en la economía mundial y nacional.

APORTES DE LA MINERÍA CHILENA A LA ECONOMÍA DEL PAÍS

Chile es un país minero reconocido a nivel mundial por la extracción de minerales que son materias primas estratégicas para la transición energética. En este contexto, se asocia principalmente a la producción de cobre, aportando aproximadamente el 28% de la producción mundial durante el año 2021 (Figura 3) y siendo históricamente el mayor productor de este metal.

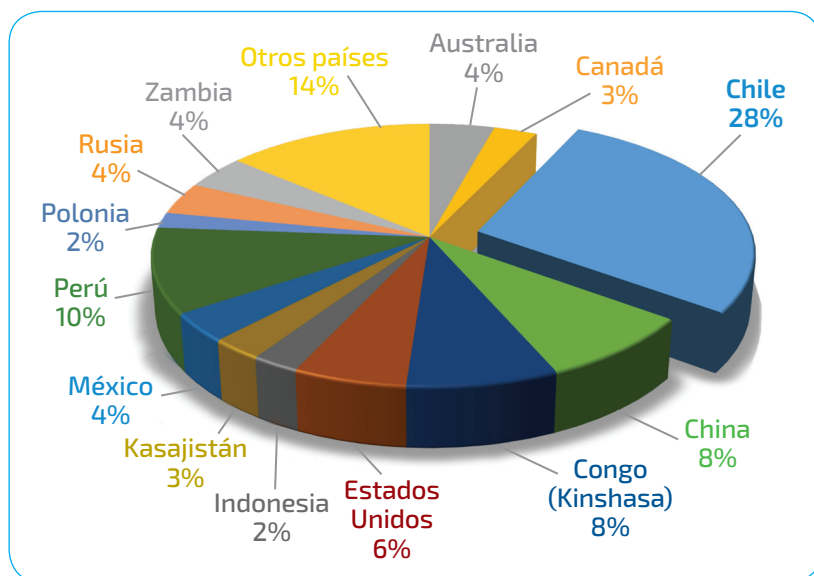


Figura 3.

Producción mundial de cobre en 2021. Fuente: US Geological Survey, (2022).

A nivel nacional, en términos de aportes al Producto Interno Bruto (PIB) de Chile, la industria minera aportó desde el año 2017 al año 2021 entre el 9.4% y el 14.6% del total de este indicador (Véase Tabla 1), (SERNAGEOMIN, 2018; 2019; 2020; 2021; 2022). De este aporte al PIB, la minería del cobre representa aproximadamente el 90%.

Tabla 1.

Estadística de PIB y producción de cobre en Chile entre 2017 y 2021.

Fuente: SERNAGEOMIN, (2018; 2019; 2020; 2021; 2022).

Año	Aporte de la minería al PIB, %	Aporte de la minería del cobre al PIB, %	Producción de cobre fino, *Mt	Aporte a producción de cobre mundial, %
2021	14.6	13.3	5.588	26,6
2020	12.5	11.2	5.773	28,5
2019	9.4	8.4	5.822	28,4
2018	9.8	8.9	5.872	28,3
2017	10.1	9	5.558	27,9

*Miles de toneladas

En la producción de materias primas en Chile, hay varios tipos de minería metálica y no metálica que son estratégicas y de interés nacional. Además del cobre, Chile ocupa el primer puesto a nivel mundial en la producción de renio, yodo y nitratos naturales. Junto con ser el segundo productor de molibdeno, litio y compuestos de boro; el quinto en producción de plata y el octavo en compuestos de potasio (SERNAGEOMIN, 2022; US Geological Survey, 2022). Aún con estos datos de producción, en general se habla solamente de dos tipos de minería en el país, la minería del cobre y la del litio. Esto puede ser debido a que las producciones de los demás minerales estratégicos, en los que el país está posicionado a nivel internacional, son casi siempre obtenidas como subproductos de las explotaciones mineras de cobre y litio.

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA MINERÍA EN CHILE

El mapa minero de Chile (Véase Figura 4), muestra que existe minería a lo largo de todo el país, explotándose diferentes tipos de recursos. Productos energéticos, oro y minería no metálica, principalmente, desde la zona de Concepción hasta el sur del país. Mientras que, en las latitudes desde Talca, hasta el límite norte del país, se encuentra la minería del hierro, oro, cobre, litio, entre otros metales y minería no metálica. La mayor cantidad de minas, incluida la minería del cobre, se concentra en la zona centro y norte del país (SONAMI, 2022).

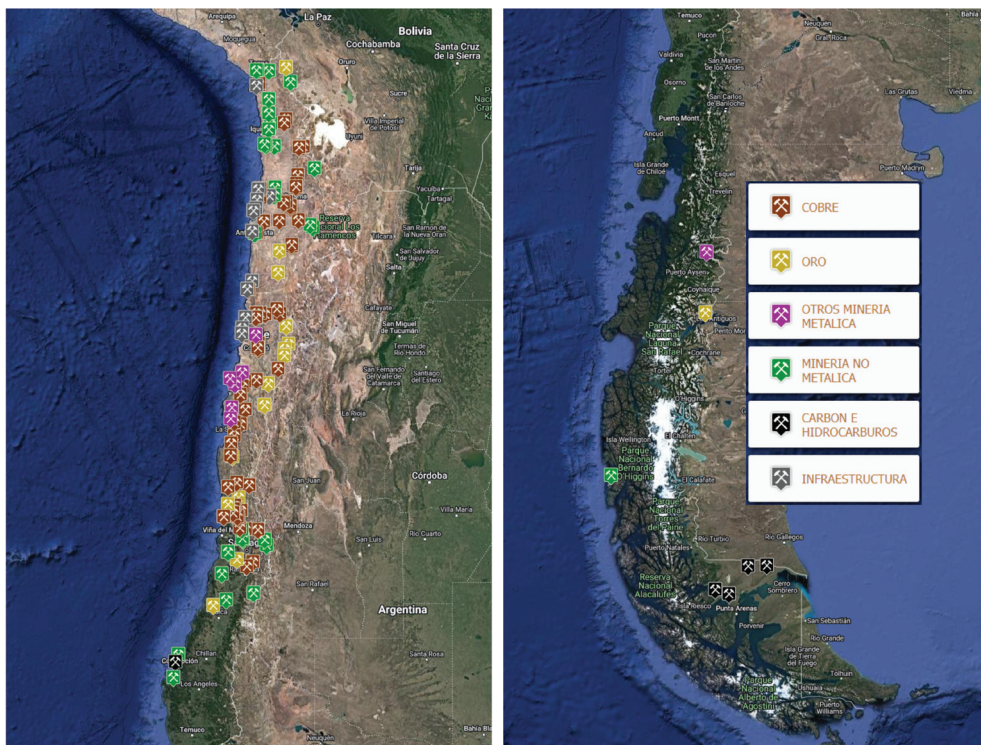


Figura 4.

Mapa minero de Chile. Fuente: SONAMI, (2022).

DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CHILE

La disponibilidad promedio de agua per cápita en Chile es de 51.218 m³/persona/año, muy superior al promedio mundial que es de 6.600 m³/persona/año (SONAMI, 2018). Sin embargo, la distribución geográfica del agua disponible es muy desigual (Véase Figura 5), con un promedio de 499 m³/persona/año en la zona entre la Región de Arica y Parinacota y la Región Metropolitana.

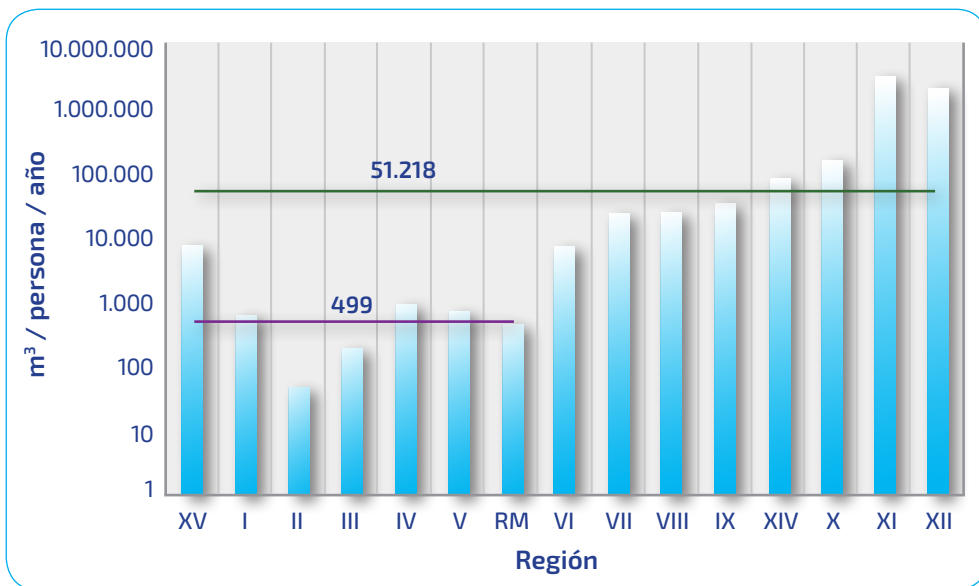


Figura 5.

Disponibilidad de agua por regiones. Fuente: Betancourt, M. C., (2018).

Las regiones de la zona centro norte del país son las más afectadas por la escasez hídrica en los últimos años, según las estimaciones del balance hídrico del Banco Mundial (2011), las previsiones muestran además que este problema se verá incrementado en los próximos años.

USO DEL AGUA EN MINERÍA

Si se compara la distribución geográfica de la minería y la de los recursos hídricos, hay una relación inversamente proporcional entre ambas. Es decir, donde más minería se desarrolla menor disponibilidad de agua hay, lo que en muchas ocasiones es un problema para esta industria desde el punto de vista operativo, por la necesidad de este recurso. A pesar de esto, se debe tener en cuenta, que la minería es una industria que demanda poca cantidad de agua en comparación con otros sectores (Figura 6).

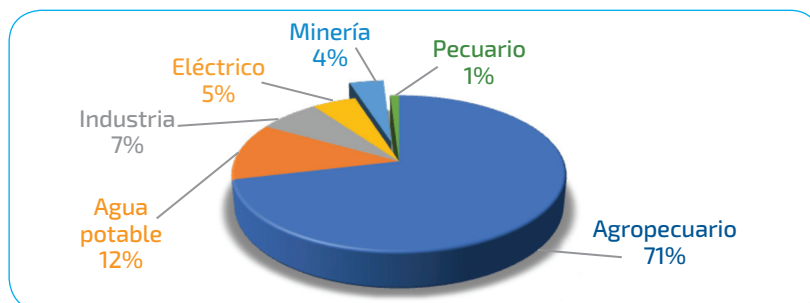


Figura 6.

Consumo de agua por sectores en Chile. Fuente: Consejo Minero, (2022a).

Dentro del sector de la minería chilena, el consumo de agua también es desigual (Figura 7), siendo la gran minería del cobre la mayor demandante del recurso hídrico.

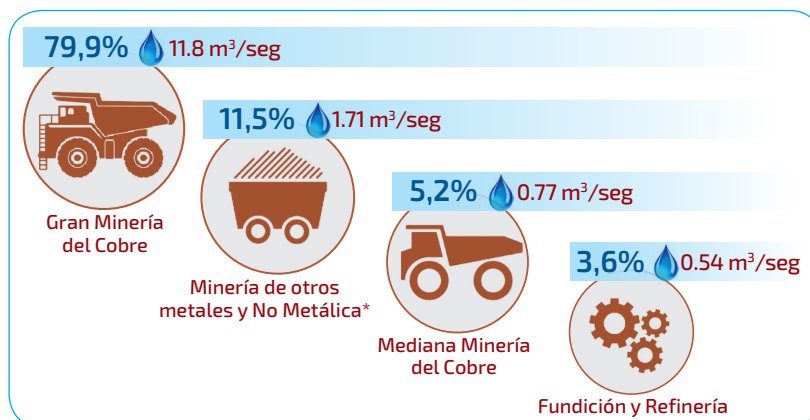


Figura 7.

Distribución de consumos de agua en el sector de la minería. Fuente: Betancourt, M. C., (2018).

La escasa disponibilidad de agua en las regiones del norte de Chile, que es donde se encuentra ubicada la mayor parte de la minería del cobre y otros metales, genera una competencia por el uso del agua entre las comunidades y las mineras. Además de otros problemas de carácter ambiental y social. Por estos motivos, la industria minera ha dedicado importantes esfuerzos a minimizar el consumo de agua en sus operaciones, aumentando las tasas de recirculación de agua hasta valores por encima del 70% (Figura 8).

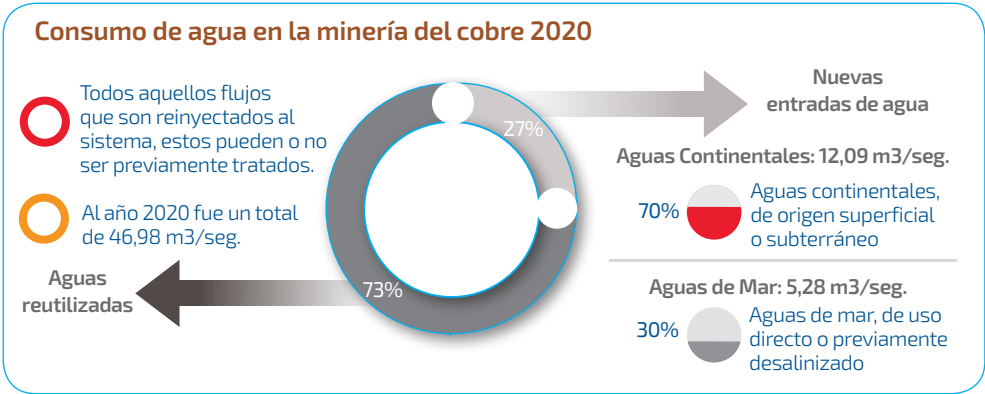


Figura 8.

Tasas de recirculación de agua en la gran minería del cobre en el año 2020. Fuente: Brantes, R., (2022).

La minería también innova en el uso de recursos hídricos buscando nuevas fuentes de agua no continental, aumentando en los últimos años el uso de agua de mar tanto salada como desalada (Figura 9).

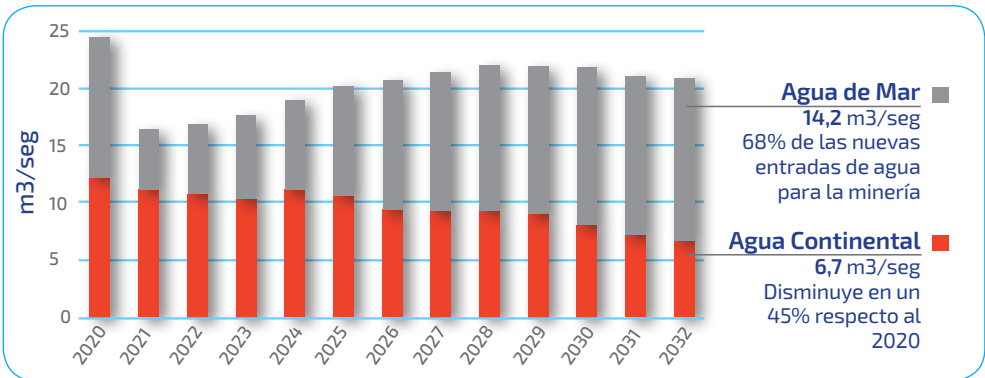


Figura 9.

Proyecciones de consumo de agua en la minería de cobre. Fuente: Brantes, R. (2022).

Para focalizar de manera adecuada los esfuerzos y mejorar la eficiencia en el uso de recursos hídricos, en primer lugar, es necesario identificar los procesos que tienen mayores consumos o requerimientos de agua dentro de una operación minera. Desde el punto de vista de la minería del cobre, las operaciones de explotación, carguío y transporte, tanto en mina subterránea como a cielo abierto, suponen el 4% del consumo total, los procesos de hidrometalurgia para el tratamiento de óxidos el 11%, las fundiciones y refinado requieren un 3% y los procesos de concentración de sulfuros el 59%; el resto del agua consumida equivalente a un 22% se reparte en otros usos y cesiones a terceros (Branes, R., 2022).

En base a estos datos, se identifica que los procesos que requiere mayor cantidad de agua en la minería del cobre son los de concentración, por lo tanto, es donde se deben realizar esfuerzos importantes para reducir el consumo.

La ruta del procesamiento de este mineral inicia en la mina, comúnmente conocida como el rajo. Detrás de éste hay grandes desarrollos de ingeniería para poder extraer las zonas de interés que se transportarán hasta la etapa de chancado, donde se reduce el tamaño de las rocas (del orden de 1 metro) hasta unas cuantas pulgadas o fracciones de pulgada. Hasta este punto se utiliza el agua para refrigeración de equipos y control de polvos principalmente.

Una vez reducida la roca de tamaño se pasa a la planta concentradora, donde se produce el mayor consumo de agua. En este punto se inicia el proceso de molienda y clasificación, que es la etapa en la que ingresa la mayor cantidad de agua. El objetivo es, obtener partículas del orden de las 150 micras (0.15 mm). Una vez que se reduce el tamaño se lleva al proceso de concentración por flotación, en este punto se busca separar el mineral de interés del que no tiene valor comercial, el concentrado (rico en cobre) se lleva a un espesamiento (separación sólido líquido) y a un filtrado, donde se reduce la cantidad de agua que contiene, a menos del 10%.

El agua recuperada se lleva nuevamente al proceso para ser reusada. El concentrado es comercializado o pasa a los procesos pirometalúrgicos en las fundidoras nacionales y a refinación para obtener el cobre comercial (99.99% Cu).

En el caso de las gangas, son llevadas a espesamiento y posteriormente dejadas en depósitos de relaves conocidos comúnmente como tranques de re-

laves, donde se dispondrá de manera definitiva. El agua recuperada en esta etapa es la mayor proporción de agua recuperada para ser recirculada al proceso reduciendo de forma significativa la demanda de agua fresca.

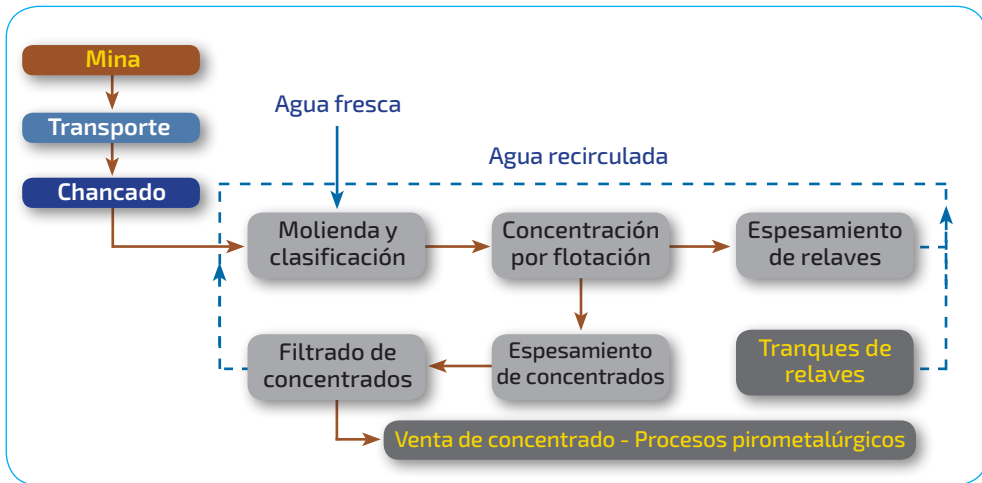


Figura 10.

Esquema de procesamiento de minerales sulfurados de cobre.

Fuente: Elaboración propia.

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN MINERÍA

Todas las innovaciones realizadas en la minería implican investigar y desarrollar conocimientos que permitan mejorar los procesos para adaptarse a las condiciones actuales del entorno y la sociedad. Los grandes costos asociados a modificaciones en el proceso, hacen que en muchos casos las etapas de implementación de innovaciones que puedan significar efectos sensibles al proceso sean complejas, en especial, porque parar una operación minera significa grandes sumas de dinero.

Lo anterior no quiere decir que no existan investigaciones e innovaciones, como es el caso de los molinos de alta presión HGPR, que pretenden ser una alternativa en los procesos para reducir la cantidad de energía utilizada en la molienda, o diferentes tipos y diseños de celdas de flotación con la intención de generar mayor eficiencia y recuperación de elementos de valor en el proceso de concentración.

INNOVACIÓN DESDE UN PUNTO DE VISTA ACADÉMICO

Desde los ámbitos académicos, para llegar a una innovación de un proceso se requiere del desarrollo de una idea que se debe sustentar desde las bases teóricas y experimentales, teniendo un primer nivel de comprobación desde la matemática, la física y/o la química. La validación de estas ideas o hipótesis desde lo teórico posteriormente se convierte en una experimentación a pequeña escala, con ensayos en el laboratorio desde donde se trabaja con sistemas aislados, controlando las variaciones y evaluando las respuestas a éstas, analizando las ventajas y desventajas ante los cambios y la sensibilidad.

La segunda etapa del desarrollo para llegar la innovación está enfocada en el escalamiento dentro del laboratorio, donde el sistema se enfrenta a factores que pueden alterar las respuestas, por ejemplo, en el caso del procesamiento de minerales pueden cambiar las condiciones del agua o existir minerales que dificulten el procesamiento.

La tercera etapa está enfocada en el escalamiento a nivel piloto y en condiciones cercanas a la operación. Llegar a este punto puede tomar mucho tiempo, incluso años, pues implica el desarrollo de tecnologías, la integración de diferentes disciplinas y áreas del conocimiento, la selección correcta de materiales, incluso el desarrollo de materiales que puedan resistir las condiciones de trabajo en caso de que no existan comercialmente.

En la actualidad, la gran mayoría de las innovaciones y desarrollos para su aplicación en el procesamiento de minerales requieren la participación de profesionales en áreas de mecánica, materiales, informática o afines, metalurgia y ambiental. Debido a que para poder llegar a una escala de implementación en una planta de procesamiento se necesita que el desarrollo tenga la respuesta metalúrgica esperada, la comunicación con la sala de control e integración con el sistema y las tecnologías utilizadas es importante, para que se cumplan las condiciones de seguridad en los equipos, que sea seguro ambientalmente y que los materiales resistan las condiciones de trabajo, pues usualmente son altamente abrasivos por tratarse de pulpas (mezcla de agua y mineral particulado).

Finalmente, se encuentra la implementación en la industria minera, lo que es altamente complejo, pues cualquier problema que se pueda presentar e implique una parada no programada significa grandes cantidades de dinero en juego.

Para la evaluación de las innovaciones y desarrollos se utiliza una escala de valoración de la preparación o maduración de los proyectos denominada TRLs por su nombre en inglés “*Technology Readiness Levels*”. Esta metodología de valoración se utiliza de forma transversal en todo tipo de proyectos y nace de un concepto de la NASA (Tobergte, & Curtis, 2013; Fuentes *et al.*, 2021). Esta metodología o la adaptación que se utiliza actualmente cuenta con nueve niveles diferentes, los que inician con una idea y terminan con la validación y comercialización. Los diferentes niveles de forma simplificada se presentan en la Figura 11.



Figura 11.

Resumen de las TRLs. Fuente: Elaboración propia.

¿COMO SE HA INNOVADO EL PROCESAMIENTO DE MINERALES?

El siglo XX y lo que va del siglo XXI han sido, sin lugar a duda, las décadas que han significado mayor cantidad de desarrollo humano, partiendo de los desarrollos en la masificación de la energía eléctrica, que ha permitido poder contar con iluminación, electrodomésticos y otras tantas herramientas que han aportado al bienestar de las personas. En este mismo sentido la industria a presentado grandes avances en todas las áreas del conocimiento.

En el caso de procesamiento de minerales, que es el foco de este documento, se han dado grandes saltos tecnológicos que han empezado como una idea de innovación. Éstos son probados en universidades y en la industria, ya que gran parte de los desarrollos se han dado a partir de investigaciones de empresas que se dedican a la producción de herramientas e insumos para la industria. A continuación, se presentan algunos ejemplos para contextualizar:

Transporte: el transporte ha sido uno de los factores que ha tenido gran desarrollo para toda la población y en el caso de la minería no es diferente, pues se pasó de transportar pequeñas cantidades de mineral con humanos a transporte de tracción con animales, luego con pequeños camiones y vías férreas, hasta llegar a tener los grandes camiones mineros que se han vuelto parte de los emblemas de la minería, teniendo en la actualidad, en Chile camiones que puede transportar más de 350 t. Actualmente hay camiones que pueden transportar hasta 600 t, y el incremento en la capacidad de carga ha crecido aceleradamente desde la década de los 70's. Este crecimiento ha permitido llegar a mover miles de toneladas al día para llevarlas desde la mina hasta la planta.

Chancado (reducción de tamaño desde rocas): si la capacidad de transportar mineral ha aumentado, el desarrollo de chancadores ha mejorado en su capacidad de procesar, pasando de chancadores de mandíbulas a chancadores giratorios. Con estos últimos una evolución en tamaño, pasando de tener capacidad de chacar unas pocas toneladas por hora, a tener sistemas de chancado primario que deben procesar 100.000 t/día. Esto implica una capacidad de chancado del orden de 4.000 t/h.

Este gigantismo no solo se da en el chancador giratorio, se presenta en todos los chancadores actuales usados en la industria y en los anexos que se requiere para su funcionamiento como son los motores y sistemas eléctricos, mecánicos y electrónicos. Así mismo, se han desarrollado diferentes tecnologías de chancado llegando a tener en la actualidad sistemas más eficientes energéticamente para los chancados más finos como es el caso de los chancadores de alto impacto (Köken & Qu., 2020).

Molienda y clasificación (reducción de tamaño de pulgadas a micrones): en esta etapa del procesamiento de minerales se ha innovado bastante, teniendo diferentes cuerpos molidores (molinos de barras, molinos de bolas), aumentando la capacidad e implementando molinos que pueden sustituir etapas de chancado y generar gran cantidad de partículas finas (molinos SAG,

Molinos AG), sistemas de molienda para generar partículas cada vez más finas (molinos verticales) y sistemas de molienda en seco (molino HPGR).

Todos estos tipos de molino se han modernizado y su evolución se ha enfocado principalmente en el aumento de capacidad y mejora de la eficiencia energética, ya que en esta etapa de procesamiento de minerales es donde se produce el mayor consumo energético.

En relación con las operaciones de clasificación, diversos equipos han sido diseñados y construidos. Si bien los principios básicos en que se basa su funcionamiento no han cambiado, grandes avances pueden ser reportados en el siglo XX. Los clasificadores mecánicos, por ejemplo, de tipo rastra o tornillos clasificadores (tipo espiral), fueron ampliamente usados en circuitos cerrados de molienda durante la primera mitad del siglo XX. Su tamaño y consumo energético los vuelven complejos de manejar lo que centro la investigación y desarrollo en los clasificadores de tipo hidráulico. Dentro de este tipo, desde la segunda mitad del siglo XX hasta hoy en día, destaca el hidrociclón debido a su gran simplicidad y su alta relación capacidad/tamaño, perdiendo que las etapas de clasificación aumenten su capacidad sin un aumento significativo de tamaño en área ocupada.

Concentración por flotación (procesos en los cuales se separan los minerales de interés a partir de las propiedades hidrofóbicas): la concentración es uno de las parte de la minería que ha presentado una constante evolución, se pasó de tener procesos de concentración por métodos gravitacionales, donde la principal condición de separación de los minerales era la densidad (y por tanto la diferencia de peso) a modificar las propiedades superficiales de las partículas permitiendo cambiar el principio de separación por especies desarrollándose la flotación. En esta área no solo se ha desarrollado el tema de la capacidad, llegando a tener celdas de flotación con tamaños superiores a los 600m³ en el 2017 (Bermudez., *et al.*, 2022), sino que se han desarrollado tecnologías que han permitido la existencia numerosos tipos de celdas de flotación diferentes. Además, se han llegado a tener diversas formas de generación de burbujas y técnicas de mediciones internas (sensores). De igual forma, al ser la flotación un proceso fisicoquímico de superficies de partículas, existen desarrollos de diferentes reactivos que modifican las superficies, promueven una mejor selectividad y una alta eficiencia en los procesos, permitiendo el aumento de capacidad de procesamiento y recuperando tanto mineral de interés como es posible en este proceso.

Separación sólido líquido (espesamiento y filtrado): estas etapas del procesamiento son de gran importancia desde todos los ámbitos de la actividad minera. En principio, son los encargados de hacer recircular el agua y generar una menor demanda de este recurso y, en segundo lugar, se encargan de las pulpas con altos contenidos de sólidos (espesamiento) que se pueden depositar o almacenar de mejor forma en los tranques de relaves. En los concentrados permiten tener mayor velocidad en los procesos de filtrado, que es donde se generan sólidos húmedos para ser alimentados a los procesos posteriores.

En estos procesos la fisicoquímica juega un papel importante, pues si bien se pueden definir como procesos mecánicos, los contaminantes del agua, el uso de reactivos, como los coagulantes y los floculantes para el espesamiento, y los surfactantes para el filtrado, han generado grandes desarrollos para estos procesos, teniendo cambios de mentalidad, como es el caso del espesamiento de los relaves.

El desarrollo tecnológico para la masificación de los espesadores lo generó indudablemente Dorr con el invento del espesador continuo en 1905 (Concha, 2014) seguido por diferentes diseños de espesadores, hasta grandes desarrollos en técnicas de filtrado.

ALGUNAS INNOVACIONES GENERADAS EN LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN PARA LA INDUSTRIA MINERA

En temas de innovación para la industria minera, si bien, gran parte se han desarrollado en otras latitudes, la Universidad de Concepción es una institución que a nivel país ha generado diferentes innovaciones que se encuentran en altos niveles de desarrollo. Por ejemplo, en la actualidad existe un reómetro en línea patentado que está en un desarrollo entre TRL 8 y TRL 9 y que se encuentra en un licenciamiento con la empresa KONATEC spa (Figura 12).



Figura 12.

Reómetro en línea licenciado a KONATEC spa. Fuente kona-tec.com.

Así mismo, se han desarrollado tecnologías para laboratorios y plantas, en los que ha participado institucionalmente, como es el caso de SEDIRACK, para medir velocidad de sedimentación de pulpas en laboratorio (Figura 13). Esta tecnología ya está comprobada y se utiliza en diferentes empresas mineras y laboratorios, además viene con un software integrado que permite simplificar los cálculos posteriores a la elaboración de los ensayos.



Figura 13.

SEDIRACK. Fuente: Concha, (2014).

Además, se tienen avances en estudios de reactivos procedentes de residuos de otras industrias como alternativas para los reactivos de flotación actuales, como es el caso de los lignosulfonatos (Quiroz, *et al.* 2022), hemi-celulosas y monosacáridos (Castillo *et al.*, 2020), y desarrollo de técnicas de acondicionamiento de burbujas para la flotación (Figura 14).

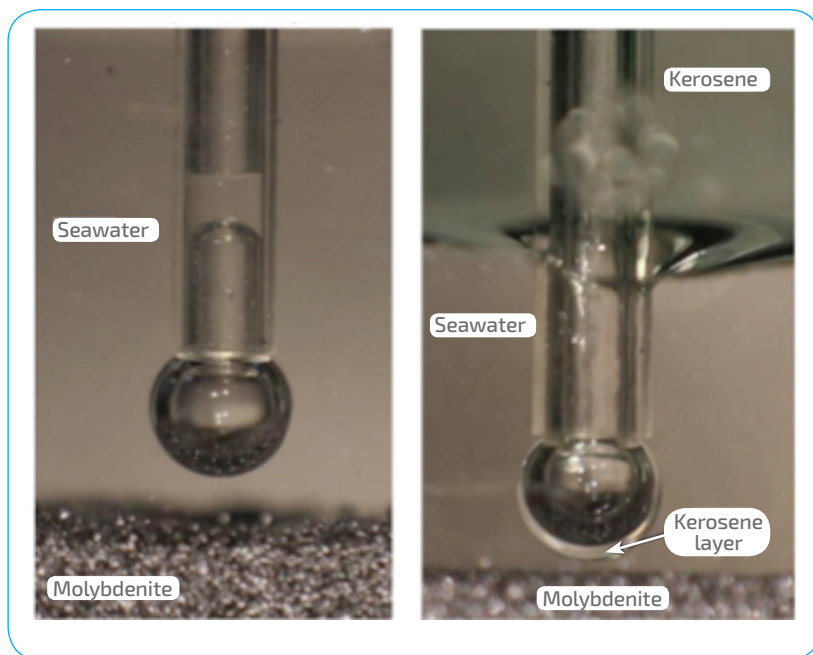


Figura 14.

Acondicionamiento de burbujas (Ramírez *et al.*, 2020)

Fuente: Ramírez *et al.*, (2020).

En técnicas relacionadas con la recuperación de agua para disminuir la demanda de agua fresca, se encuentra el diseño de un prototipo de ultrafloculador, el cual tiene como principio la modificación de la dirección del fluido a alta velocidad, para promover la colisión de las partículas entre ellas y con los floculantes con la intención de mejorar el proceso de espesamiento.

CONCLUSIONES

Como se revisó anteriormente, en Chile, la industria minera enfrenta importantes retos que requieren innovar en aspectos muy transversales, que tienen un fuerte componente de renovación tecnológica (Lucchini *et al.*, 2021) pero también contemplan aspectos sociales, ambientales y económicos.

Algunos de estos desafíos son la convivencia con las comunidades en el territorio donde se demanda suelo e infraestructura para la producción y transporte de mineral, la gestión eficiente de recursos naturales escasos como el agua (Valor Minero, 2014), la conservación de la biodiversidad y el patrimonio cultural, el uso eficiente de la energía, la sustitución de combustibles fósiles por energías limpias, la reducción de emisiones, la digitalización y el uso de nuevas tecnologías para la captura y análisis de datos, la trazabilidad de los productos y adopción de estándares de sostenibilidad internacionales; y el desarrollo de conocimiento enfocado a la economía circular, para conseguir soluciones en aspectos importantes como la reducción y transformación de los residuos masivos que producen las minas, en productos con valor añadido.

Por ello, las anteriores y otras tantas innovaciones se desarrollan a partir de investigación para buscar un menor impacto ambiental, mejorar la producción de los elementos de interés, aumentar la eficiencia energética y alcanzar, en la medida de lo posible, la economía circular, como es el claro ejemplo de la constante búsqueda de disminuir la cantidad de agua que se consume en la industria minera.

REFERENCIAS

- Banco Mundial. 2011. Chile. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible Región para América Latina y el Caribe. Disponible en: https://dga.mop.gob.cl/eventos/Diagnostico%20gestion%20de%20recursos%20hidricos%20en%20Chile_Banco%20Mundial.pdf
- Bermudez, G., Perkins, T., Sorensen, R., Smith, C., Bartsch, L., Moyo, J., Dube, R., & Brändström, M. 2022. Froth launder modification in 300 m³ flotation cells at kennecott copperton concentrator. *SME Annual Meeting 2022*.
- Betancourt, M. C. 2018. Insumos estratégicos en minería: agua y energía asociada. SONAMI. Disponible en: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2019/05/Agua-MCBetancour-VF.pdf>
- Brantes, R. 2022. Proyecciones de consume de energía eléctrica y agua en la minería del cobre al 2032. COCHILCO. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Presentaciones/Ppt%20proyeccion%20agua%20y%20energia%202020.pdf>
- Castillo, I., Gutierrez, L., Hernandez, V., Diaz, E., & Ramirez, A. 2020. Hemiacetulosos monosaccharides and their effect on molybdenite flotation. *Powder Technology*, 373, 758-764.
- cettem.com (<https://www.cettem.com/sedirack>)
- Clare Church, C & Crawford, A. 2018. Green Conflict Minerals: The fuels of conflict in the transition to a low-carbon economy. International Institute for Sustainable Development. IISD Report. Disponible en: <https://www.iisd.org/system/files/publications/green-conflict-minerals.pdf>
- COCHILCO. 2022^a. Consumo de agua en la minería del cobre – Actualización al 2021 – Transición metodológica. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%202021.pdf>
- Concha, F. 2014. *Solid-liquid separation in the mining industry*. Springer International Publishing.

- Consejo Minero. 2022a. La minería en números. Disponible en: https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2022/08/LIBRO-Mineria-en-numeros_6taedicion.pdf
- Consejo Minero. 2022b. Cifras actualizadas de la minería. Disponible en: <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2022/03/Cifras-Actualizadas-de-la-Mineria-2022-Marzo.pdf>
- Fuentes Martínez, E. F., Salgado Jiménez, T., Orea Ortiz, A., & Ríos Martínez, E. 2021. Diagnóstico del nivel de maduración tecnológica de los proyectos realizados en instituciones de investigación y universidades en México para mitigar el problema del sargazo.
- Humphreys, D. 2020. Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral Economics*, 33(1), 115-125.
- Köken, E., & Qu, J. 2020. Comparison of secondary crushing operations through cone and horizontal shaft impact crushers. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 20(1.1), 789-796.
- Lucchini, F.; Moreno, E.; Pérez, V.; Jofré, H.; Olivares, G.; Cattaneo, D.; Barrios, J.; Rubilar, J.P.; Sepúlveda, A.; Román, E.; y Álvarez, R. 2021. Minería Verde. Oportunidades y desafíos. Corporación Alta Ley.
- Quiroz, C., Murga, R., Giraldo, J. D., Gutierrez, L., & Uribe, L. 2022. Understanding the Interaction of Lignosulfonates for the Separation of Molybdenite and Chalcopyrite in Seawater Flotation Processes. *Polymers*, 14(14), 2834.
- RAE. 2022. Innovación. Disponible en: <https://dle.rae.es/innovaci%C3%B3n>
- Ramirez, A., Gutierrez, L., & Laskowski, J. S. 2020. Use of "oily bubbles" and dispersants in flotation of molybdenite in fresh and seawater. *Minerals Engineering*, 148, 106197.
- SERNAGEOMIN. 2019. Anuario de la Minería de Chile 2018. Disponible en: https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/Libro-Anuario_2018_.pdf
- SERNAGEOMIN. 2020. Anuario de la Minería de Chile 2019. Disponible en: (https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_2019_act100720.pdf)

- SERNAGEOMIN. 2021. Anuario de la Minería de Chile 2020. https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_de_%20la%20Mineria_de_Chile_2020_290621.pdf
- SERNAGEOMIN. 2022. Anuario de la Minería de Chile 2021. Disponible en: https://www.sernageomin.cl/pdf/Anuario_de_la_mineria_de_chile_2021_v_30062022.pdf
- SERNAGEOMIN. 2018. Anuario de la Minería de Chile 2017. Disponible en: https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/06/Anuario_2017.pdf
- SONAMI. 2017. Mapa minero de Chile. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/SIAC/Paginas/Mapa-Minero-de-Chile.aspx>
- SONAMI. 2022. Mapa Minero de Chile. Disponible en: <https://www.sonami.cl/mapaminero/>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. 2013. Niveles de madurez de la tecnología. Technology Readiness Levels. TRLS. Una Introducción. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.
- US Geological Survey. 2022. Mineral Commodities Summaries. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf> (accesed 19.05. 2022).
- Valor Minero. 2014. Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile. Informe a la Presidenta de la República, Michelle Bachelet. Comisión Minería y Desarrollo de Chile Consejo Nacional de Innovación y Competitividad.



Universidad de Concepción

INNOVAR EN EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA INDUSTRIA MINERA



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



10
AÑOS
CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERA
ANID/FONDAP/15130015

Serie Comunicacional CRHIAM