



Universidad de Concepción

RELAVES MINEROS Y SU RELACIÓN CON EL RECURSO HÍDRICO

Lina Marcela Uribe Vélez / Yannay Casas / Leopoldo Gutiérrez
Marcia Vásquez Sandoval / Antonio Muñoz Caballero



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:

Relaves mineros y su relación con el recurso hídrico.

Lina Marcela Uribe Vélez, Yannay Casas, Leopoldo Gutiérrez,

Marcia Vásquez Sandoval y Antonio Muñoz Caballero.

Enero 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

RELAVES MINEROS Y SU RELACIÓN CON EL RECURSO HÍDRICO

Lina Marcela Uribe Vélez / Yannay Casas / Leopoldo Gutiérrez
Marcia Vásquez Sandoval / Antonio Muñoz Caballero

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, 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



Lina Marcela Uribe Vélez

Ingeniera de Materiales
Doctor en Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Profesora e Investigadora de la Escuela de
Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Talca.
Investigadora Asociada CRHIAM.



Yannay Casas

Ingeniera Química
Doctor en Applied Biological Science,
Ghent University, Bélgica.
Máster en Análisis de Procesos de la Industria Química,
Universidad Central Marta Abre de Las Villas.
Profesora Asociado del Departamento Ingeniería Ambiental,
Universidad de Concepción.
Investigadora Asociada CRHIAM.



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 del CRHIAM.



Marcia Vásquez Sandoval

Ingeniera Civil en Industrias Forestales.
Master of Science (1997) – Doctor of Philosophy in Wood
Science (2015) Oregon State University, USA.
Profesora Asistente de Escuela de Ingeniería Civil de Minas,
Universidad de Talca.



Antonio Muñoz Caballero

Ingeniero Civil en Minas
Experto en Sernageomin – Categoría A
Exdirector Regional del Sernageomin de O'Higgins,
Profesor Universidad Federico Santa María.

DEFINICIONES

- **Cocción:** Tratamiento controlado de calor del producto cerámico en un horno durante el proceso de fabricación para lograr las propiedades deseadas.
- **Cubeta:** Corresponde al volumen físico disponible donde se depositan las lamas (finos) y gran parte del agua de los relaves, de tal modo que se forma en ella la laguna de aguas claras debido a la sedimentación de las partículas finas.
- **Depósitos de relaves:** Son obras de ingeniería, diseñadas para satisfacer las exigencias legales nacionales, de modo que se aisle completamente los relaves depositados del ecosistema circundante (SERNAGEOMIN, 2018). Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos.
- **Drenaje:** Manera en que las aguas de un área existen y se mueven, incluyendo las corrientes superficiales y subterráneas. Se considera para todos los flujos de agua, ya sean concentrados y/o difusos.
- **Elemento:** Se refiere a los elementos químicos. Sustancia que no puede separarse en sustancias más sencillas utilizando métodos químicos.
- **Espesadores:** Son equipos de separación sólido-líquido en los que una suspensión de sólidos (formando una pulpa), se alimenta a un tanque provisto de un mecanismo interno que mediante la acción de la gravedad permite concentrar los sólidos en el fondo y hace fluir el agua clarificada hacia la superficie para ser recogida en el rebose del tanque.
- **Fusión:** Proceso físico que resulta en la transición de fase de una sustancia de un sólido a un líquido producto del aumento de energía interna de los sólidos, por efecto de la temperatura o la presión.
- **Garantías:** Corresponde a las obligaciones que se contraen y a los instrumentos que se otorgan para asegurar el cumplimiento de las mismas.

- **Impacto ambiental:** Alteración del medio ambiente provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada, donde se requiere de un medio de transporte (agua superficial o subterránea, aire, organismos, camiones etc.) y de un medio receptor (agua potable, población, cuerpo de agua, fauna, flora y suelo).
- **Lixiviación:** Operación unitaria que permite la separación de una o varias sustancias (solutos) contenidas en una matriz sólida.
- **Licuefacción:** Fenómeno que genera la pérdida total de la resistencia al corte del material de relaves del depósito, por incremento de la presión de poros. Los relaves saturados son altamente susceptibles a licuefacción sísmica, en especial, si la permeabilidad y densidad son bajas.
- **Metal:** Los metales son los elementos químicos capaces de conducir la electricidad y el calor, que exhiben un brillo característico, son resistentes, deformables y sólidos a temperatura normal a excepción del mercurio.
- **Minería:** Ciencia, técnica y actividades que tienen que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales. También conocido como minería primaria.
- **Mineral:** Compuesto químico inorgánico de origen natural, que posee una estructura interna y una composición química definida. Un mineral puede estar constituido por un solo elemento (nativos, como por ejemplo el oro, la plata, el cobre) o, más comúnmente, por una asociación de distintos elementos (sulfuros, carbonatos, óxidos, etc.).
- **Niveles freáticos:** Nivel superior o más alto de una capa freática (parte del suelo saturada de agua) o de un acuífero en general.
- **Pasivo ambiental:** Es aquella situación ambiental que, generada por el hombre en el pasado y con deterioro progresivo en el tiempo, representa actualmente un riesgo al ambiente y la calidad de vida de las personas, afectando la calidad del agua, suelo y aire.
- **Porosidad o fracción de huecos:** Se refiere a la fracción de espacios vacíos en un material, y corresponde a una fracción del volumen de huecos respecto al volumen total. Los valores se puede expresar en porcentaje (0%-100%) o en fracción (0-1).

- **Residuos Mineros:** Corresponden a materiales provenientes de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales, los cuales son generados en grandes volúmenes. Dentro de este grupo se encuentran los estériles, los minerales de baja ley, y los residuos de minerales tratados por lixiviación, relaves y escorias.
- **Roca:** Materia de minerales asociados de manera natural que en cantidades considerables forma parte de la masa terrestre.
- **Sinterización:** tratamiento térmico utilizado para el desarrollo de uniones entre partículas, con el objetivo de formar un objeto sólido, continuo y de densidad controlada, mediante presión y temperatura.
- **Tierras raras:** Denominación que se le da al grupo de los 15 elementos de la tabla periódica conocidos como lantánidos (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) además del escandio (Sc) y el itrio (Y), ambos con propiedades físico-químicas similares a los lantánidos.
- **Yacimiento Mineral:** Concentración de elementos minerales, cuyo grado de concentración, composición química y características físicas lo hagan factible para su explotación.



RESUMEN

La presente serie comunicacional compila información general asociada a los relaves mineros, la cual se estructura en tres partes principales. En la primera, se abordarán los conocimientos generales en relación a los relaves mineros, los cuales pretenden responder a las preguntas básicas como ¿qué son los relaves?, ¿cómo se producen?, ¿cuántos relaves tenemos en Chile?, ¿cómo se clasifican? La segunda parte se asocia a las garantías que deben asegurar los depósitos de relaves en materia ambiental, en esta sección se aborda la estabilidad física y química que deben tener los relaves mineros, las maneras de garantizarlo y los marcos regulatorios. Seguidamente, en la tercera parte, se plantean los desafíos que tiene la minería chilena en relación a esta temática, se ahonda en la importancia de desarrollar estudios multidisciplinarios que permitan resolver los desafíos asociados a los relaves mineros y que contribuyan a promover la sustentabilidad en el sector minero. Finalmente, se presenta un caso de aplicación que permite evidenciar la factibilidad de lograr pasar de un pasivo ambiental a la generación de productos que permitan múltiples aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

Existe la creencia de que la industria minera consume grandes cantidades de agua. Sin embargo, a diferencia de lo que se puede creer, el consumo de agua en la minería representa sólo el 3.8% del suministro del agua dulce de Chile, y es fundamental en sus procesos la recuperación y recirculación de agua, considerando tecnologías que han permitido el depósito de relaves espesados, en pasta y filtrados.

Actualmente, el envejecimiento de los yacimientos de cobre en Chile y la disminución de las leyes del metal valioso, genera un aumento del beneficio de cobre mediante la recuperación de minerales sulfurados. Lo anterior se traduce en mayores requerimientos de agua para el procesamiento del mineral, dado que el agua en la producción de concentrados se utiliza en la etapa de reducción de tamaño, clasificación y concentración mediante flotación, que sumado a esta baja en la ley, requerirá procesar mayor cantidad de mineral para lograr las exigencias del mercado. Actualmente, el consumo neto de agua fresca en la minería del cobre se encuentra en torno a los 0,5 y 0,7 metros cúbicos de agua fresca por tonelada de mineral procesado, siendo la

retención de esta agua en los relaves y en su posterior evaporación o infiltración una de las mayores razones de este consumo.

Con el objetivo de avanzar hacia una minería sustentable, esta industria ha planteado diferentes desafíos relacionados a la temática de relaves y las alternativas de solución, considerando que se requieren nuevas tecnologías asociadas para asegurar la estabilidad química y física de los relaves, y reducir drásticamente los depósitos de relaves y la generación de los mismos, para contribuir a la reducción de consumo de agua en sus procesos.

¿QUÉ SON LOS RELAVES?

Origen de la producción de relaves de concentradoras

La minería extrae grandes cantidades de material, del cual sólo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico principal que se desea recuperar (menos del 1%). Una vez el mineral es procesado y se han extraído los elementos de interés, se generan residuos denominados "relaves", los cuales representan más del 99% del mineral procesado y deben depositarse de forma segura y ambientalmente responsable. Dentro de este contexto, se estima que cada 30 horas se depositan relaves equivalentes al cerro Santa Lucía, es decir, 2.572.263 toneladas. En Chile se prevé que para el 2026 se producirán más de 915 millones de toneladas al año, un aumento de 74% en la generación de relaves en comparación con 2014 (525 millones de toneladas por año). Estas cifras sitúan al país como el tercero con más depósitos de ese tipo en el mundo, después de China y Estados Unidos (Aparicio, 2022).

¿Cómo se producen los relaves mineros?

El proceso de concentración comienza con la trituración (chancado) del mineral proveniente de la mina hasta tamaños de partículas generalmente en el rango de centímetros o milímetros. El mineral chancado es luego reducido a tamaños menores a un milímetro, en grandes tambores rotatorios clasificados como molinos de bolas, molinos de varillas y molinos semi-autógenos (SAG). Se agrega agua al mineral molido y el material permanece en forma de lodo (pulpa) a través del resto del proceso de extracción.

El siguiente paso es llamado comúnmente flotación. La flotación opera sobre el principio de que, las partículas individuales que contienen el mineral que se desea extraer, son hechas receptivas selectivamente a pequeñas burbujas de aire que se adhieren a estas partículas y las elevan a la superficie de un tanque agitado. Las espumas que contienen estas partículas valiosas (mineral de cobre, por ejemplo) son retiradas de la superficie, procesadas y secadas para transformarse en "concentrado", el cual puede venderse como tal o embarcado a la fundición para su refinación. Entre tanto, las partículas que no flotaron son llamadas "colas" y constituyen los "relaves". Después de recuperar algo del agua del proceso en tanques apropiados, conocidos como espesadores, los relaves son bombeados hasta llegar a los depósitos de relaves que es el lugar donde se almacenan estos residuos de forma segura (Ministerio de Minería, 2021).

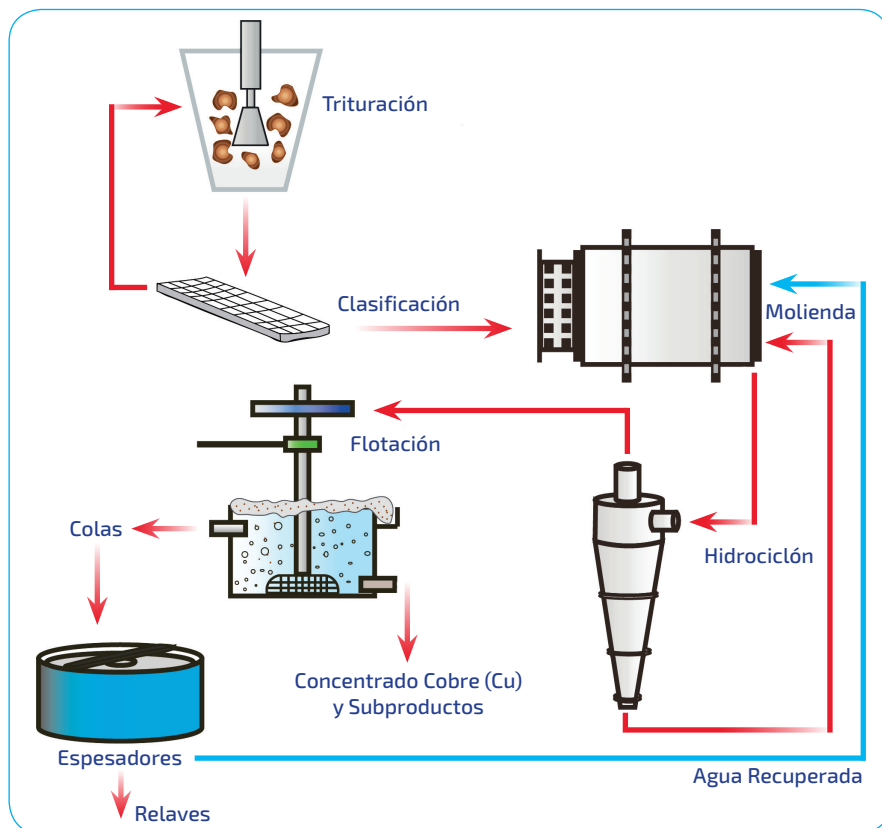


Figura 1.

Proceso de concentración de minerales. Fuente: Elaboración Propia.

Los relaves se producen cuando hay una suspensión de sólidos en líquidos y forman una pulpa. Se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en el circuito de molienda fina (Decreto Supremo N° 248). El término "re-lave" es de uso común en Chile, pero en otros países de habla hispana son denominados también "colas" (Perú, Bolivia y Ecuador) mientras que en México la denominación común y legal es "jal", en singular, o "jales", en plural; en Argentina se habla indistintamente de "relaves" o "colas" (SERNAGEOMIN, 2018). Finalmente, "tailings" en inglés.

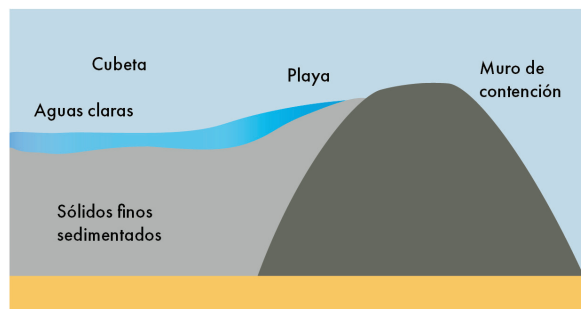
Tipos de relaves

Existen diferentes formas de depositar los relaves, las cuales se establecen dependiendo de factores como: la cercanía al concentrador, la capacidad de almacenamiento de relaves, la topografía del lugar y/o el nivel de producción del yacimiento.

En la Figura 2 se presentan los tipos de depósitos que se reconocen en Chile considerando el Decreto Supremo N°248 de 2006, "Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves".

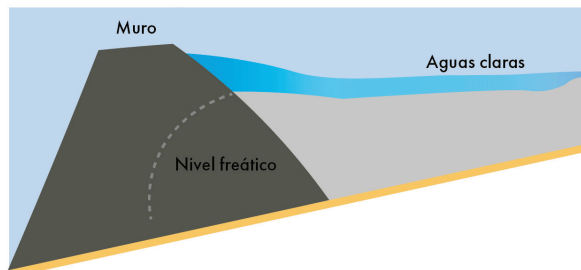
Tranques de relaves

Estructuras que utilizan la parte gruesa de los relaves para la construcción del muro perimetral, mientras que la parte fina (lamas) se descarga en el interior de la obra.



Embalses de relaves

Similares a un embalse de agua, contruidos con un muro resistente compuesto totalmente de un material de empréstito (arena y rocas aledañas), compactado e impermeabilizando el talud interior del muro, así como también parte o todo de su coronamiento.



Relaves espesados

Depósitos de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación en un Espesador, con el objetivo de retirar parte importante del agua contenida. El depósito de relave espesado se construye de forma tal que impida que el relave fluya hacia otras áreas distintas a las del sitio autorizado.



Relaves filtrados

Depósitos de relave donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de filtración en donde se logra un porcentaje de humedad en el sólido menor a un 20%. El relave una vez filtrado se transporta al lugar de depósito mediante cintas transportadoras o por equipos de movimiento de tierra y/o camiones. El material filtrado se deposita en forma de cono, y posteriormente, se construyen módulos de material compactado, los cuales permiten conformar un depósito aterrazado de gran volumen.



Relaves en pasta

Depósitos de relave que corresponden a una mezcla de agua con sólido (entre 10-25% de agua), que contiene abundantes partículas finas ($< 20 \mu\text{m}$) en una concentración en peso del 15%, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad. Su depósito se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación.

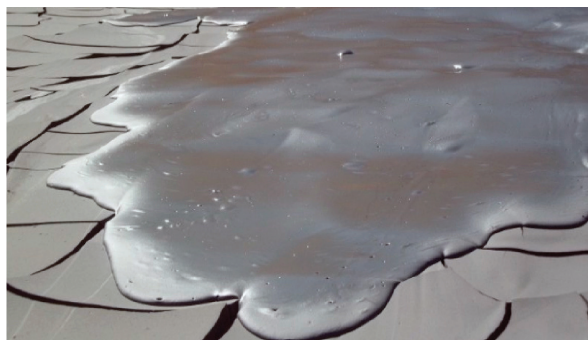


Figura 2.

Tipos de relaves mineros. Fuente: Ministerio de Minería, (2021)

Etapas de vida de los relaves

La Figura 3 presenta las etapas de vida de los relaves mineros, en ella se observa que se crean en el mismo momento en que nace un proyecto minero. Esta primera etapa se denomina "Proyecto" y es donde se realizan numerosos estudios previos que permiten establecer el tipo de relave que se generará. En ella se realiza la prospección, el diseño, la evaluación de la alternativa propuesta y de la descripción de los métodos de operación y monitoreo que se realizarán para garantizar la estabilidad del depósito de relaves, y de la seguridad del entorno.

Una vez que es aprobado el proyecto de relave, se continúa con la etapa de "Construcción". En esta fase se realiza la construcción del depósito de relaves, el cual debe realizarse previamente a la operación de la planta concentradora. Posterior a este proceso se continúa con la "Operación" y es en esta etapa donde se comienzan a descargar los relaves en el depósito previamente construido. Los períodos típicos de operación de un depósito van de 10 a 20 años, aunque algunos están aún operando después de 90 años. Sin embargo, el tiempo de operación se estima considerando como volumen mínimo la cantidad total de relaves generados a partir de las reservas explotables.

Una vez que las operaciones de la concentradora cesan se comienza con la etapa de "Cierre" del depósito. En esta etapa, se construyen las instalaciones adicionales que puedan ser requeridas para alcanzar la estabilidad física o química a largo plazo (por ejemplo, zanjas y conductos permanentes de derivación del agua); y se inicia la rehabilitación (por ejemplo, colocando tierra de cultivo y sembrado). El período de cierre requiere de monitoreo permanente, con el objetivo de evitar cualquier impacto negativo que pudiera causar el depósito en materia ambiental o social. El tiempo de cierre puede durar entre 5 y 10 años. Algunas veces puede tomar más tiempo de lo estimado, dependiendo de la complejidad y los requerimientos técnicos que se tengan establecidos en ese periodo. Finalmente, se encuentra la etapa de "Post-Cierre" o abandono del depósito, la cual se extiende tanto como se estime conveniente, con el fin de garantizar la estabilidad física y química del depósito de relave. Cuando hay circunstancias que involucran drenaje ácido, esta etapa puede alcanzar periodos de hasta 1000 años.

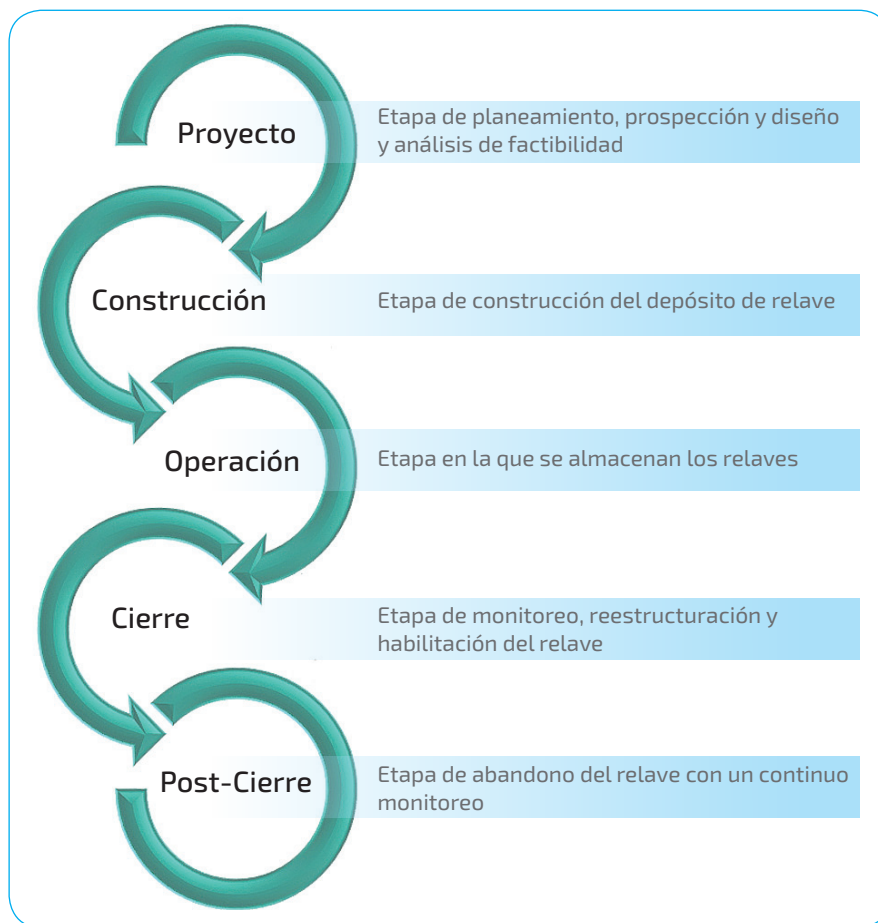


Figura 3.

Etapas de vida de los relaves mineros. Fuente: Elaboración propia.

Es importante indicar que en Chile, el Decreto Supremo N° 248 (2006), indica que se requiere de la aprobación del SERNAGEOMIN para construir y operar depósitos de relave. Cualquier modificación debe ser aprobada antes de su implementación. Además, los tranques de relave necesitan de la aprobación de la Dirección General de Aguas, cuando superan los cinco mil metros cúbicos. Finalmente, para terminar con la operación de los tranques de relaves SERNAGEOMIN debe aprobar un Plan de Cierre a través del art.17e del DS N°41 (actualizado al 2020), que incluye tanto medidas ambientales como de seguridad.

¿Cuántos relaves tenemos en Chile y en qué etapa se encuentran?

La Figura 4 presenta la cantidad de relaves existentes en Chile, los cuales se encuentran totalizados por región y por el tipo de etapa en la que se encuentran. En esta figura es posible observar que, existen cerca de 742 depósitos de relaves, los cuales se localizan principalmente en la región de Coquimbo y Atacama y se encuentran en su mayoría en estado inactivos o abandonados (Ministerio de Minería, 2021).

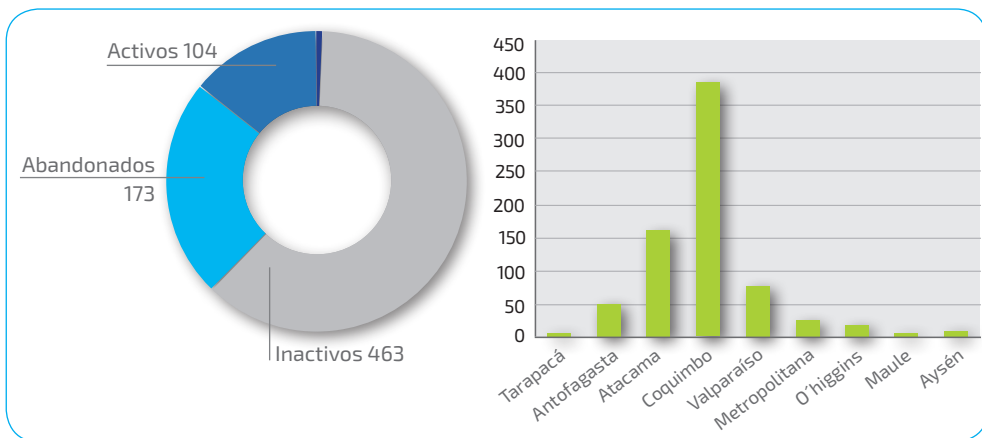


Figura 4.

Relaves que se encuentran en Chile, divididos por región (izquierda) y por tipo de etapa (derecha). Fuente: Elaboración Propia.

GARANTÍAS DE LOS RELAVES EN MATERIA AMBIENTAL

Estabilidad física

En Chile el artículo 3° de la Ley 20.551 (actualizada el 2019), que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones mineras, define la estabilidad física como "la situación de seguridad estructural, que mejora la resistencia y disminuye las fuerzas desestabilizadoras que pueden afectar obras o depósitos de una faena minera, para la cual se utilizan medidas con el fin de evitar fenómenos de falla, colapso o remoción".

El Decreto Supremo N° 248, establece los métodos de caracterización geotécnica y los sistemas de instrumentación y control para el monitoreo del comportamiento estructural hidráulico del depósito de relave, incluyendo: presión de poros, niveles freáticos, desplazamientos, asentamiento, filtraciones y aceleraciones sísmicas. También, consideran los parámetros sísmicos y la caracterización sísmica, los cuales se rigen también por este Decreto. En este documento se considera un criterio de sismo máximo, el cual se estima de acuerdo a los datos sismográficos históricos de la región. Además de ello, se considera la simulación de la estabilidad de relaves, en caso de licuefacción total de la cubeta. Todo lo anterior, con la intención de evitar cualquier riesgo asociada a la inestabilidad física de los relaves (SERNAGEOMIN, 2018).

Considerando los incidentes reportados en Chile y la experiencia internacional asociada a los depósitos de relaves, se conoce que, los depósitos de relaves pueden llegar a colapsar como consecuencia de eventos naturales, por efectos de decisiones operacionales o por errores de diseño. Por lo que es de gran importancia asegurar su estabilidad física durante la operación, cierre y post-cierre.

Estabilidad química

De acuerdo a la legislación chilena, en el Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras se define estabilidad química como: "Situación de control en agua, aire y suelo, de las características químicas que presentan los materiales contenidos en las obras o depósitos de una Faena Minera, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar, si fuere necesario, la reacción química que causa acidez, evitando el contacto del agua con los residuos generadores de ácidos que se encuentren en obras y depósitos masivos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos, depósitos de estériles y rípios de lixiviación (SERNAGEOMIN, 2018). Tal como lo indica la definición de estabilidad química, esta se extiende al control de las matrices de agua, suelo y aire, abocándose principalmente en evitar la generación de acidez (generación de drenaje ácido).

Los relaves están compuestos mayormente por minerales de ganga (término minero utilizado para referirse a los minerales que no poseen mayor interés económico), como por ejemplo la pirita, varios tipo de silicatos, biotitas o arcillas. Estos residuos mineros pueden presentar, en general, bajas concentraciones de elementos tóxicos como arsénico, plomo, mercurio, cadmio, entre otros, lo que dependerá de la geoquímica del yacimiento de origen y

la tecnología de metalurgia extractiva utilizada para los procesos. Sin embargo, el mayor problema químico asociado a los relaves no son necesariamente los elementos tóxicos que estos pueden contener, sino, el potencial que poseen algunos minerales presentes en el relaves para generar drenaje ácido el cual pueden liberar sustancias peligrosas y contaminar las matrices ambientales (SERNAGEOMIN, 2018).

Drenaje ácido de los relaves (ARD)

Se refiere a procesos por los cuales el pH del agua, en contacto con los relaves, puede disminuir severamente, dando como resultado la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos (arsénico, plomo, cadmio, y un conjunto de otros), además de un aumento del contenido de los sulfatos. Es importante indicar que es casi imposible detener completamente este proceso una vez que se ha comenzado, y los efectos de la acidificación pueden continuar por muchos siglos.

El ARD puede ser el tema ambiental asociado al manejo de relaves potencialmente más dañino y difícil de tratar, y puede no ser evidente inclusive muchos años después del período de cierre de operaciones.

La generación de ARD va a depender del tipo de minerales presentes en el relave y de las condiciones físicas y climáticas de la zona en donde se encuentren, pero no hay reglas generales para predecirlo, sin el auxilio de pruebas geoquímicas. A continuación se enumeran las cuatro condiciones necesarias y suficientes para que un relave presente ARD.

- 1 Presencia de minerales sulfurados en los relaves, principalmente pirita, pero también otras formas aún más reactivas tales como la pirrotita y la marcasita.
- 2 Oxidación de la superficie de minerales sulfurados. Las superficies del mineral sulfurado se oxidan en una reacción compleja que involucra varios pasos químicos ayudados por bacterias, para formar ácido sulfúrico.
- 3 Bajas presencia de minerales que consumen ácido en el relave, por ejemplo, la presencia de carbonato de calcio en el relave permite neutralizar el ácido producido por la oxidación de la superficie de los minerales.
- 4 Los contaminantes producidos deben ser transportados de los depósitos de relaves hasta los terrenos receptores o aguas superficiales, usualmente por infiltración y drenaje.

DESAFÍOS Y SOLUCIONES EN TORNO A LOS RELAVES Y EL RECURSO HÍDRICO

La Hoja de Ruta de la Minería Chilena, actualizada a la versión 2.0 en 2019, al amparo del programa Nacional de Minería de la Corporación Alta Ley, identifica las oportunidades, requerimientos de I+D+i y los desafíos para generar capacidades tecnológicas en el país agrupándolas en los núcleos: exploraciones, operación y planificación minera, concentración, relaves, fundición y refinación, hidrometalurgia, minería verde y usos del cobre. La Tabla 2 presenta los desafíos y posibles soluciones que pueden desarrollarse a través de la I+D+i en el núcleo referente a relaves.

Tabla 1.
Desafíos núcleo de relaves (Corporación alta Ley, 2019)

Desafíos	Soluciones (Líneas I+D+i)
1 Enfrentar la creciente escasez de agua y superficie	• Uso eficiente del suelo • Uso eficiente del agua
2 Asegurar la estabilidad química y física de los depósitos del relaves	• Monitorear y asegurar la estabilidad química y física en el diseño, operación, cierre y post cierre • Control de material particulado.
3 Promover la conversión desde un pasivo a un activo	• Búsqueda de usos industriales del relave • Recuperación de elementos valiosos; • Utilización de la superficie de depósitos para otros fines.
4 Propiciar la inclusión y aceptación comunitaria de los relaves	• Monitoreo y comunicación oportuna del desempeño de los relaves a todos los actores • Desarrollo de productos de valor compartido • Educación de todos los actores para nivelar los conocimientos acerca de los relaves, la cultura minera y la gestión del riesgo • Mejorar e involucrar a todos los actores en la gestión y emergencias

Los desafíos uno, dos y tres son aquellos desafíos que más se asocian con la disminución del consumo del recurso hídrico. Dentro del desafío 1, se encuentran soluciones I+D+i orientadas al uso eficiente del agua y del suelo, tales como aumentar la densidad de pulpa de relaves mediante métodos de depósitos de relaves filtrados o espesados, desarrollar procesos de concentración en seco, considerar el retorno de los relaves a la mina o realizar una minería

sin relaves. Finalmente se estima en esta línea el uso de otras fuentes hídricas, como el agua de mar o aguas de menor calidad para ser usadas en el proceso de flotación, considerando el impacto que esto pudiera traer en la operación, en el transporte del agua y en la disposición final del relave (Corporación Alta Ley, 2019).

Los cambios de usos de suelo, se señala como una categoría de impacto relevante en los procesos mineros (Marmioli *et al.*, 2021), pues contribuyen significativamente a la pérdida del hábitat de la vida silvestre, contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, lo que incrementa la presión sobre la disponibilidad y seguridad hídrica. Por lo tanto, alternativas orientadas a reducir los volúmenes de relaves contribuirían a disminuir las superficies destinadas a su disposición.

Por otra parte, en el desafío 2, se encuentra el perfeccionamiento de tecnologías para el control de las infiltraciones, el desarrollo de técnicas costo-eficiente para la inertización de los relaves previo a su depositación (pirita arsénica y otros), y el desarrollo de métodos de caracterización del suelo donde se depositarán los relaves; para la verificación de la estabilidad química de los mismos (Corporación Alta Ley, 2019).

Finalmente, en el desafío 3, las soluciones que contribuirían a la eliminación de los relaves corresponden a alternativas como el desarrollo de tecnologías de bajo costo para la caracterización de ellos, lograr la recuperación de elementos valiosos desde este tipo de desechos (Cu, Au, Mo, Ag, Pt, Co, Cr y tierras raras) y el uso alternativo de los relaves para fines industriales. Con relación a esta última alternativa, actualmente existen proyectos enfocados a utilizar el relave como materia prima para la elaboración de materiales de construcción, tales como, aglutinantes, mortero, ladrillos, adoquines y hormigón (Acosta, 2021), espumas cerámicas (Salazar y Uribe 2021; Uribe *et al.*, 2019) o simplemente se encuentran estudios orientados al uso directo del uso de relaves como relleno de excavaciones mineras (Corporación Alta Ley, 2019).

Es importante destacar que la recuperación de elementos valiosos del relave contribuiría a evitar cargas ambientales atribuidas al proceso de recuperación y valorización de dichos elementos. La mayoría de las rutas de valorización de relaves propuestas permanecen en la etapa de laboratorio, su implementación en la práctica siguen presentando limitaciones técnicas y económicas (Guo *et al.*, 2022).

Experiencias internacionales (Raka y Pfister, 2022), han resaltado las ventajas ambientales de diferentes combinaciones tecnológicas de reprocesamiento y valorización de relaves para la producción de diversos productos (geo-polímeros, espumas cerámicas, ácido sulfúrico, sulfoaluminato de calcio, entre otros). Esto, ha demostrado en la mayoría de los casos beneficios ambientales, pues particularmente la recuperación de metales contribuye a reducir los impactos sobre el agotamiento de metales y la eco-toxicidad de agua dulce. Sin embargo, también hay situaciones en las que las cargas ambientales del reprocesamiento de relaves son más importantes que los créditos ambientales por los productos obtenidos. Estos resultados se deben a que dichas alternativas también requieren recursos (agua, energía, químicos), y emiten contaminantes.

IMPORTANCIA DE DESARROLLAR ESTUDIOS ASOCIADOS A LOS RELAVES MINEROS

Debido a la gran demanda de metales a nivel mundial y la gran tasa de extracción de minerales durante la última década, ha surgido una creciente preocupación sobre el destino de los relaves y sus impactos ambientales irreversibles. Los esfuerzos que Chile realice para reducir y valorar los depósitos de relaves, a través de estudios multidisciplinarios, permitirán quitar presión por parte de la comunidad, y dará la oportunidad de acceder a mercados con mayor conciencia ambiental.

La normativa ambiental minera, reglamentada en DS N°248 (2006) y DS N°41(2020), entrega una serie de pautas que permite observar que existe un sin número de temáticas que pueden ser abordadas por diferentes grupos multidisciplinarios. El desarrollo de estrategias para la estabilización de relaves con material vegetal, denominado fitorremediación, es un ejemplo de técnica que presenta aceptación social, por la naturaleza de su intervención. Sin embargo, es importante desarrollar investigación de especies tolerantes a suelos ácidos y con baja precipitación, de modo que sea evaluada su viabilidad en zonas donde se desarrolló actividad minera.

Otra posible área de importancia lo constituye la evaluación de riesgos de los tranques de relaves, como por ejemplo la inestabilidad del tranque (licuefacción), percolación de aguas contaminadas, y arrastre del relave en caso de crecidas y contaminación con material particulado. Este último pun-

to se hace más crítico con la situación ambiental global del cambio climático, donde eventos de lluvias, vientos o sismos en zonas donde anteriormente no existían registros históricos, podrían generar riesgos no previstos en proyectos mineros.

Por otra parte, el desarrollo de investigación e innovación asociadas a tecnologías y procesos que permitan agregar valor a los elementos recuperados desde relaves, es un área muy importante para el desarrollo de la minería. Del mismo modo, la Economía Circular en minería, es un concepto que está generando bastante impulso en la valorización de los relaves. Sin embargo, se debe tener presente que, las diferentes alternativas que se propongan no las convierten automáticamente en la mejor opción ecológica, debido a que la alternativa de valorización podría aumentar las demandas de energías y generación de contaminantes.

Considerando lo anterior, se requiere de una evaluación ambiental exhaustiva de cada una de las propuestas para examinar si estos nuevos procesos traen los beneficios ambientales esperados. En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) contribuiría a cuantificar de manera holística los impactos ambientales de las diferentes rutas y tecnologías emergentes de valorización de relaves que todavía se encuentran en escala de laboratorio, identificando puntos críticos, desarrollando estrategias de reducción de impactos y apoyando la toma de decisiones que permitan transitar hacia una minería más sustentable bajo el enfoque de "Minería Verde".

Otro aspecto importante a considerar para poder avanzar en una minería verde, es el desarrollo de la Simbiosis Industrial, donde es de gran importancia el desarrollo de la asociatividad entre industrias colaborantes (no competitivas entre sí), las cuales podrían formar parte de un eslabón en la integración de procesos y materiales, que sin duda es un reto que aún está pendiente en el sector minero.

Finalmente, el ecosistema minero debe velar por un trabajo interrelacionado con la comunidad, por los impactos ambientales que esta genera, con el propósito de lograr el desarrollo sustentable de la Minería en Chile.

Caso de aplicación de un pasivo ambiental a un insumo: espumas cerámicas elaboradas a partir de relaves mineros

Las espumas son materiales cerámicos que presentan una gran porosidad de diferentes formas y tamaños de poros. Estos materiales se caracterizan por ser un material liviano, rígido, no tóxico, de baja conductividad térmica, alta permeabilidad, estable a altas temperaturas, inerte químicamente y con una excelente resistencia al choque térmico (Figura 5). Sus destacadas propiedades lo hace ser un producto multipropósito el cual puede ser usado en diversos sectores económicos (Da Silva *et al.*, 2019).



Figura 5.

Propiedades de las espumas cerámicas. Fuente: Elaboración propia.

El mercado global de espuma de vidrio se encuentra principalmente orientado al ahorro energético. Sin embargo, algunos estudios reportan aplicaciones en segmentos criogénicos industriales, en sistemas de transferencia de calor, filtros, sistemas de procesamiento químico y el uso como aislamiento en construcción (aislamiento de estanques y cañerías, tuberías comerciales y edificios). Algunas de éstas aplicaciones se muestran en la Figura 6 (Da Silva *et al.*, 2019).

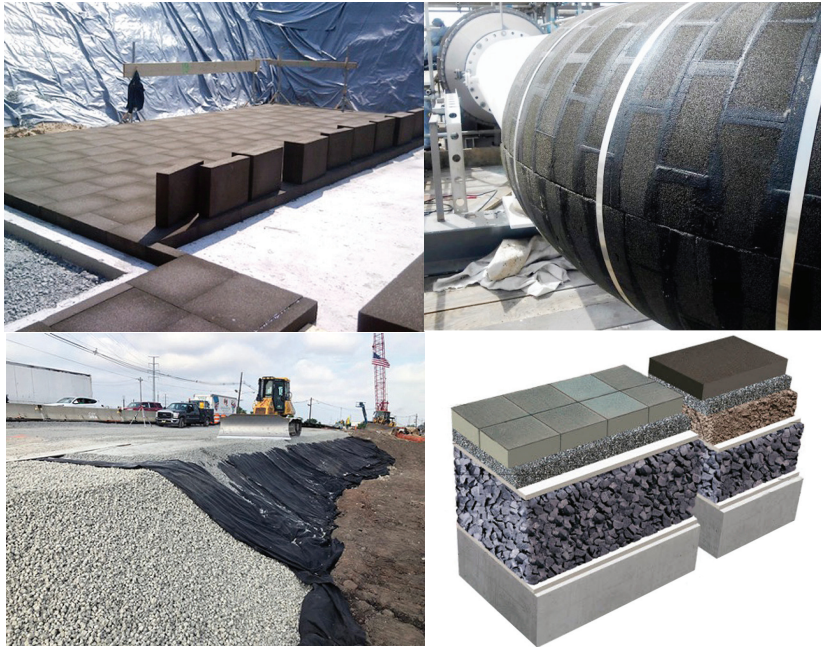


Figura 6.

Aplicaciones de las espumas cerámicas. Aislamiento en sub-losas, Industria criogénica, estabilización de terraplenes y rellenos. Fuente: Elaboración propia.

Método tradicional de producción de espumas cerámicas

Existen diferentes métodos a escala industrial para la elaboración de espumas cerámicas, los cuales se muestran en la Figura 7. El método de elaboración de espumas mediante el uso de arenas y reactivos fundentes, es un proceso que consiste en la fusión del vidrio a altas temperaturas ($>1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), el cual es enfriado y enviado hacia el molino de bolas mediante el uso de una banda transportadora. En esta etapa, se adiciona el compuesto espumante y se continúa moliendo el material hasta producir un polvo fino, el cual posteriormente es vertido en moldes de acero para realizar la cocción del material a altas temperaturas ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) en un horno de rodillos. En esta etapa se genera el ablandamiento del material y la liberación de gases, lo cual crea una masa viscosa con una gran porosidad llamada espuma de vidrio. Finalizada la etapa anterior, se obtienen bloques de espumas, las cuales son posteriormente cortadas en las dimensiones deseadas y embaladas según corresponda (Hibbert, 2016).

Considerando el alto consumo de energía que genera el proceso anteriormente descrito, industrialmente, se ha considerado el uso de vidrio reciclado para la elaboración de este producto, debido a que posee la ventaja de eliminar el proceso previo de elaboración de este material. Las temperaturas al usar vidrio reciclado son significativamente inferiores, lo cual se traduce en menores emisiones, y el uso de este material conllevaría a utilizar menor cantidad de materias primas de la naturaleza (arena, sosa y caliza).

Sin embargo, a pesar de estas ventajas, este proceso requiere de varias etapas previas para lograr generar un polvo de vidrio fino que permita la elaboración de la espuma, la cuales consisten en: la trituración del vidrio, el lavado para eliminar la contaminación producida por etiquetas, corchos u otros agentes externos, el secado para eliminar el agua adicionada, la molienda y el tamizado para eliminar cualquier contaminación plástica residual. Logrado lo anterior se procede a la etapa de mezcla con el reactivo espumante y se da el paso a la cocción del material manteniendo el proceso descrito anteriormente (Hibbert, 2016), tal como se muestra en la Figura 7.

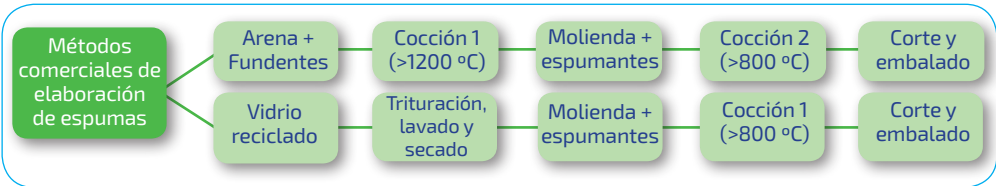


Figura 7.

Métodos a escala industrial para la elaboración de espumas cerámicas.
Fuente: Elaboración propia.

Considerando lo anteriormente descrito, es posible evidenciar que, a pesar de las múltiples ventajas y aplicaciones que posee este producto, existen desventajas ambientales y económicas que se asocian a estos procesos, las cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Desventajas de los métodos tradicionales de producción de espumas de vidrio.

Ambiental	Económico
• Mayor huella energética (Materia prima: arena)	• Altos consumos energéticos (Materia prima: arena)
• Mayor huella hídrica (Materia prima: vidrio reciclado)	• Alto consumo de agua (Materia prima: vidrio reciclado)
• Generación de gases CO, CO ₂ , SO ₂ dependiendo el tipo de espumante utilizado	• Altos costos de inversión en equipos

Debido a ello, se encuentran diferentes estudios orientados a la elaboración de espuma empleando diferentes tipos de desecho y/o métodos alternativos (Zhang *et al.*, 2021), dentro de estas alternativas se encuentra la elaboración de espumas a partir de relaves mineros o mezclas de éstos con otro tipo de desecho (Kazmina *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018; Salazar y Uribe 2021; Uribe *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2011).

Método de producción de espumas a partir de relaves

La Figura 8, presenta el proceso alternativo que se podría llevar a cabo al emplear relaves mineros. Este proceso consideraría una etapa de clasificación del mineral y eliminaría la etapa de trituración y molienda de la materia prima, que es considerada en el método con vidrio reciclado. Seguidamente, se continuaría con una etapa de mezclado con los agentes fundentes y el agente gasificador, para luego generar las geometrías deseadas del material a partir de moldes y prensas y finalmente, terminada esta etapa, someter el material a cocción, corte y embalaje (Salazar y Uribe, 2021; Uribe *et al.*, 2019).

La Tabla 3 presenta las ventajas que generaría el uso de este tipo de pasivo ambiental. En ella, es posible observar que sus ventajas se orientan principalmente a que este proceso generaría un menor consumo de agua y energía para la elaboración del producto, comparado con los métodos tradicionales. De igual forma, en la industria minera este tipo de propuestas contribuirían a disminuir costos de monitoreos de los pasivos ambientales, al uso eficiente del suelo y el agua, y a reducir los posibles riesgos que los depósitos de relaves pudieran llegar a ocasionar.

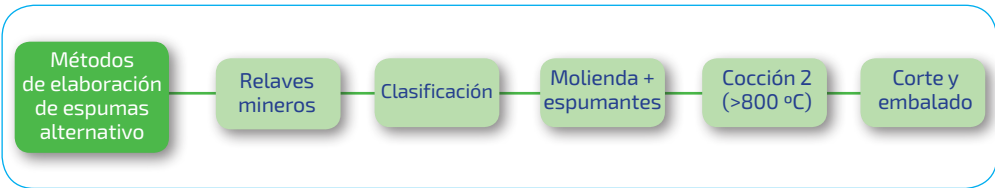


Figura 8.

Método alternativo para la elaboración de espumas cerámicas.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.

Ventajas de los métodos de producción de espumas de vidrio a partir de relaves mineros.

- La elaboración de espumas a partir de relaves mineros contribuiría a un menor consumo energético y de agua.
- Menor valor económico del producto en el mercado debido a que se generarían menores costos de producción.
- Se contribuiría a disminuir el gran pasivo ambiental que son los relaves al generar un nuevo insumo a partir de este desecho.
- Las metales pesados presentes en los relaves quedarán inmovilizados al estar contenidos en la fase amorfa de la fase vítrea o al formar nuevas fases cristalinas en la red de las espumas (Zang *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

A partir de lo presentado en este documento se puede ver que la temática de relaves es de gran relevancia para lograr un uso eficiente del suelo y el recurso hídrico. Es por esto que, al momento de definir el tipo de relave a construir, es importante que en la etapa de "proyecto minero" se tengan consideradas las soluciones I+D+i respecto a cada uno de los desafíos que se tienen en la temática de relaves. De esta manera, se podría transitar de una manera más eficiente hacia el desarrollo de minería verde desde su planeación.

Actualmente, los principales retos medioambientales asociados con el manejo de relaves se relacionan con el potencial impacto sobre el suelo y el agua (superficiales/subterráneas). Sin embargo, es importante notar que existe mucho más potencial de reducir los impactos de los residuos de relaves en la fase de diseño de la minería, en lugar de las fases de operación o post-cierre, debido a que en estas últimas fases estos residuos son considerados secundarios con altas potencialidades de ser transformados en recursos.

Existen varias rutas y tecnologías alternativas para apoyar la producción más limpia y procesos ambientalmente responsables para el reprocesamiento y valorización de los relaves mineros desde la perspectiva de economía circular. Sin embargo, se requiere de una evaluación ambiental exhaustiva para examinar si estos nuevos procesos traen los beneficios ambientales esperados. En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) contribuiría a cuantificar de manera holística los impactos ambientales de las diferentes rutas y tecnologías emergentes de valorización de relaves que todavía se encuentran en escala de laboratorio, identificando puntos críticos, desarrollando estrategias de reducción de impactos y apoyando la toma de decisiones que permitan transitar hacia una minería más sustentable bajo el enfoque de "Minería Verde".

Para transitar hacia una minería verde se requiere un enfoque integrado, que involucre mayor nivel de sustentabilidad en el diseño de nuevas rutas tecnológicas, considerando no solo los desafíos tecnológicos, sino también los económicos, ambientales, sociales y de gobernanza. Al mismo tiempo, los enfoques deben ir acoplados con las metas y compromisos que tienen Chile en políticas ambientales tales como, Carbono Neutralidad para el 2050, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, Hoja de ruta hacia un Chile Circular 2040, entre otros.

REFERENCIAS

- Aparicio, E. 2022. El avance de las montañas tóxicas: cada 30 horas se depositan relaves en Chile equivalentes al cerro Santa Lucía. El Mostrador. Disponible en: <https://www.elmostrador.cl/cultura/2022/01/03/el-avance-de-las-montanas-toxicas-cada-30-horas-se-depositan-relaves-en-chile-equivalentes-al-cerro-santa-lucia/>.
- Corporación Alta Ley. Hoja de Ruta 2.0 de la Minería Chilena. 2019. Actualización y consensos para una mirada renovada. Santiago, 91-115.
- Da Silva R.C., Kubaski, E.T., Tenório-Neto E.T., Lima-Tenório M.K., Tebcherani S.M. 2019. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix. *J. Non. Cryst. Solids*, 511, 177–182.
- Decreto Supremo N° 248. Aprueba Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves. Diario Oficial, 11 de abril de 2007
- Guo, D., Hou, H., Long, J., Guo, X., Xu, H. 2022. Under estimated environmental benefits of tailings resource utilization: Evidence from a life cycle perspective. *Environmental Impact Assessment Review*. 96, 106832.
- Hibbert, M. 2016. Understanding the production and use of Foam Glass Gravel across Europe and opportunities in the UK, South England, UK. *Chartered Institution of Wastes Management*. 16pp
- Kazmina O.V., Tokareva A.Y., Vereshchagin V.I. 2016 Using quartz of eldspathic waste to obtain foamed glass material. *Resour. Technol.* 2, 23–30.
- König J., Petersen R.R., Yue Y. 2015. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. *Ceram. Int.*, 41, 9793–9800.
- Liu T. *et al.*, 2018. Phase evolution, pore morphology and microstructure of glass ceramic foams derived from tailings wastes. *Ceram. Int.*, 44, 14393–14400.

- Marmioli B., Rigamonti L., Brito-Parada., P.R. 2022. Life Cycle Assessment in mineral processing – a review of the role of flotation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 62–81.
- Ministerio de Minería. 2021. Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible. Santiago, 2019. Pp. 223.
- Raka L., Pfister S. 2022. Prospective environmental assessment of reprocessing and valorization alternatives for sulfidic copper tailings. *Resources, Conservation & Recycling*, 186, 106567.
- Salazar C., Uribe L. 2021. An Alternative Method for the Obtention of Ceramic Foams from Gold and Silver Tailings with High Pyrite Content. *Processes*, 9, 1897.
- SERNAGEOMIN. 2018. Estudio de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos de relaves. Pp.185.
- Uribe L., Moraga C., Rivas F. 2021. Using Gold-Silver Tailings on the Elaboration of Ceramic Foams. *Sustainable metallurgy*, 7,364–376.
- Yin H., Ma M., Bai J., Li Y., Zhang S., Wang, F. 2016. Fabrication of foam glass from iron tailings. *Materials Letters*, 511-513.
- Zhang S., Kang Z., Lu Q. 2011. Preparation of foam glass composite from iron ore tailing. *Advanced Materials Research*, 168,532–536.
- Zhang J., Liu B., Zhang S. 2021. A review of glass ceramic foams prepared from solid wastes: Processing, heavy-metal solidification and volatilization, applications. *Science of the total environment*, 781, 146727.



Universidad de Concepción

RELAVES MINEROS Y SU RELACIÓN CON EL RECURSO HÍDRICO



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



10
AÑOS
CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015

