

**Agencia
Nacional de
Investigación
y Desarrollo**

Ministerio de Ciencia,
Tecnología, Conocimiento
e Innovación

Nombre proyecto: Integración de estrategias de economía circular en el procesamiento de minerales

Código proyecto: ACT210027

Institución Principal: Universidad de Antofagasta

Nombre director: Luis Cisternas Arapio

Resumen:

La minería ha contribuido al desarrollo de la sociedad desde el comienzo de la civilización y la demanda por los productos derivados de ella sigue en aumento. El papel de esta industria para afrontar el calentamiento global es fundamental, al formar parte del único camino previsible para pasar desde los combustibles fósiles a tecnologías ecológicas como la electromovilidad. Esta necesidad tiene importantes desafíos inherentes, incluida la ya conocida disminución en las leyes de los depósitos de mineral, lo que implica el aumento potencial en las operaciones futuras con un uso intensivo de energía y el agotamiento de las fuentes de agua continentales. Esta evidente necesidad de reducir los impactos ambientales presentes y futuros del sector obliga a buscar nuevas estrategias operativas. Por otro lado, existe consenso en que es fundamental desvincular el crecimiento económico del aumento de la explotación de los recursos primarios. En esta dirección, el paradigma de la economía circular (EC) se identifica como la única forma que equipara el crecimiento económico con un impacto ambiental aceptable a largo plazo.

Aunque la industria minera no ha sido ajena a iniciativas que buscan la materialización de la EC en sus operaciones todavía queda un largo camino para llegar a un modelo de negocio basado en EC en el sector.

En el contexto chileno, la industria del cobre no solo es la principal rama de la industria minera sino también la principal actividad económica del país. Entre sus desafíos más importantes se encuentran la gestión y el tratamiento de grandes cantidades de relaves y estériles, el uso eficiente de la energía en procesos que tienen una baja eficiencia y la necesidad de reducir la huella hídrica. Chile produce principalmente concentrado de cobre, cuyo residuo sólido, se deposita en la tierra en cantidades masivas como en ningún lugar del planeta, totalizando cerca de 600 millones de toneladas anuales. Esto ha motivado la búsqueda de posibles usos y estrategias de disposición más seguras (tanto desde el punto de vista físico como químico), la mayoría relacionadas con acciones posteriores a la generación del relave. Por otro lado, actualmente no existen acciones similares relacionadas

**Agencia
Nacional de
Investigación
y Desarrollo**

Ministerio de Ciencia,
Tecnología, Conocimiento
e Innovación

con la roca estéril (también en cantidades masivas), que deben ser removidas antes de la explotación de minerales valiosos, además de su disposición en botaderos. La escasez de agua fresca ha obligado a la industria a utilizar agua de mar, con y sin desalación previa, como recurso hídrico (remoto). Asimismo, busca minimizar las pérdidas en los distintos procesos unitarios, mejorando así su reciclaje dentro del proceso. Así, el aprovechamiento del agua y la generación de residuos sólidos son problemas actuales que requieren soluciones urgentes.

En el desarrollo de la EC se han identificado etapas históricas, donde EC 1.0 y 2.0 se caracterizan, respectivamente, por el tratamiento y prevención de la contaminación. La etapa actual, denominada EC 3.0, se caracteriza por intentar cerrar todos los bucles de material para minimizar la generación de residuos. Las acciones de EC 1.0 se pueden asociar con estrategias "fuera del proceso", mientras que las acciones de EC 2.0 se relacionan mejor con estrategias "dentro del proceso". Al observar el estado actual de las operaciones mineras, es fácil ver que la mayoría de las acciones se centran en las estrategias EC 1.0. Por lo que, es común ver acciones "fuera del proceso" para monitorear y tratar desechos sólidos, gaseosos y líquidos. Asimismo, una revisión en la literatura de las estrategias de la EC para la minería incluye, en su mayor parte, acciones "fuera al proceso" como búsqueda de usos para los residuos o extraer materiales valiosos desde tranques de relaves, una vez generados los residuos. Creemos que las acciones "dentro del proceso" en las plantas de procesamiento de minerales pueden favorecer no solo la prevención de la contaminación, sino que también pueden ayudar a cerrar los bucles de material para reducir la generación de residuos.

El objetivo de este proyecto es generar un equipo de investigación multidisciplinario de clase mundial para el desarrollo y aplicación de estrategias que incrementen la circularidad del procesamiento de minerales. Para lograr este objetivo general, se proponen varios objetivos específicos: 1) Desarrollo de investigación científica y tecnológica multidisciplinaria de clase mundial en aspectos relevantes de la EC para reducir los efectos ambientales de la operación de procesamiento de minerales, integrando estrategias tanto dentro como fuera del proceso. 2) Fortalecer la formación de postdoctorantes, estudiantes de pregrado y postgrado en áreas asociadas a la EC en el procesamiento de minerales dentro de una comunidad de equipos de investigación nacionales e internacionales.

Cabe mencionar, que el proyecto promoverá la participación de mujeres ingenieras y científicas e inspirará a las niñas a dirigir sus intereses académicos al área minera. 3) Consolidar las redes de colaboración a nivel nacional e internacional para mejorar la productividad de las publicaciones, la calidad de la investigación y el impacto de sus productos. 4) Sensibilizar a la sociedad chilena sobre la importancia de aplicar el modelo EC en las operaciones mineras y el papel de la ciencia y la tecnología en la consecución de este

**Agencia
Nacional de
Investigación
y Desarrollo**

Ministerio de Ciencia,
Tecnología, Conocimiento
e Innovación

objetivo. 5) Crear vínculos con empresas mineras para facilitar la futura transferencia tecnológica de los resultados del proyecto.

En este proyecto la investigación científica y tecnológica incluirá acciones integradas dentro y fuera del proceso. Se busca mejorar la circularidad del agua mediante estrategias operativas optimizadas de base fenomenológica para la recuperación de agua y el estudio de floculantes hidrofóbicos que favorezcan una mayor recuperación de agua desde tranques de relaves, el uso de microalgas como floculantes biológicos y para la clarificación de agua reciclada, el uso de inteligencia computacional para identificar y prevenir la presencia de partículas finas y así mejorar las características reológicas de los relaves y el diseño de procesos secuenciales de espesamiento y clarificación de última generación. Estas acciones permitirán optimizar el rendimiento general combinado del reciclaje de agua y los costos operativos. Por otro lado, se mejorará la circularidad de los residuos sólidos con soluciones medioambientalmente neutrales y que agreguen valor a la roca estéril y los relaves. Las estrategias propuestas incluyen flotación de partículas gruesas, uso de depresores de pirita basados en bacterias halófilas, uso de solventes verdes y la aplicación de nanobiotecnología.

Finalmente, la adopción de la tecnología tendrá un enfoque estratégico mediante el uso de estudios de caso incluyendo el uso de un solo tipo de mineral y/o relave para cada acción descrita en esta propuesta, y, por otro lado, se medirá el impacto de las estrategias de circularidad. Esto último dirigido a reducir otra brecha existente en la forma de medir la circularidad en el contexto del procesamiento de minerales. Cabe señalar que varias de las acciones planteadas en esta propuesta se encuentran dentro del proceso con un efecto más significativo que las acciones fuera del proceso, identificando y corrigiendo los problemas en su origen y posteriormente transfiriéndolos a mejores soluciones. Por otro lado, las acciones fuera al proceso propuestas son innovadoras a nivel nacional, como el desarrollo de estrategias para tratar y agregar valor a la roca estéril. Finalmente, la integración tanto de la estrategia, fuera como dentro del proceso, así como una visión holística del problema, permitirá encontrar soluciones más efectivas y eficientes para la industria minera y la sociedad.

El proyecto incluye la colaboración nacional entre la Universidad de Antofagasta (UA), la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) y la Universidad de Chile (UCh). La UA se ubica en la región con mayor actividad minera de Chile y alberga los programas de maestría y doctorado en ingeniería de procesos minerales con la mejor acreditación nacional. La PUCV, a través de la Facultad de Ingeniería Química, alberga las carreras de Ingeniería de Minas e Ingeniería en Metalurgia Extractiva. La UCh alberga el centro de investigación líder en Chile en tecnología aplicada a la minería, el Centro de Tecnología Minera Avanzada (AMTC). Así, el proyecto contempla una red de colaboración entre importantes actores relacionados con la formación de capital humano y el desarrollo de la investigación en Chile.



Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo

Ministerio de Ciencia,
Tecnología, Conocimiento
e Innovación

A nivel internacional, el proyecto incluye la Universidad de Aalto (Finlandia), Universidad Tecnológica de Lappeenranta (Finlandia), Universidad de Quebec (Canadá), Universidad Tecnológica de Wuhan (China), Universidad de San Luis de Potosí (Méjico), Universidad del Studi de lla Campania “Luigi Vavitelli” Luleå University of Technology (Suecia), Nordic Institute for Theoretical Physics (Suecia) y la Escuela Politécnica de Montreal (Canadá). La colaboración entre estas instituciones internacionales incluye la formación de capital humano avanzado.

La difusión de los resultados a la sociedad se realizará a través de diversas actividades. Primero, se creará una página web para presentar el proyecto, entregar información relevante al tema del proyecto y llegar a una audiencia más amplia. También se creará una aplicación interactiva en línea para que cualquier persona, a través del estudio de casos, pueda identificar los beneficios y oportunidades de la EC. Por otro lado, se organizarán varios seminarios y talleres para promover la colaboración entre diferentes actores y la sociedad, incluida la industria minera. Se organizará un evento internacional para mejorar la colaboración global, brindar oportunidades a los científicos en formación y acercar el proyecto a la comunidad científica nacional e internacional. Finalmente, pero no menos importante, se llevarán a cabo varias actividades con la industria para facilitar la transferencia de los resultados del proyecto.