



*Identificación de oportunidades mediante la
implementación de la Economía Circular en minería
secundaria del cobre*

DEPP 10/2021

Resumen ejecutivo

El presente estudio tiene por objetivo la identificación de oportunidades de negocios para los residuos mineros, utilizando a la Economía Circular (EC) como pilar.

La metodología para la elaboración del estudio se basa en la revisión bibliográfica y levantamiento de información desde entidades públicas y público/privadas como es el caso de Sernageomin, Corporación Alta Ley, Relaves con valor, entre otras. Por su parte, se estudiaron los resultados a través de un análisis FODA y se identificaron las principales brechas que impiden la reutilización de los residuos mineros en el país.

Como principales conclusiones es posible mencionar que la minería en Chile representa una gran oportunidad para desarrollar un modelo de economía circular, siendo una opción válida de implementar a través de la minería secundaria, a través de la reutilización de residuos mineros. En lo específico y a modo de ejemplo, Chile tiene un potencial importante dado el gran volumen de relaves que ha manejado a nivel país, los cuales pueden ser analizados y estudiados a través de nuevos usos o bien, como fuente de recuperación de elementos de interés comercial.

Existe suficiente evidencia de casos donde los residuos mineros a nivel mundial han sido destinados a otros usos que, junto con reducir el riesgo medioambiental, han permitido encadenar el desarrollo de negocios a niveles locales y nacionales.

Igualmente, se requiere la generación de un marco legal que permita el retratamiento y reutilización de residuos mineros, siendo esta la principal brecha identificada a la fecha.

Específicamente, como principales resultados del análisis de brechas, se identificaron las siguientes:

- *Incertidumbre geológica y de la geoquímica asociada:* no existe claridad sobre el tipo y cuantía de recursos mineros presentes en los diversos residuos mineros analizados.
- *Bajo conocimiento en tecnologías:* se requiere profundizar en la comprensión de las tecnologías reconocimiento y reprocesamiento.
- *Carencia de normativa:* Si bien existe una sólida y robusta normativa en materia en la disposición de residuos mineros, hay una necesidad de avanzar en normativas que regulen el reprocesamiento u otro uso de los residuos mineros.



- Desconocimiento del posible impacto ambiental: no hay consenso del impacto en el medioambiente que podría llevar el retratamiento de estos residuos mineros.

Por otro lado, se identificaron las siguientes oportunidades de desarrollo en relación del potencial de residuos mineros:

- Potencial de exploración: ante el actual escenario de las empresas exploradoras de tipo junior, la exploración y cuantificación de residuos mineros se presenta como una oportunidad para la generación de nuevo conocimiento y opciones reales de negocios.
- Interés en la Economía Circular: existe un creciente interés en la implementación de la economía circular y la reutilización de estos residuos.
- Producción sostenible de materias primas: durante los últimos años se ha resaltado la importancia de avanzar a una matriz productiva sostenible.
- Impulso de la minería secundaria: aunque no existe claridad en el tamaño de negocio, se asume que podría ser una escala menor a la gran minería, pudiendo utilizarse como una herramienta de fomento al segmento pequeña y mediana minería, como de desarrollo con proveedores.

Finalmente, importante señalar que existen diferentes iniciativas internacionales, como de la OCDE y de la Unión Europea, entre otras, las cuales buscan incentivar y potenciar el desarrollo de la economía circular. Por su parte, y en materia de estandarización, existe el Comité de Economía Circular ISO/TC323 de la ISO, donde se encuentran en desarrollo potenciales proyectos de normas relacionadas con esta materia.



Contenido

Resumen ejecutivo	i
1 Introducción	1
2 Metodología	3
3 Antecedentes Generales	4
3.1 Revisión de Conceptos.....	4
3.1.1 <i>Economía circular</i>	4
3.1.2 <i>Minería Secundaria</i>	4
3.2 Residuos mineros	4
3.2.1 <i>Depósitos de Relaves</i>	6
3.2.2 <i>Depósitos de Residuos Mineros Masivos</i>	7
3.2.3 <i>Otros Residuos Mineros</i>	8
3.3 Estimación de residuos mineros.....	8
3.4 Minerales Críticos para el desarrollo de tecnologías limpias	9
4 Identificación de Oportunidades	11
4.1 Recuperación de elementos de valor desde residuos mineros	11
4.1.1 <i>Reprocesamiento de relaves</i>	11
4.1.2 <i>Reprocesamiento de ripios de lixiviación y botaderos</i>	12
4.1.3 <i>Procesamiento de Barros Anódicos</i>	12
4.1.4 <i>Tratamiento de Polvos de Fundición</i>	13
4.1.5 <i>Tratamiento de Escorias</i>	13
4.2 Buenas prácticas sustentables del manejo de residuos mineros	15
4.2.1 <i>Reutilización y reciclaje de relaves</i>	15
4.2.2 <i>Revegetación de depósitos de residuos</i>	16
4.2.3 <i>Rehabilitación de Sitios Mineros</i>	18
4.2.4 <i>Reutilización y reciclaje de roca estéril</i>	19
4.2.5 <i>Relleno de Rajos y Mina Subterránea</i>	19
4.2.6 <i>Reciclaje de Escorias</i>	14
4.2.7 <i>Otras aplicaciones</i>	20
5 Legislación Asociada	21
6 GAP análisis	24
7 Comentarios Finales	27
8 Referencias	28
9 Anexos	31
Anexo I: Residuos Mineros Masivos	31



1 Introducción

El término “economía circular¹ es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad con el fin de articular los aspectos ambientales, económicos y sociales. Su objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva economía circular y no lineal, que es la utilizada actualmente. El sistema lineal de nuestra economía (extracción, fabricación, utilización y eliminación) ha alcanzado sus límites. Se comienza a percibir el agotamiento de una serie de recursos naturales, por lo tanto, la economía circular propone un nuevo modelo de sociedad que optimiza los stocks y los flujos de materiales y la eficiencia del uso de los recursos².

En este sentido la minería en Chile representa una gran oportunidad para desarrollar un modelo de economía circular, siendo una opción válida de implementar a través de la minería secundaria, que corresponde a la explotación de todo tipo de residuos mineros, como por ejemplo, en relaves. Chile tiene potencial dada el gran volumen de relaves que ha manejado a nivel país, los cuales pueden ser analizados y estudiados a través de nuevos usos o bien, como fuente de recuperación de elementos de interés comercial.

Se debe tener en cuenta que, si bien el concepto de EC es largamente conocido, existen escasas e incipientes iniciativas aplicadas en la minería local y menos aun teniendo como meta la utilización de los todos los denominados *residuos mineros*. Es por esto, que este estudio debe ser considerado como una investigación exploratoria que permita tener una visión preliminar del problema para ser atacado en mayor profundidad en futuros esfuerzos.

Por ello, el objetivo general del presente informe es la identificación de oportunidades de negocios para los *residuos mineros*, utilizando a la Economía Circular (EC) como pilar.

Concretamente, realizar un levantamiento de información en relación a la potencialidad de implementación de economía circular, a través de minería secundaria aplicada a la recuperación de elementos de interés y/o bien, a

¹ Cerdá, E. M. I. L. I. O., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Econ Ind*, 401, 11-20.

² Chacin, N., Carlos, J., & Abreu Quintero, Y. J. (2015). Logística Verde y Economía Circular Green Logistics and Circular Economics. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(3), 80-91.

través de nuevos usos de los residuos mineros. Con esto se pretende tener una primera aproximación a las oportunidades de negocio por la implementación de este modelo productivo.

Como objetivos específicos figuran:

- ✓ Revisión del concepto de Economía Circular aplicado a minería
- ✓ Estimación de oportunidades de iniciativas tanto a nivel internacional como nacional, relativas a economía circular.
- ✓ Realización de una primera revisión sobre la normativa asociada a la explotación de estos residuos mineros



2 Metodología

Sobre la metodología utilizada, esta se puede separar en las siguientes tareas:



Revisión bibliográfica: Entendimiento de los conceptos a través de revisión de antecedentes según literatura tanto nacional como internacional.



Estimación preliminar de las oportunidades, mediante el levantamiento y caracterización de la oferta de elementos a extraer desde fuentes de Minería Secundaria.



Identificación de normativas asociadas



Gap análisis es decir, un cruce entre las oportunidades y principales problemáticas identificadas.

3 Antecedentes Generales

3.1 Revisión de Conceptos

3.1.1 Economía circular

En la literatura especializada es posible encontrar diferentes definiciones a este concepto, en este caso se utilizará lo descrito por La Fundación Ellen MacArthur, que se basa en la (i) eliminar residuos, mediante su transformación a insumos para otros procesos, y contaminación desde el diseño, (ii) la mantención de productos y materiales en uso, eliminando la obsolescencia programada en el diseño original, y la regeneración de los sistemas naturales, como consecuencia de los pasos previos.

El fundamento al origen de este concepto dicta que el presente modelo económico de "extraer, producir, desperdiciar" está llegando ya al límite de su capacidad física³.

3.1.2 Minería Secundaria

Se entenderá al concepto de Minería Secundaria como la explotación de todo tipo de residuos mineros, excluyendo materiales distintos a la roca proveniente del yacimiento y su procesamiento por los distintos procesos mineros. En lo particular, estos desechos se refieren a material depositado en botaderos, rípios y relaves.

En general, no es fácil encontrar iniciativas sobre la implementación de una lógica circular con los residuos mineros a escala local. Sin embargo, se han podido recopilar las siguientes experiencias que se detallan más adelante en el presente reporte⁴.

3.2 Residuos mineros

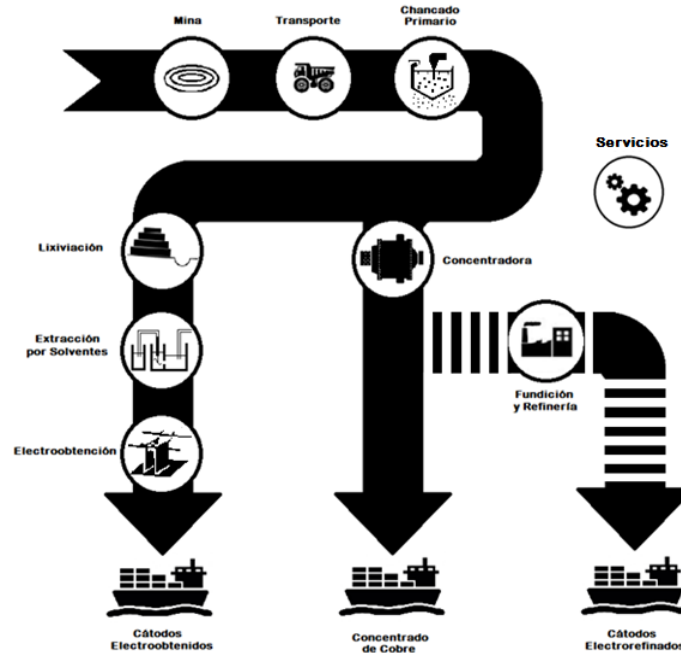
La extracción de los recursos minerales, su concentración y consecuente beneficio y refinado, con la utilización de los procesos mineros y metalúrgicos de diferente naturaleza, ha supuesto la generación de grandes beneficios económicos y el desarrollo del nivel de vida de la sociedad.

³ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>

⁴ <https://www.mch.cl/columnas/mineria-secundaria-una-necesidad-imperiosa/#>



Figura 1: Diagrama general de procesos de la minería del cobre



Fuente: Elaborado por DEyPP, Cochilco 2020

Sin embargo, durante los procesos mineros y metalúrgicos, además de obtener productos de interés y de valor comercial, generan residuos los cuales suponen un riesgo para el medio ambiente y sus ecosistemas (Rodríguez, 2006), los cuales son, por un lado, un desafío en cuanto a su manejo y disposición final, y por otro lado, una oportunidad desde el punto de vista económico. Entre las actividades antropogénicas, la minería y la metalurgia extractiva son una de las principales causas de contaminación y sus efectos están presentes en mayor o menor medida en aquellas áreas del planeta donde se explotan yacimientos de minerales sólidos (metálicos y no metálicos).

Millones de toneladas de roca estéril, relaves y otros residuos mineros son producidos por la industria minera actual (Matinde, Simate y Ndlovu 2018). Debido a su bajo valor intrínseco y a la ubicación remota de la mayoría de las operaciones mineras, más del 95% de estos materiales terminan siendo depositados en vertederos (Lottermoser 2011, Bian, y otros 2012, Flanagan, Grail y Johnson 2017, Ndlovu, Simate y Matinde 2017).

En este sentido, este estudio se referirá a los residuos mineros masivos y los depósitos de relaves, dada su magnitud y su potencial de aprovechamiento económico.

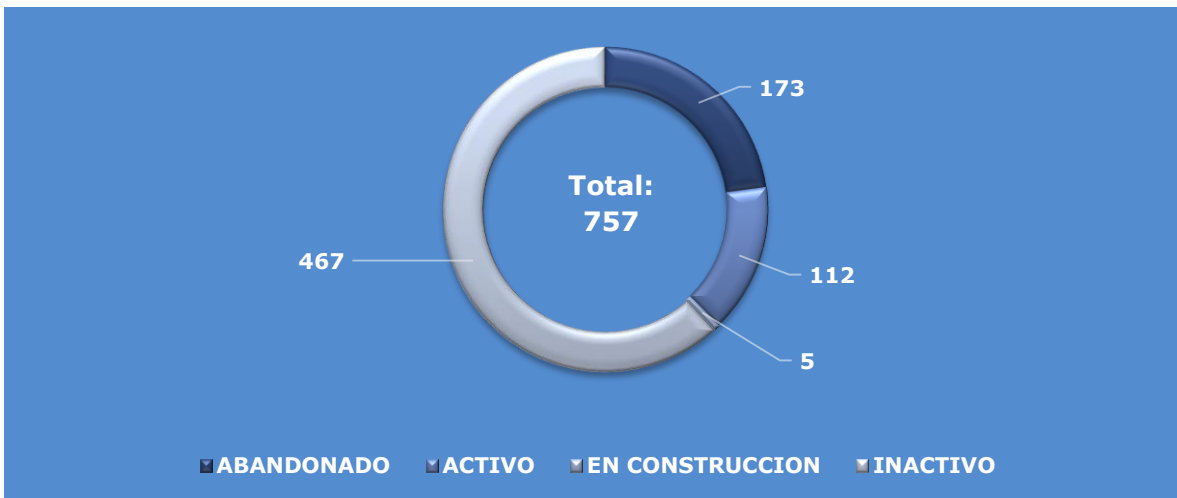
3.2.1 Depósitos de Relaves

La minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de material (roca molida) del yacimiento que explota, de la cual sólo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar (menos de 1%, para el caso de la minería del cobre). Una vez que ese material (la roca) ha sido finamente molido y concentrado por procesos de flotación, se obtiene un material (el concentrado) con una concentración más alta de cobre (entre 20 y 30%), que se puede vender como Concentrado o procesar hasta cobre metálico puro. El resto del material (muy pobre en cobre, entre otros elementos) se le llama depósito de relaves (Cochilco, 2020).

En lo específico, un depósito de relaves es una obra de ingeniería diseñada para satisfacer exigencias legales nacionales, de modo que se aisle completamente los sólidos (relaves) depositados del ecosistema circundante

Actualmente en Chile figuran 757 depósitos de relaves, de los cuales 112 de ellos se encuentran activos, 467 inactivos, 173 abandonados y 5 de ellos en etapa de construcción (Sernageomin, 2020), según se describe a continuación:

Figura 2: Distribución Depósitos de Relaves



Fuente: Elaboración propia en base a información de Sernageomin "Catastro de depósitos de relaves actualización 08-2020.

3.2.2 Depósitos de Residuos Mineros Masivos

Según Sernageomin (2018), se entiende como residuos minero masivo a todo residuo resultante de la extracción, procesamiento o beneficios de minerales. Entre estos se encuentran: botaderos de estériles, rípios de lixiviación, mineral de baja ley y escorias.

- ✓ **Botadero de Estériles:** Material sin valor económico que sale con la mena o en desarrollos mineros.
- ✓ **Rípios de Lixiviación:** Son los Residuos sólidos resultantes de la lixiviación de minerales, como ejemplo pilas permanentes de lixiviación.
- ✓ **Mineral de Baja Ley:** Es el Mineral que por su ley, temporalmente, no es procesado y que se acopia a la espera de un futuro procesamiento.
- ✓ **Escorias:** Son los residuos que resultan de procesos pirometalúrgicos. La escoria habitualmente es depositada directamente en vertederos autorizados.

Actualmente, de manera referencial, Sernageomin (2020)⁵ ha identificado 1415 instalaciones asociadas a depósitos de residuos mineros masivos, de las cuales:

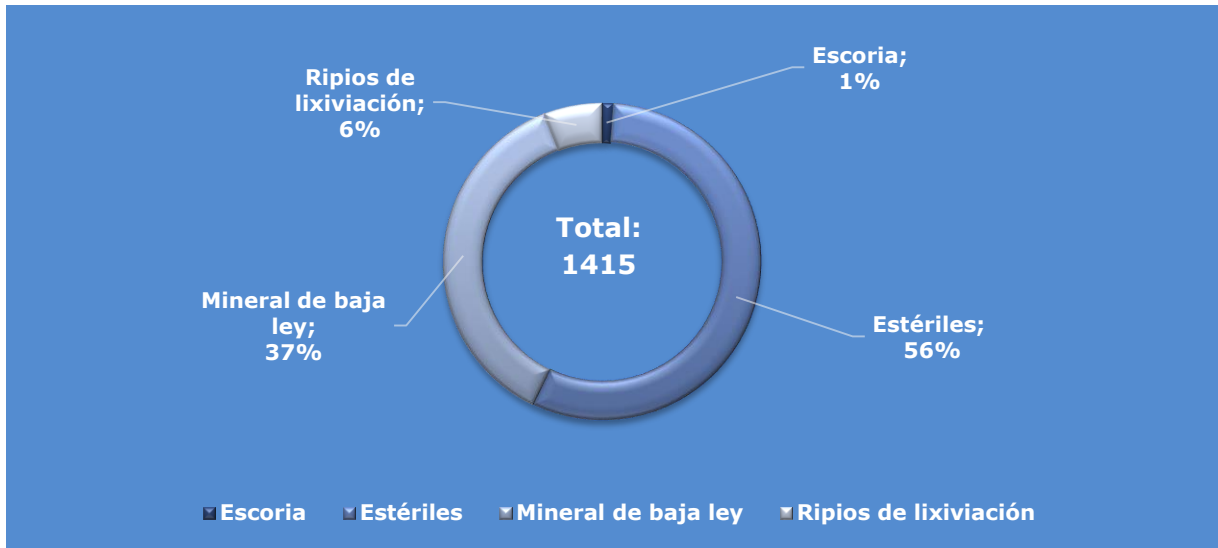
- ✓ 15 corresponden a depósitos de escorias
- ✓ 83 de ellos a rípios de lixiviación,
- ✓ 523 a depósitos de minerales de baja ley
- ✓ 794 a depósitos de estériles.

El detalle de los estados de las distintas instalaciones se presenta en el Anexo I. Importante mencionar que los estados de estas instalaciones son dinámicos, puesto que estas se van alimentando de las fiscalizaciones realizadas por el Sernageomin.

⁵ Importante: Los estados de estas instalaciones es dinámico, puesto que estas se van alimentando de las fiscalizaciones realizadas por el Servicio.



Figura 3: Distribución Depósitos de Residuos Mineros Masivos



Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por Sernageomin, de manera referencial, puesto que el sistema y proceso que la administra se encuentra en proceso de actualización.

3.2.3 Otros Residuos Mineros

Además, se distinguen otros residuos con potencial valor económico derivados de los procesos de fundición y refinación:

- ✓ **Barros anódicos:** Los barros anódicos es un subproducto que se genera en el proceso de refinación electrolítica del cobre. La composición de estos es variables y puede contener metales preciosos y otros elementos insolubles de los ánodos.
- ✓ **Polvos de fundición:** Los polvos de fundición son residuos generados por el procesamiento pirometalúrgico de los concentrados de cobre.

3.3 Estimación de residuos mineros

Según estimaciones de Chilepolimetálico (2021), se identificaron volúmenes de residuos mineros anuales. Dado esto, la siguiente tabla muestra volúmenes estimados de recursos minerales secundarios contenidos en los yacimientos antropogénicos señalados anteriormente, en Chile y el mundo.

Tabla 1. Volúmenes estimados de recursos minerales secundarios

Tipo de residuo	Tonelaje Mundial	Tonelaje Chile	Potencial de elemento de valor
Relaves	7.000 Mtpa	800 Mtpa	Fe, Pb, Zn, Cu, Mo, Re, Co, PGM, REE, SiO ₂ , Caolin
Escorias de Fundiciones Cu	40-35 Mtpa	40 Mt (Acumulado)	Cu, Mo, Re, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃
Polvos de Fundiciones de Cu	660 ktpa (2019)	36,4 ktpa (2018)	Cu, Zn, Ge, Pb, Ag
Barros anódicos	57 ktpa (2018)	ND	Cu, Ag, Au, Pt, Pd, Se, Te
Ripios de Lixiviación	ND	63 Mtpa	Cu, Al, Mn, Ga, In y otros
Estériles	20.800 Mtpa	2.800 Mtpa	Cu y subproductos

Fuente: Chilepolimetálico (2021).

3.4 Minerales Críticos para el desarrollo de tecnologías limpias

Por un lado, el acelerado desarrollo tecnológico global ha requerido y seguirá requiriendo de una demanda creciente por recursos minerales necesarios para aplicaciones como la generación y almacenamiento de energía desde fuentes renovables, alta tecnología, entre otros usos.

Por otro lado, las evidencias del cambio climático han impulsado a las Naciones Unidas a promover los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS), formulando metas de mitigación y mejoras para el desarrollo de la actividad minera.

Bajo este escenario, se busca fomentar la economía circular, promoviendo la extracción y el procesamiento sustentable de minerales y metales para asegurar el suministro de tecnologías de energías limpias, minimizando la huella de carbono, donde los recursos minerales tienen un rol preponderante.

A continuación se muestra un resumen de metales requeridos para tecnologías limpias.



Tabla 2. Minerales críticos requeridos

Tipo de tecnología	Potencial de elemento de valor
Tecnología Solar	Al, In, Si, Cd, Fe, Ag, Cu, Pb, Te, Ga, Ni, Sn, Ge, Se, Zn
Tecnología Eólica	Al, Pb, Cr, Mn, Co, Mo, Cu, REE ⁶ , Fe, Zn
Vehículos Eléctricos y Almacenamiento de Energía	Al, Fe, Ni, Co, Pb, REE, Cu, Li, Si, C, Mn, Ti

Fuente: Elaboración propia en base a información de Chilepolimetálico (2021).

⁶ REE: Tierras raras, se designan como tierras raras a un grupo de 17 elementos, críticos para tecnologías eólicas y para el almacenamiento de energía, así como también para vehículos eléctricos.



4 Identificación de Oportunidades

Este capítulo muestra los resultados en base a un benchmarking de experiencias en la reutilización de diferentes residuos mineros. Además, en materia a las mejores prácticas sustentables relacionadas con el manejo de residuos en la Industria Minera, se identificaron prácticas relacionadas con economía circular en cuanto a recuperación de elementos de interés comercial, así como buenas prácticas en cuanto a reutilización, reciclaje, rellenos de rajos y minas subterráneas, y rehabilitación de sitios mineros, las cuales se presentan a continuación.

4.1 Recuperación de elementos de valor desde residuos mineros

En Chile la recuperación de elementos de valor desde residuos mineros no es algo reciente. Existen registros de la (i) recuperación de cobre desde canaletas de relaves en las instalaciones de Chuquicamata y El Salvador, durante el siglo pasado, (ii) el retratamiento de relaves antiguos y frescos por parte de la Minera Valle Central, en las instalaciones de la mina El Teniente, de Codelco, (iii) el retratamiento de relaves por parte de CAP, en la Minera Candelaria o denominado proyecto Candelaria Tailings, (iv) referencias desde variadas empresas sobre el retratamiento de rípios de lixiviación in situ y (v) las experiencias de EcoMetales en el tratamiento de diversos residuos de fundiciones de cobre.

4.1.1 Reprocesamiento de relaves

Dada la gran cantidad de material producido, siendo el residuo de mayor volumen generado por la industria del cobre, a nivel nacional existen importantes iniciativas en relación al reprocesamiento de relaves.

Una de ellas corresponde al reprocesamiento que realiza Minera Valle Central⁷, que recupera cobre y molibdeno desde relaves frescos y antiguos, provenientes de Codelco Chile, División El Teniente. La planta procesa alrededor de 130.000 ton/día de relaves, con una ley de 0,12% de cobre total. También está facultada para extraer relaves antiguos, que han sido depositados en el Tranque Cauquenes entre los años 1939 y 1977.

⁷ <https://mineravallecentral.cl>

Por otro lado, EcoMetales y JRI ingeniería, en conjunto con la empresa de sondajes Fugro y la Comisión Chilena de Energía Nuclear se encuentran desarrollando el proyecto Tecnológico "Recuperación de elementos de valor desde depósitos de relaves". Dicho proyecto aspira a hacer una contribución a las políticas públicas de minería sustentable en Chile, al poner a disposición de todos los actores de la industria herramientas para reducir, reciclar y remediar tranques de relaves.

Asimismo, la Política Nacional Minera liderada por el Ministerio de Minería busca proponer modificaciones al ordenamiento jurídico y fomentar el reprocesamiento y reutilización de depósitos de relaves, y otros depósitos artificiales mineros como botaderos, escoriales, rípios de lixiviación, entre otros.

4.1.2 Reprocesamiento de rípios de lixiviación y botaderos

Iniciativas de este tipo se conocen en operaciones mineras como División Chuquicamata de Codelco, Quebrada Blanca y otras, quienes han propuesto proyectos para recuperar cobre desde rípios de lixiviación. Según información de Chilepolimetálico (2021), adicional al cobre contenido en rípios de lixiviación, se estima que podrían contener elementos como aluminio, magnesio, galio, indio, entre otros.

Por otro lado, se estima que existen del orden de 2.800 millones de toneladas de botaderos de material "estéril" en nuestro país (Chilepolimetálico, 2021), con presencia de cobre y otros elementos de valor que podrían ser caracterizados y valorizados para efectos de su recuperación.

4.1.3 Procesamiento de Barros Anódicos

La presencia de metales preciosos y otros elementos químicos convierten al barro anódico en un compuesto de interés comercial que puede ser transado en el mercado o procesado a productos con mayor valor agregado como el metal doré⁸, oro y plata.

En el 2009, Codelco producía en conjunto alrededor de 1.400 toneladas de barros anódicos al año en las divisiones Ventanas, Codelco Norte y Salvador. Únicamente Ventanas contaba con las instalaciones necesarias para procesar

⁸ El metal doré es una aleación no refinada de oro y plata que puede además contener pequeñas cantidades de otros metales. Es moldeado en forma de lingotes o ánodos.



barros anódicos hasta metales preciosos de alta pureza, sin embargo, sólo tenía la capacidad para procesar aproximadamente el 60% de la producción de barros corporativos, por ende el resto se vendía en el mercado internacional (Cortes, 2009).

Posteriormente, la estrategia de la estatal cambió, con la creación de la Planta Recuperadora de Metales SpA (PRM) en el 2016, siendo un proyecto binacional (Codelco y la empresa coreana LS Nikko) cuyo objetivo es el procesamiento de metales No Ferrosos provenientes de refineries de cobre, de donde se extraen precipitados ricos en cobre y barros anódicos, para recuperar y comercializar los metales preciosos.

Como antecedente, la sociedad estableció un contrato de maquila por los próximos 20 años para el procesamiento de barros anódicos producidos por Codelco y la recuperación de los metales contenidos (Chilepolimetálico, 2021).

4.1.4 Tratamiento de Polvos de Fundición

La empresa filial de Codelco Ecometales procesa los polvos de fundición mediante lixiviación ácida y obtiene una solución de PLS (Pregnant Leaching Solution) que es tratada por extracción por solvente (SX) y Electrowining (EW) para producir cátodos de cobre (Chilepolimetálico, 2021). Adicionalmente, se está desarrollando un proceso complementario para extraer metales no recuperados en la lixiviación ácida.

Asimismo, la solución rica en cobre proveniente de la lixiviación ácida de polvos y efluentes de refinería y es sometida a tratamientos especiales para la obtención de escorodita, un residuo arsenical muy estable que es enviado a un depósito autorizado.

4.1.5 Tratamiento de Escorias

Las escorias de cobre son el resultado de residuos generados en el proceso de fundición de este metal para producir ánodos de cobre. Estos pueden ser revalorizados como materiales para el sector de la construcción además de recuperar algunos elementos de valor a partir de ellos.

Existen iniciativas en esta temática que provienen principalmente desde las Universidades. Ejemplo de ello corresponden a estudios realizados por parte del Universidad de Atacama a los escoriales de mayor potencial de la región de Atacama, principalmente por parte de la Universidad de Atacama, para evaluar su uso como material de construcción. Asimismo, trabajos similares se han



realizado en la región de Valparaíso con material proveniente de Codelco Ventanas. Igualmente, la Universidad de Concepción también está desarrollando algunos proyectos relacionados al procesamiento de escorias (Chilepolimetálico, 2021).

Por su parte, importante mencionar que existen inactivas de recuperación de cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación a nivel nacional. Ejemplo de ello corresponde al procesamiento de escorias provenientes de la Fundición Hernan Videla Lira que realiza Planta Matta de Enami con el fin de recuperar el cobre contenido en ellas. Esta situación ocurre principalmente en situaciones de baja cantidad de mineral para procesar en dicha planta, vale decir, cuando el precio de cobre es bajo y por ende los productores de mineral no les conviene vender a Enami (Valderrama, L. & Gonzalez, M., 2018).

4.1.6 **Reciclaje de Escorias**

Como se mencionara anteriormente, uno de los usos de las escorias es el de extracción de metales remanentes, los cuales muchas veces alcanzan leyes considerables. Otros usos que se le puede dar, es como materiales de construcción, tales como:

- i. Estabilidad de suelo arcilloso: Los suelos expansivos arcillosos son muy inestables y significan un riesgo para las estructuras que se construyen sobre ellos, ya que al absorber agua pueden expandirse hasta en un 10%. Estudios han demostrado que éstos pueden ser estabilizados mediante la mezcla con escorias de cobre (Gupta, y otros 2012).
- ii. Baldosas: Se pueden utilizar las escorias de cobre en la elaboración de baldosas, como es el caso de un depósito abandonado de la región de Atacama, que las usó en reemplazo de los áridos de río. Las materiales para la fabricación de las baldosas fueron cemento, árido de escoria, agua y otros aditivos (Nazer, y otros 2012).
- iii. Hormigones: Un estudio realizado por Nazer et al 2010, aporta resultados comparativos de la resistencia a la compresión de hormigones fabricados con áridos de escoria de cobre de la Fundición Hernán Videla Lira versus un hormigón con áridos convencionales de río.



4.2 Buenas prácticas sustentables del manejo de residuos mineros

4.2.1 Reutilización y reciclaje de relaves

Se han analizado las propiedades físico-químicas de los relaves, específicamente para ser usados en los materiales de construcción. Algunos de ellos corresponde a:

- i. Cemento: El uso de relave de cobre como aditivo en el cemento podría incrementar su resistencia y elasticidad, a la vez que mejora su desempeño. Un estudio en China mostró que el óptimo era añadir 15% de relave (Zhang, y otros 2014). Otro estudio realizado en Turquía comprobó que adicionar entre un 5% y un 10% de relaves de cobre al cemento, este aumentada su durabilidad, y resistencia a la flexión y compresión. También se observó una disminución en su expansión autoclave (con un 5% de relaves), lo cual significa menor probabilidad de desintegración y ruptura (Onuaguluchi y Eren 2012).
Otros estudios muestran que al adicionar escoria de carbón y relaves de cobre a la mezcla para la calcinación del cemento Clinker (en vez de la arcilla ocupada tradicionalmente), puede generar un cemento de mayor calidad con mejor resistencia y estabilidad (Qiu, y otros 2011).
- ii. Ladrillos y baldosas: Se estudió la factibilidad de hacer ladrillos utilizando relaves de cobre, a través de geopolimerización. Esta técnica requiere de sílice y alúmina, los cuales se encuentran normalmente en los relaves de cobre. A diferencia de los ladrillos convencionales, los hechos en base a relaves no utilizan arcilla ni roca, ni requieren altas temperaturas de cocción, lo cual trae beneficios ambientales y ecológicos. Los geopolímeros se caracterizan por ser mejores que los ladrillos tradicionales en términos de resistencia mecánica, alta resistencia al ácido, excelente adherencia a agregados, inmovilización de sustancias tóxicas y emisiones más bajas (Ahmari y Zhang 2012).
En Perú, se estudió agregar relave de cobre en la elaboración de ladrillos y baldosas. La cantidad de relave seco que se adicionó varió entre un 10 y 22% (Romero y Flores 2010).
- iii. Hormigón: la adición de relave al hormigón tiene un leve impacto negativo en el asentamiento, porosidad y tiempo de fraguado. Respecto a la toxicidad de la mezcla, los experimentos realizados mostraron que los niveles de metales pesados que podían ser liberados son mucho más bajos que los límites máximos establecidos por los códigos de regulación de Estados Unidos (Onuaguluchi, Obinna; Eren, Özgür, 2012). Se ha



observado también un aumento de la densidad, mayor resistencia, mayor flexibilidad, menor permeabilidad contra el agua, el aire y el cloro, menor compactación luego del secado, y menor corrosión(Thomas, Damare y Gupta 2013).

- iv. Pintura: Los relaves pueden ser usados como extensores para pintura. Los extensores son elementos que no varían el color de la pintura, pero si le agregan propiedades tales como mayor adhesividad, facilita su aplicación, mayor resistencia al agua, y reduce el costo de la pintura, entre otros.

Las pinturas con extensor de relave de cobre adicionado demostraron tener mejor rendimiento en dureza, adhesión, y resistencia a la abrasión, al impacto y a la corrosión, bajo condiciones de humedad y salinidad (Saxena y Dhimole 2006).

4.2.2 Revegetación de depósitos de residuos

En los casos donde la presencia de elementos no alcance leyes económicamente interesantes, se recomienda la estabilización de estos depósitos con agentes vegetales, técnica denominada fitoestabilización o fitoremediación, siendo esta una de las técnicas con menores costos y menos inhabilitante para el retratamiento futuro de un relave⁹.

La presencia de elementos y compuestos ambientalmente significativos en algunos residuos mineros requiere invariablemente su aislamiento en depósitos adecuadamente construidos (Lottermoser 2011). Para esto se menciona una estrategia que consiste en aislar los relaves y las rocas de desecho mediante el recubrimiento con una capa gruesa de material sólido e inerte. Los materiales utilizados para estas cubiertas incluyen roca estéril y relaves benignos, arcillas, tierras, residuos orgánicos y materiales neutralizantes. No obstante, el autor explica que el rendimiento a largo plazo de las cubiertas secas se ve afectado por el clima, disponibilidad de materiales, la estabilidad física, la evolución del suelo, el crecimiento de la vegetación, entre otros. Es en este punto, según Lottermoser (2011), la vegetación es una de las claves para el funcionamiento eficiente y sostenible de las cubiertas secas, porque las plantas protegen las cubiertas contra la erosión y transpira el agua infiltrada.

En este punto la fito-estabilización aparece como una alternativa de vegetación. La fito-estabilización es una de las cuatro formas principales de fito-remediación, dentro de sus principales ventajas están: más económica que

⁹ En muchos casos se usa la cementación de relaves o la cobertura total con carpetas de HDPE.



otras técnicas de estabilización, fácil de implementar y es preferible estéticamente (Cochilco 2016). De acuerdo a Tobar y Venegas (2014) ésta consiste en la implantación de especies arbóreas nativas en los depósitos terminados (no activos), capaces de resistir y sobrevivir en suelos con altos niveles de metales, a fin de estabilizar física y químicamente a depósitos de relaves (Tobar y Venegas 2014). La investigación realizada por Mendez y Maier (2007) menciona que la fito-estabilización de los relaves mineros en regiones áridas y semiáridas tiene un potencial prometedor. Esto no deja de ser relevante ya que mencionan que los sitios de disposición de relaves de minas, inactivos o abandonados, prevalecen en regiones áridas y semiáridas de todo el mundo (Mendez y Maier 2007), como lo son en el Norte de México y el oeste de Estados Unidos, la costa del Pacífico de Sudamérica (Chile y Perú), el suroeste de España, el oeste de la India, Sudáfrica y Australia (Munshower 1994, Tordoff, Baker y Willis 2000).

En Chile, existen experiencias exitosas a distintas escalas en el tranque Talabre de CODELCO. Junto a lo anterior, Minera los Pelambres ya puso en práctica este método en el año 2008 y se trató de un proceso inédito en Chile, debido a que por primera vez comunidades vecinas a una faena minera participan del cierre a través del proceso de fito-estabilización, apuntando a la sustentabilidad en una zona donde se convive con la agricultura. En una primera etapa se trasplantó y probó la adaptación de más de 23 mil plantas, de 11 especies nativas que cubrieron un total de 30 hectáreas de la superficie del tranque, los resultados de esta etapa fueron satisfactorios, puesto que 7 de estas 11 especies nativas presentaron una positiva adaptabilidad al terreno, ya que al 2015, las raíces se encontraban emplazadas en el mismo relave cumpliendo la función de estabilizar y absorber metales pesados, mientras que en el plano externo muchas plantas ya superan los dos metros de altura (Mesa de Cierre del Tranque Los Quillayes 2015).

Chile ya cuenta con estudios localizados en la Región de Coquimbo para poder validar e implementar la tecnología de fito-estabilización en los depósitos de relaves mineros de esta región. En este sentido, el ex-Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM), en su momento publicó la guía técnica "Fito-estabilización de Depósitos de Relaves en Chile" (2011)¹⁰.

Por su parte, importante mencionar que Lottermoser (2011) manifiesta que aún falta evidencia de un rendimiento comprobado a largo plazo de este tipo de cubiertas.

¹⁰ <https://sites.google.com/site/fitotoxidadyfitorremediacion/fitorremediacionpublicaciones/libros>

4.2.3 Rehabilitación de Sitios Mineros

Un ejemplo de esto se sitúa en Chile a través de un convenio firmado entre la Compañía Minera Dayton y la Subsecretaría del Ministerio del Medio Ambiente, en este caso el plan de intervención de relaves constó de dos tipos de intervención diferenciada por zona y justificada por las características, condiciones y ubicación de cada una de ellas. En el área más cercana al sector poblado se tomaron acciones como: instalación de una cerca con cierre de malla para seguridad y cerco vegetal para control ambiental y aporte paisajístico, restitución de cubierta de suelo, generación de un diseño paisajístico de vegetación natural autóctona y de acceso público, con características de "paseo peatonal" y mirador, además de plantar ejemplares de especies autóctonas definidas como vulnerables. Por otro lado en el área más alejada del sector poblado las acciones se concentraron sólo en la extracción de relaves y su traslado (Fundación Chile 2015, Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente 2013).

De igual forma existen ejemplos internacionales como lo es el proyecto Eden desarrollado en un antiguo rajo de caolinita, ubicado cerca de las ciudades St Blazey y St Austell, Cornwall, en donde se construyeron invernaderos, un anfiteatro y jardines con fines educacionales (The Eden Project 2016).

Por otro lado, investigaciones recientes de los Laboratorios de Ciencias Mineras y Minerales de CANMET han estado realizando estudios con el fin de demostrar que residuos orgánicos puedan ser utilizados para remediar los relaves de las minas y establecer un uso agrícola de la tierra para "cultivos energéticos", tales como: maíz, canola, soja y otras especies, a fin de utilizarlos como materia prima en la producción de combustible verde (Tisch, Zink y Vigneault 2009).

Si bien examinar las posibles alternativas para el cierre de una mina es de suma importancia, esto depende del contexto y de la situación de cada faena, por eso se recomienda evaluar tanto física como químicamente los relaves abandonados mediante observaciones en terreno, análisis en laboratorios, entre otros, para tomar la decisión. Un ejemplo de esto es el caso de los relaves abandonados de Mount Nansen, Yukon, Canadá (2010), en donde la implementación de todas estas medidas permitió optar por la estrategia más rentable y práctica para el desmantelamiento permanente de los relaves en la mina abandonada (Kwong 2010).



4.2.4 Reutilización y reciclaje de roca estéril

Estudios realizados hace algunos años mencionan que la roca estéril puede reutilizarse como material de relleno para huecos abiertos, reduciendo el volumen de desechos en la mina, como materiales de recubrimiento para depósitos de residuos (Lottermoser 2011, Bian, y otros 2012).

Estudios más recientes, como la realizada por Gorakhki (2017) en el Oeste de EE.UU., evaluaron la posibilidad de reutilizar roca estéril mezclada con relaves como materia prima para fabricar cubiertas de balance hídrico, permitiendo aislamiento a largo plazo.

4.2.5 Relleno de Rajos y Mina Subterránea.

- **Relleno de rajo**

El año 2008, el antiguo yacimiento de uranio de Lichtenberg, Alemania, fue rellenado con cerca de 125 millones de m³ de material estéril radioactivo procedente de antiguos botaderos. Posterior al relleno se llevó a cabo la instalación de cubiertas de protección, recubrimiento vegetal, un sistema de drenes, y sistema de tratamiento de aguas de mina. El relleno del rajo se hizo de manera tal de poner el material estéril de alto poder reactivo en el fondo del rajo, al medio material con potencial incierto, y encima de todo, material con potencial neutralizador, intercalando cada sección con capas de argamasa para neutralizar acidez. El proceso de relleno y estabilización tardó 18 años y tuvo altos costos, sin embargo, sirvió para determinar que la realización de un programa de predicción desde el comienzo de la vida útil de un botadero es una solución costo-eficiente en la gestión del drenaje minero (Fundación Chile 2015).

- **Relleno de mina subterránea**

La operación de la mina subterránea Rudna, Polonia, opera desde el año 1974. Desde 1995, el material estéril se deposita en el interior de la mina en su totalidad, rellenando las cavernas vacías como relleno en seco o en el uso para la construcción de caminos subterráneos, de manera tal de ahorrar costos relativos a disposición de residuos en la superficie y a actividades para dar estabilidad física a la mina (Fundación Chile 2015).

Otros ejemplos corresponden a las minas subterráneas de Zinkgruvan y Garpenberg, ambas localizadas en Suecia, donde utilizan roca estéril para la construcción de nuevas represas y carreteras en la mina, además la roca estéril



libre de sulfuros es vendida a contratistas locales y los minerales de ganga separados del mineral se mezclan con cemento y se utilizan para rellenar las aberturas subterráneas y para la construcción de pilares, lo que permite una recuperación de mineral cercana al 100% (Compendium of Mining and Processing Waste Management Technologies 2015). Para el caso de la mina Zinkgruvan, aproximadamente el 60% del volumen vacío se llena con pasta y el 40% restante se llena con roca estéril para manejar el cierre, estabilizar la mina y minimizar el transporte de residuos a la superficie (Lundin Mining 2017). Por su parte, Garpenberg utiliza el relleno de pasta: la pasta del relave es mezclada con cemento y escoria metalúrgica molida. En Garpenberg han evaluado diferentes fórmulas para encontrar la más óptima de acuerdo a su contexto (Eriksson y Nyström 2018).

4.2.6 **Otras aplicaciones**

- **Planta Fotovoltaica**

Otra iniciativa de economía circular que actualmente se encuentra en desarrollo es el proyecto pionero a nivel mundial a cargo de la minera Anglo American en Chile, que permite reducir las emisiones de CO₂ en 58 toneladas al año, generar energía eléctrica renovable de 150.000 kWh/año y reducir en un 80% la evaporación del agua de la laguna del Tranque Las Tórtolas¹¹, de la Operación Los Bronces (Anglo American Chile, 2019). La iniciativa consiste en 256 paneles fotovoltaicos¹² (de 330 watts cada uno) ubicados en una isla flotante sobre dicho depósito de relaves que surge como una solución para maximizar el uso eficiente de agua ante la escasez hídrica de la zona central del país. Con este sistema se espera contribuir al objetivo de reducir las emisiones de CO₂ produciendo energía no contaminante (La Voz de Chile, 2019). La instalación convierte este espacio nunca antes utilizado, en un área aprovechable y mejora la generación eléctrica fotovoltaica gracias al efecto de enfriamiento natural del sistema, producto de la diferencia de temperatura entre el agua y el ambiente (Anglo American Chile, 2019). Las plantas fotovoltaicas flotantes actualmente son usadas en otros países como Japón, China (que posee la más grande del mundo), Francia y próximamente Holanda, que construirá la primera sobre el mar (Heusser, 2019).

¹¹ Está localizado en la comuna de Colina, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana de Santiago, Chile.

¹² La inversión fue de 250 mil dólares (\$167.925.000 CLP).



5 Legislación Asociada

Al revisar la actual legislación, como los proyectos de minería secundaria son un desarrollo incipiente en la industria, a medida que se han presentados este tipo de proyectos se han revisado y tratado de forma individual según la normativa asociada. No obstante, todo proyecto está afecto al régimen jurídico para la protección del medio ambiente, según el siguiente marco regulatorio:

- i. *Ley N°19.300. Ley sobre bases generales del medio ambiente.*
- ii. *D.S. N°40 de 2012. Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental.*
- iii. *D.S. N°132 de 2002. Reglamento de seguridad minera*
- iv. *D.S. N°248 de 2006. Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves.*
- v. *Ley N°20.551. Ley que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras.*
- vi. *D.S. N°41 de 2012. Reglamento de la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras.*
- vii. *D.F.L N°1122. Código de aguas.*
- viii. *D.S. 50 de 2015. Establece las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el Artículo 294 del referido texto legal.*
- ix. *D.S. N°148 de 2003. Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.*
- x. *D.F.L N°725/1967. Código Sanitario.*
- xi. *D.S. N°594 de 2000. Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.*
- xii. *D.F.L. N°3557 de 1980. Disposiciones sobre protección agrícola*
- xiii. *Ley N° 2.222 de 1978. Sustituye ley de navegación.*
- xiv. *Decreto N° 136 de 2011. Promulga el*
- xv. *Protocolo de 1996 relativo al convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias.*
- xvi. *D.S. N°1 de 1992. Reglamento para el control de la contaminación acuática*

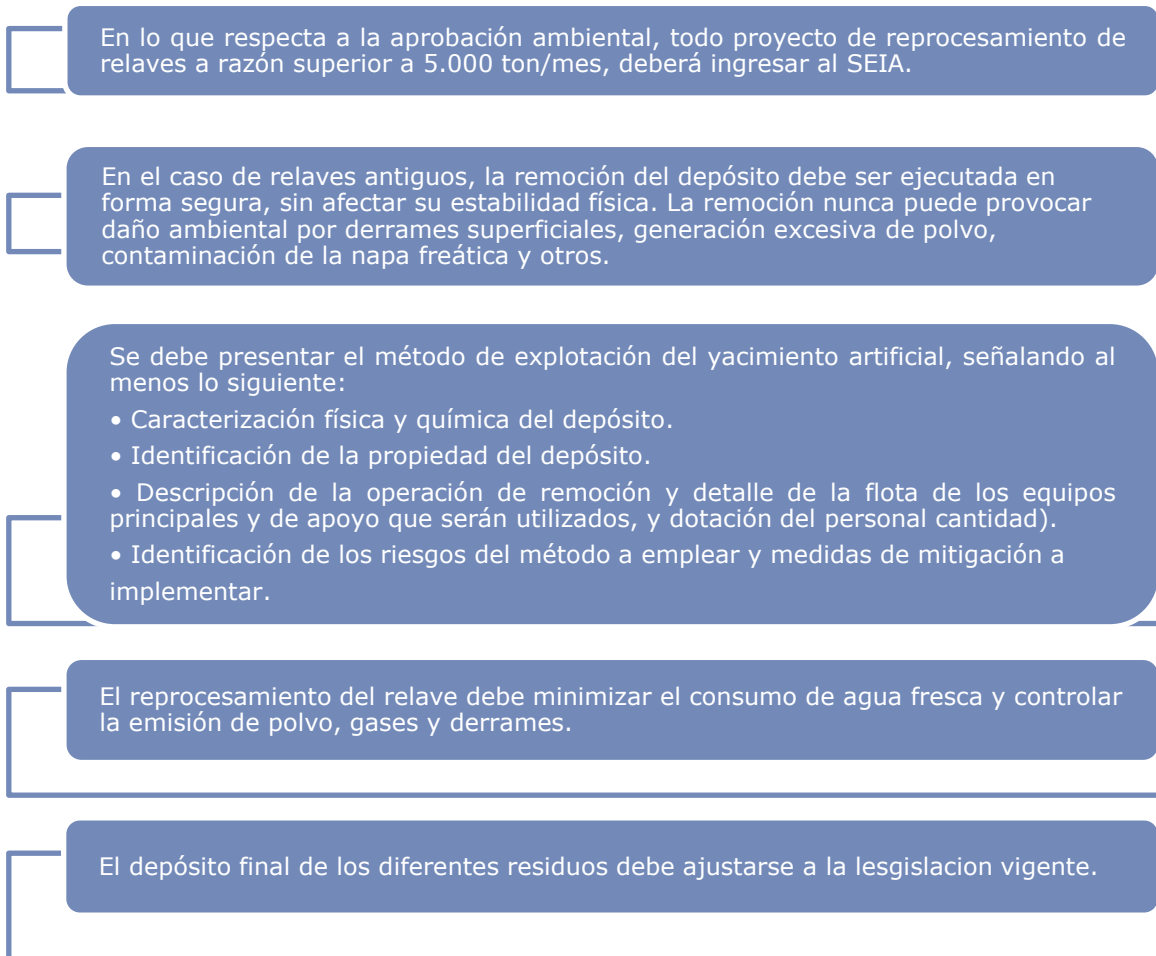
La reglamentación vigente en materia de relaves está enfocada en establecer los requisitos para los depósitos finales y el aseguramiento de su estabilidad física y química durante y posterior al cierre de las faenas mineras. Importante destacar que las plantas de reprocesamiento estarán reguladas principalmente por el D.S. N°132 y normativa asociada al cierre de faenas (Ley 20.551 y D.S. N°41).



Junto a lo anterior, Sernageomin y el SEA han elaborado una serie de guías para orientar a los titulares, evaluadores y comunidad en general, en el cumplimiento de los requisitos y condiciones que establece la normativa legal¹³.

Por su parte, según el Manual de Relaves con valor (2020) se señalan aspectos importantes a considerar para el ingreso de estos proyectos al SEIA:

Figura 4: Consideraciones para ingreso al SEIA de proyectos de reprocesamiento de relaves



Fuente: Elaboración propia en base a información de Manual de Relaves con Valor (2020).

¹³ <https://www.sea.gob.cl/documentacion/guias-evaluacion-impacto-ambiental>



En síntesis, al revisar el cuerpo normativo en relación a proyectos de reprocesamiento de relaves (o de residuos mineros en general), dado que éstos son incipientes la operatividad respecto de ingreso y su evaluación en el SEIA, se han analizado caso a caso respecto del cumplimiento normativo. Por ello, se han creado manuales como el de Relaves con Valor (2020), para ayudar la evaluación de estos proyectos.

Asimismo señalar que Sernageomin puede exigir permisos de exploración dependiendo del proyecto. Por su parte, respecto de la propiedad, de acuerdo con la legislación vigente¹⁴, los relaves pertenecen a la compañía minera que los ha generado, lo que implica que el dueño de los relaves es el propietario o arrendatario de la faena que los generó. Además, las sustancias minerales contenidas en relaves abandonados por su dueño son susceptibles de concesión minera.

Dado lo anterior, si bien la normativa actual regula de alguna manera la evaluación de estos proyectos, en especial los de reprocesamiento de relaves, no se evidencia una normativa más completa respecto de minería secundaria aplicada en residuos mineros en general.

Al respecto, importante mencionar que El Ministerio de Minería está ejecutando el Plan Nacional de Relaves, en cuyos ejes de trabajo se considera modificar el ordenamiento jurídico para regular el reprocesamiento de relaves, específicamente se está trabajando en modificaciones al D.S. N°248 y D.S. N° 132, y un proyecto de ley que regule el reprocesamiento en la Ley 20.551.

¹⁴ Artículo 6 de la Ley 18.248 "Código de la Minería".

6 GAP Análisis

Si bien la revisión mostró, de forma teórica, un set de oportunidades para la reutilización y generación de valor a partir de residuos mineros, se hace necesario realizar un análisis de brechas, con la finalidad de identificar las causantes que puedan explicar las diferencias entre el escenario esperado y el actual.

Es entonces, que se presentan las principales barreras:

- **Incertidumbre geológica y de la geoquímica asociada:** Si bien existen estimaciones, no existe claridad sobre el tipo y cuantía de recursos mineros presentes en los diversos residuos mineros mencionados. Por lo cual, se hace necesario el desarrollo y adaptación de metodologías de estimación de recursos y reservas, las que aún se encuentran poco maduras en la industria local.
- **Bajo conocimiento en tecnologías:** Se requiere profundizar en la comprensión de las tecnologías reconocimiento y reprocesamiento.
- **Carencia de normativa:** Si bien existe una sólida y robusta normativa en materia en la disposición de residuos mineros, hay una necesidad de avanzar en normativas que regulen el reprocesamiento u otro uso de los residuos mineros.
- **Desconocimiento del posible impacto ambiental:** No hay consenso del impacto en el medioambiente que podría llevar el retratamiento de estos residuos mineros

De igual forma, se sistematizan las oportunidades identificadas en el desarrollo de este ejercicio teórico:

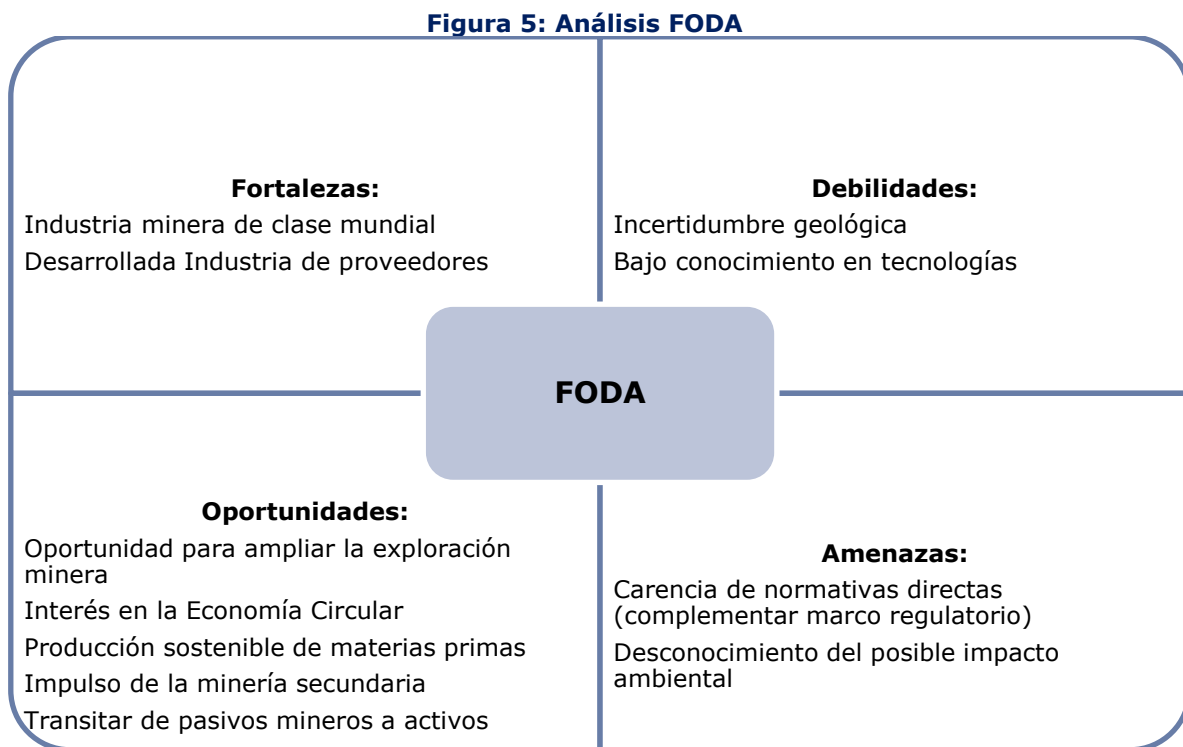
- **Potencial de exploración:** Ante el actual escenario de las empresas exploradoras de tipo junior, la exploración y cuantificación de residuos mineros se presenta como una oportunidad para la generación de nuevo conocimiento y opciones reales de negocios.
- **Interés en la Economía Circular:** Existe un creciente interés en la implementación de la economía circular y la reutilización de estos residuos, siendo una clara oportunidad.
- **Producción sostenible de materias primas:** Durante los últimos años se ha resaltado la importancia de avanzar a una matriz productiva



sostenible, esto en minería ha llevado a hablar del concepto de minería verde¹⁵.

- **Impulso de la minería secundaria:** Aunque no existe claridad en el tamaño de este posible nuevo negocio, se asume que podría ser una escala menor a la gran minería y, es ahí, donde se puede utilizar como una herramienta de fomento al segmento pequeña y mediana minería, como de desarrollo con proveedores.
- **Industria minera de clase mundial:** El país cuenta con infraestructura y redes que permitirían la incorporación de nuevas fuentes de minerales en su actual oferta.

A modo de resumen, estas barreras y oportunidades han sido dispuestas en un diagrama de análisis tipo FODA¹⁶.



Fuente: Elaboración Propia

¹⁵ "Minería verde vendría a ser una forma de hacer minería, disminuyendo considerablemente los impactos que han caracterizado al sector a nivel internacional, relacionados principalmente con el uso intensivo de energía y sus emisiones; fijando una línea base móvil con metas claras en tiempo, emisiones a disminuir y la manera de alcanzar dichas metas, incluyendo relacionamiento con stakeholders internos y externos".

¹⁶ Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas.



6.1 Drivers Internacionales

El nexo entre el comercio y la economía circular está atrayendo la atención en todo el mundo. A modo de ejemplo, China impuso restricciones a la importación de una serie de determinados residuos y chatarra en 2018¹⁷, y esto fue seguido de restricciones similares en otros países de la región. A nivel internacional, las Partes del Convenio de Basilea¹⁸ acordaron enmiendas para aumentar los controles de movimientos transfronterizos de determinados residuos plásticos en 2019.

Los debates preliminares sobre las interrelaciones entre el comercio y la economía circular se llevaron a cabo como parte del Foro Público de la Organización Mundial del Comercio (WTO) en octubre de 2018, así como en el Foro Mundial de Economía Circular en octubre de 2018 y junio de 2019. Luego, el Comité de Comercio y Medio Ambiente de la WTO, en noviembre de 2019, debatió estos temas en profundidad.

Más recientemente (febrero 2020), la OCDE en conjunto con el apoyo financiero de la Unión Europea, Noruega y Suiza, desarrollaron un workshop¹⁹ sobre comercio internacional y economía circular, siendo el objetivo principal, entre otros, examinar las interrelaciones del comercio internacional y la economía circular. Dentro de los temas analizados en el taller figuraron: comercio de residuos y chatarra; comercio de bienes para reacondicionamiento y remanufactura y de segunda mano; estándares.

Lo anterior muestra el gran interés de la OCDE como de la Unión Europea en incentivar el desarrollo de economía circular.

Por su parte, importante señalar que existe el Comité de Economía Circular ISO/TC323 de la Organización Internacional de Normalización (ISO), donde se encuentran en desarrollo potenciales proyectos de normas relacionadas con esta materia.

¹⁷ OECD Workshop on International Trade and The Circular Economy, Summary Report, February 2020.

¹⁸ <http://www.basel.int/TheConvention/ConferenceoftheParties/ReportsandDecisions/tabid/3303/ctl/Download/mid/11506/Default.aspx?id=67&ObjID=22103>

¹⁹ OECD Workshop on International Trade and The Circular Economy, Summary Report, February 2020.



7 Comentarios Finales

- ✓ La minería en Chile representa una gran oportunidad para desarrollar un modelo de economía circular, siendo una opción válida de implementar a través de la minería secundaria a través de la reutilización de residuos mineros.
- ✓ En lo específico y a modo de ejemplo, Chile tiene potencial dado el gran volumen de relaves que ha manejado a nivel país, los cuales pueden ser analizados y estudiados a través de nuevos usos o bien, como fuente de recuperación de elementos de interés comercial.
- ✓ Conforme al análisis del presente informe y de acuerdo a diversos actores, se puede afirmar que existe un potencial geológico, sin embargo, no existe claridad sobre el tipo y cantidad de minerales presentes en los diversos residuos mineros presentes en el país.
- ✓ A su vez, existe suficiente evidencia de casos donde los residuos mineros han sido destinados a otros usos que, junto con reducir el riesgo medioambiental, han permitido encadenar el desarrollo de negocios a niveles locales y nacionales.
- ✓ Se evidenció un bajo conocimiento local sobre las actuales tecnologías de reconocimiento, tratamiento o re uso de los residuos mineros.
- ✓ De igual forma, se requiere la generación de un marco legal que permita el retratamiento y reutilización de residuos mineros, siendo esta la principal brecha identificada a la fecha.
- ✓ El empuje de la economía circular en los residuos mineros se sustenta por tendencias globales que apuntan a una producción limpia y sostenible de materias primas, siendo esta una discusión en los principales mercados destino de los minerales extraídos en Chile.
- ✓ Finalmente, importante señalar que existen diferentes iniciativas internacionales, como de la OCDE y de la Unión Europea, entre otras, las cuales buscan incentivar y potenciar el desarrollo de economía circular. Por su parte y en materia de estandarización, existe el Comité de Economía Circular ISO/TC323 de la ISO, donde se encuentran en desarrollo potenciales proyectos de normas relacionadas con esta materia.

8 Referencias

- Ahmari, Saeed, y Lianyang Zhang. 2012. «Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization.» *Construction and Building Materials* 323-331.
- Bian, Z., X. Miao, S. Lei, S. Chen, W. Wang, y S. Struthers. 2012. «The challenges of recycling mining and mineral processing wastes.» *Science* 337 (6095): 702-703.
- Cochilco (2020). *Mejores prácticas de gobernanza en materia de relaves*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- Cortes, C. 2009. *Evaluación del negocio del barro anódico en Codelco*. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Dirección de Empresas. Universidad de Chile.
- Chilepolimetálico (2021). *Diversificando la Minería Chilena*. Mapas estratégicos para la diversificación de la minería chilena. Cochilco, Alta Ley & Corfo.
- Eriksson, C., y A. Nyström. 2018. «Garpenberg mine—10 years of mining with paste backfill.» *Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings* 323-336.
- Fundación Chile. 2015. «Buenas Prácticas en la Gestión de la Estabilidad Química en la Industria Minera.» Santiago.
- Fundación Chile. 2015. «Remediación en la minería en Chile- avances y desafíos.» Santiago de Chile. <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/>
- Gorakhki, M. H., y C. A. Bareither. 2017. «Sustainable Reuse of Mine Tailings and Waste Rock as Water-Balance Covers.» *Minerals* 7 (7): 128.
- Gupta, R.C., Blessen Skariah Thomas, Prachi Gupta, Lintu Rajan, y Dayanand Thagriya. «An experimental study of clayey soil stabilized by copper slag.» *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 2012: 110-119.
- Kwong, Y. 2010. «Tailings decommissioning options at Mount Nansen, Yukon, Canada ©', in R Jewell & AB Fourie (eds), *Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste.*» Australian Centre for Geomechanics, 91-101.
- Lottermoser, B. G. 2011. «Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes.» *Elements* 7: 1112-1118.
- Matinde, E., G. S. Simate, y S. Ndlovu. 2018. «Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices.» *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 118| (8): 825-844.
- Mendez, M. O., y R. M. Maier. 2007. «Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology.» *Environmental health perspectives* 116 (3): 278-283



- Mesa de Cierre del Tranque Los Quillayes. 2015. *Mesa Quillayes*. 28 de Julio. Último acceso: 05 de Febrero de 2019. <http://www.mesaquillayes.cl/2015/07/fitoestabilizado-del-tranque-de-relaves-los-quillayes-un-proceso-participativo/>.
- Munshower, F. F. 1994. *Practical Handbook of Disturbed land Revegetation*. Boca Raton: Lewis Publishing.
- Nazer, A, et al 2012. «Baldosas de escorias de cobre, innovación en producción limpia.» *Iberoamerican Journal of Project Management*.
- Nazer, A, et al 2010. *Una revisión de los usos de las escorias de cobre*. Iberomet XI, X Conamet/SAM. Viña del Mar, Chile.
- Onuaguluchi, Obinna, y Özgür Eren. 2012. «Cement mixtures containing copper tailings as an additive: durability properties.» *Materials Research* 1029-1036.
- Onuaguluchi, Obinna, y Özgür Eren. 2012. «Copper tailings as potential additive in concrete: consistency, strength and toxic metal immobilization properties.» *NISCAIR-CSIR, India* 79-86.
- Qiu, Guohua, Zhongyang Luo, Zhenglun Shi, y Mingjiang Ni. 2011. «Utilization of Coal Gangue and Copper Tailings as Clay for Cement Clinker Calcination.» *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 1205-1210.
- Relaves con valor (2020). *Manuel de uso público: Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor D288-MAN-GN-P2-001*. JRI Ingeniería S.A. y EcoMetales Limited.
- Rodríguez, R., & García-Cortés, Á. (2006). *Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Romero, Alfonso A, y Silvana L. Flores. 2010. «Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas.» *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial* 75-82.
- Saxena, Mohini, y Lokesh Kumar Dhimole. 2006. «Utilization and value addition of copper tailing as an extender for development of paints.» *Journal of Hazardous Materials* 50-57.
- Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente. 2013. «Remoción ambiental sustentable de relaves urbanos en Andacollo.» <http://docplayer.es/34637014-Mma-remediacion-andacollo-27-09-13remocion-ambiental-sustentable-de-relaves-urbanos-en-andacollo.html>.
- Sernageomin (2018). *Definiciones y términos, DC-SEGMIN-00*.
- Sernageomin (2020). *Catastro de depósitos de relaves*, actualización 08-2020.
- The Eden Project. 2016. «The Eden Project Annual Report 2015/2016.» https://www.edenproject.com/sites/default/files/documents/eden-project-annual-report-2015-16_0.pdf.
- Tisch, B., J. Zink, y B. Vigneault. 2009. «Green Mines green energy: establishing productive land on mine tailings.»

- Tobar, P., y T. Venegas. 2014. «Fitoestabilización de depositos de relaves.» Santiago de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117542>.
- Tordoff, G. M., A. J. M. Baker, y A. J. Willis. 2000. «Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes.» *Chemosphere* 41: 219-228.
- Valderrama, L., Gonzalez, M., Santander, M., & Zazzali, B. (2018). *Recuperación de cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación. HOLOS, 5*, 40-50.
- Zhang, Changsen, Tingting Zhou, Qisheng Wu, Huajun Zhu, y Peng Xu. 2014. «Mechanical performance and Microstructures of Cement containing copper tailings.» *Asian Journal of Chemistry* 1371-1375.

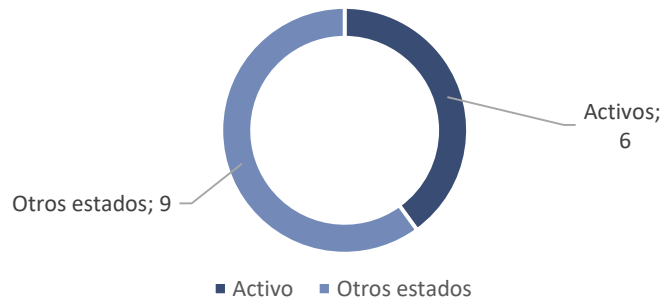


9 Anexos

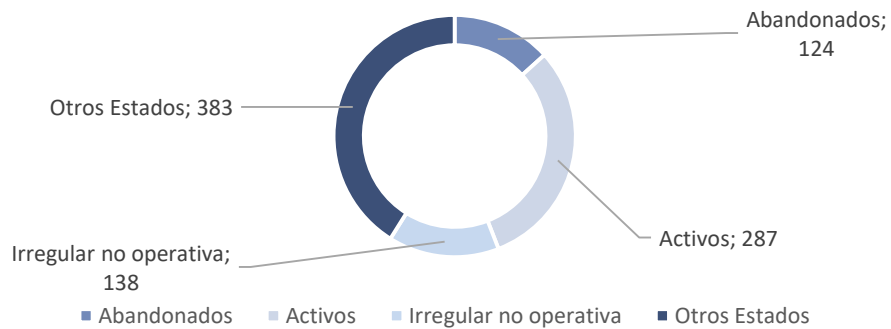
Anexo I: Residuos Mineros Masivos

A continuación se presenta un breve análisis de los estados de las distintas instalaciones.

Depósitos de Escorias



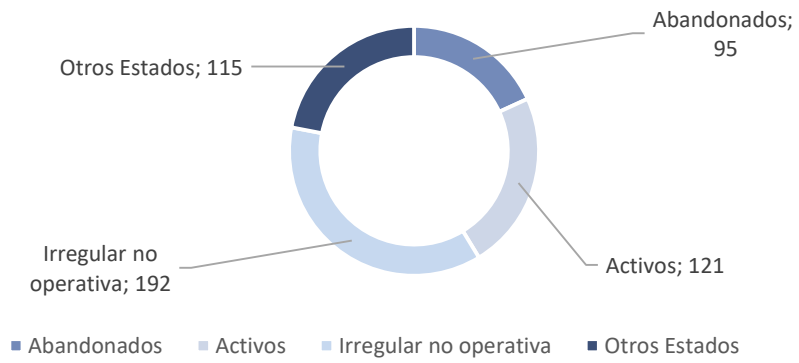
Depósitos de Estériles



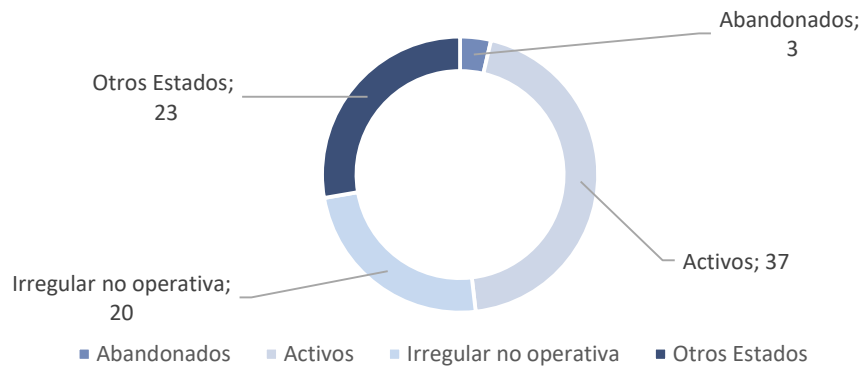
Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por Sernageomin, de manera referencial, puesto que el sistema y proceso que la administra se encuentra en proceso de actualización.



Mineral de Baja Ley



Ripios de Lixiviación



Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por Sernageomin, de manera referencial, puesto que el sistema y proceso que la administra se encuentra en proceso de actualización.



Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por

Vania Ramírez Jiménez

Analista de Estrategias y Políticas Públicas

Christian Sanhueza

Analista de Estrategias y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Septiembre/ 2021

