

RECICLADO DE MINERALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: UN ENFOQUE PRELIMINAR



Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)

Leandro PIRRAGLIA
Buenos Aires, MAYO 2024.

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director: Dr. Martín Ricardo Gozalvez

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA MINERA

Directora: Ing. Maggie Videla

DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICOS MINEROS

Director: Lic. Pablo E. Johanis

ES PROPIEDAD DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES - SEGEMAR
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN



Av. General Paz 5445 (Colectora provincia) 1650 - San Martín - Buenos Aires - República Argentina
Edificios 14 y 25 | (11) 5670-0100
www.segemar.gov.ar

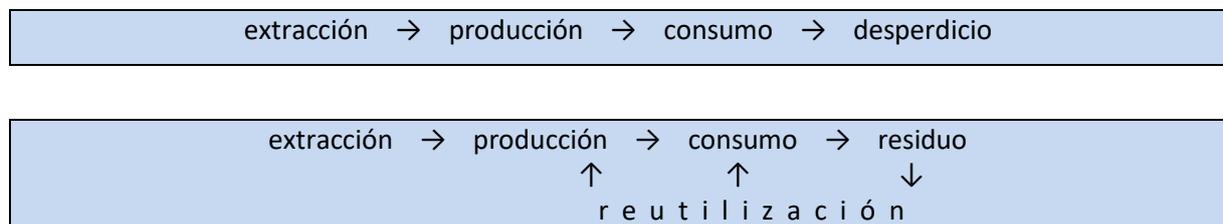
Contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. TIPOS DE RESIDUOS	4
2.1 Residuos sólidos	4
2.2 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	6
2.3 Pasivos ambientales mineros	10
3. ECONOMÍA CIRCULAR	11
4. CASOS E INVESTIGACIONES ILUSTRATIVAS SOBRE RECICLADO DE MINERALES	14
4.1 Aerogeles de amiloide proteico para la recuperación de Au de RAEE	14
4.2 Tecnologías para la recuperación de metales a partir de RAEE	15
4.3 Oportunidades y desafíos para el aprovechamiento de relaves	20
4.4 Recuperación de Au y Ag de escorias de fundición	23
4.5 Desarrollo tecnológico para la factibilidad del reprocesamiento de colas	24
4.6 Reminado para la obtención de minerales para la transición energética	24
5. CASOS DE RECICLADO DE METALES A PARTIR DE RAEE EN ARGENTINA	29
6. POLÍTICAS Y PLANES DE GESTIÓN PARA EL RECICLADO DE MINERALES	31
7. ROL DE LOS SERVICIOS GEOLÓGICOS	33
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
ANEXO 1. LISTADO DE PÁGINAS WEB DE REFERENCIA	37

1. Introducción

A lo largo de la historia, el ser humano ha explotado y empleado recursos minerales para propiciar el desarrollo de sus actividades. El incremento de la población y ocupación territorial, la aceleración en el ritmo de desarrollo económico y tecnológico determinaron un sostenido crecimiento de la demanda de minerales, potenciada aún más con la aparición y evolución de equipos eléctricos y electrónicos. Según las estimaciones para los próximos años, y en el marco de la transición energética, la demanda de recursos minerales no renovables representará un desafío para asegurar su disponibilidad.

Ante este panorama la sociedad actual puede adoptar distintas políticas y modelos económicos sustentables para realizar un cambio de paradigma y transformar el sistema lineal de producción en un sistema circular, donde los residuos puedan ser utilizados como recursos para reingresar al sistema productivo.



En otros casos, el enfoque puede estar puesto en la revalorización de un residuo para la extracción de metales críticos, sin que ello implique un plan de política de economía circular. Las nuevas condiciones del mercado y el desarrollo de una tecnología eficiente e innovadora pueden permitir la explotación de lo que hasta ese momento se consideraba un residuo, con implicancias favorables tanto desde el aspecto económico como socio-ambiental.

El objetivo de este informe es recopilar información bibliográfica sobre los procedimientos de reciclado de minerales, planes de gestión y políticas de economía circular que se están llevando a cabo principalmente en países desarrollados como enfoque preliminar para abordar la temática. Se realiza una breve definición y caracterización de los principales residuos relacionados con la minería y se visualizan los volúmenes y porcentajes de residuos generados en distintas partes del mundo. Luego, se plantean los principios de economía circular y se realiza una breve descripción de algunos casos piloto que se están desarrollando en el reciclado de minerales para distintos tipos de residuos. Finalmente, se plantean las oportunidades y desafíos que se deben traspasar como país y sociedad para que las políticas de economía circular puedan ser implementadas de manera exitosa en lo que respecta al remanido y la reutilización de residuos como fuente secundaria de recursos minerales.

2. TIPOS DE RESIDUOS

Existen residuos que directa o indirectamente están relacionados con la minería, cuya clasificación y ubicación son determinantes para sus administradores a la hora de plantear planes y programas de gestión para el reciclaje y la recuperación de minerales con valor económico.

2.1 Residuos sólidos

El término residuo sólido se encuentra ampliamente definido, caracterizado y estudiado por diferentes organismos internacionales y, si bien podría establecerse que tiene una implicancia subjetiva, en tanto que en última instancia es el propietario el que decide qué es considerado residuo, en este estudio se estableció que la definición más apropiada es la propuesta por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) que lo define como **“cualquier material descrito como tal en la legislación nacional, cualquier material que figura como residuo en las listas o tablas apropiadas, y en general cualquier material excedente o de desecho que ya no es útil ni necesario y que se destina al abandono”** (CEPAL 2016).

En el ámbito nacional, la ley que regula la gestión integral de los residuos domiciliarios es la Ley 25916 de Gestión de Residuos Domiciliarios. Dicha ley define como residuo domiciliario a **“aquellos elementos, objetos o sustancias que como consecuencia de los procesos de consumo y desarrollo de actividades humanas, son desechados y/o abandonados”**.

A nivel provincial, la Ley 13592 “Gestión integral de los residuos sólidos” de la Provincia de Buenos Aires en su artículo 2 define a los residuos sólidos urbanos como **“aquellos elementos, objetos o sustancias generados y desechados producto de actividades realizadas en los núcleos urbanos y rurales, comprendiendo aquellos cuyo origen sea doméstico, comercial, institucional, asistencial e industrial no especial asimilable a los residuos domiciliarios”**. Cabe mencionar que quedan excluidos de la ley aquellos residuos que se encuentran regulados por la Ley 11347 (residuos patogénicos, excepto los residuos tipo “A”), y Ley 11720 (residuos especiales), y los residuos radioactivos.

Palomino et al. (2021) publicaron un estudio denominado “Reutilización y reciclaje de residuos sólidos en economías emergentes en Latinoamérica: una revisión sistemática” en donde realizaron una investigación bibliográfica en diferentes revistas científicas sobre las políticas y acciones que se llevaron a cabo en América Latina en relación a la reutilización y reciclaje de residuos sólidos, durante los años 2019-2020. En dicha investigación se indicó que hasta el año 2020, las metrópolis del mundo generaban alrededor de 1300 millones de toneladas de desperdicios sólidos por lapso (1,2 kg /

habitante / día), estimándose además que el número ascenderá a 2200 millones toneladas (1,42 kg / habitante / día) para el 2025. Particularmente en América Latina y Caribe (ALC) el promedio per cápita de desperdicios sólidos domiciliarios para el 2020 era de 0,6 kg / habitante / día y desperdicios sólidos urbanos de 0,9 kg / habitante / día, representando el 12 % de la generación mundial de residuos municipales, es decir 160 millones de toneladas (Palomino et al. 2021).

Otro aspecto a destacar es que los tipos de residuos generados en ALC siguen un patrón general en cuanto al orden abundancia observándose una preponderancia de los residuos orgánicos, seguidos por papeles y plásticos, en tanto que los vidrios y metales se encuentran en menores cantidades. Sin embargo, existe una relación entre el nivel de ingresos de la población y la generación de residuos, observándose un aumento en los porcentajes de metales y plásticos con el incremento de los ingresos; por el contrario, existe una relación inversamente proporcional entre la generación de residuos orgánicos y el nivel de ingresos: un nivel de ingresos bajo y medio-bajo se correlaciona con un aumento en la generación de residuos orgánicos (UNEP, 2018).

En referencia a los estudios de caso sobre políticas y planes de manejo en la reutilización y reciclaje, se puede indicar que, si bien existen algunas iniciativas específicas, en general en los países de Latinoamérica predomina la compra y venta de residuos, no clasificados previamente y donde el procedimiento se realiza de manera informal, observándose una relación directa entre la producción (medido a partir del producto bruto interno -PBI-) y la generación de residuos sólidos, una tendencia común dentro los países subdesarrollados. Esta relación puede determinar los niveles de eficiencia productiva que pueden tener diferentes países; por ejemplo, cuando un país tiene una producción significativa pero la generación de sus residuos es mínima, los recursos se están utilizando de manera óptima. Por el contrario, una baja producción con una alta generación de residuos es un indicador de prácticas ineficientes (Palomino et al. 2021). En otros casos, la informalidad y desinformación en relación al manejo de los residuos sólidos conlleva a una falta de organización en la realización del trabajo, lo que puede provocar tanto un mayor riesgo para la salud de los trabajadores como así también un mayor daño ambiental en relación a la no acción.

Para realizar una proyección entre los años 2015-2070 de la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) de los países de ALC (Fig. 1), se utilizó el dato de volumen de generación de RSU para el año 2014 y se le aplicó la tasa de la población de la región, obteniéndose así la proyección estimada hasta el año 2070 (UNEP 2018). Se proyecta un crecimiento geométrico de la producción de residuos desde 541 kt/día en 2014 hasta 670 kt/día en 2070, con un incremento de más del 25 % en el período.

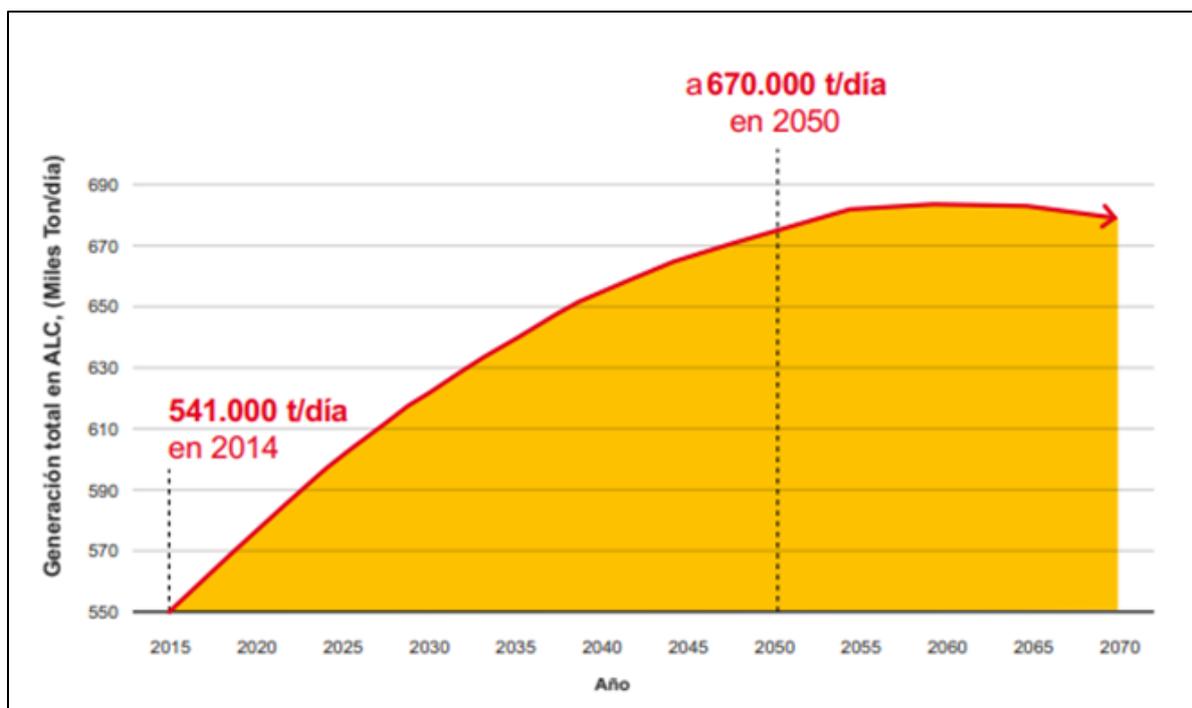


Figura 1. Proyección de la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en países de América Latina y Caribe (ALC) para los años 2015-2070 (Modificado de UNEP, 2018).

2.2 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)

A nivel mundial se considera que los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) son **“todos aquellos aparatos que para su funcionamiento necesitan ser enchufados o utilizan una fuente de alimentación de pilas o baterías”** (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación [MAyDS] 2020). Cuando dichos aparatos son desechados, ya sea por agotamiento de su vida útil o por innovación tecnológica, se convierten en un residuo denominado **“residuo de aparatos eléctricos y electrónicos” (RAEE)**. Incluyen al conjunto de residuos o descartes de los aparatos, equipos, dispositivos eléctricos y electrónicos, así como sus materiales, componentes, consumibles y subconjuntos que forman parte de los mismos. En otras palabras, un RAEE es un AEE cuyo poseedor tiene la intención u obligación de desprenderse de él (Protomastro 2013).

Si bien los AEE comprenden una alta variedad de productos, a los efectos estadísticos se clasifican por funciones semejantes, compuestos materiales comparables, pesos medios y atributos similares al final de su vida útil. De esta manera quedan divididos en 54 categorías centradas en los productos, las cuales, a su vez, se agrupan en 6 categorías generales estrechamente relacionadas con las características de gestión de sus residuos. Dichos grupos (Cuadro 1) (Forti *et al.*, 2020) son los siguientes:

▶ aparatos de intercambio de temperatura
(refrigeradores, congeladores, aparatos de aire acondicionado y bombas de calor)
▶ pantallas y monitores
(televisores, ordenadores portátiles y miniportátiles y tabletas)
▶ lámparas
(fluorescentes, de descarga de alta intensidad y LED)
▶ grandes aparatos
(lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas eléctricas, impresoras grandes, fotocopiadoras y paneles fotovoltaicos)
▶ pequeños aparatos
(aspiradoras, microondas, tostadoras, hervidores eléctricos, afeitadoras eléctricas, básculas, calculadoras, aparatos de radio, videocámaras, juguetes eléctricos, pequeñas herramientas eléctricas y electrónicas, pequeños dispositivos médicos y pequeños instrumentos de supervisión y control)
▶ aparatos de informática y telecomunicaciones pequeños
(teléfonos, teléfonos móviles, GPS, calculadoras de bolsillo, computadoras personales e impresoras)

Cuadro 1. Tipos de RAEE (Forti et al. 2020)

El avance tecnológico desarrollado en la última década y el consumo masivo motivado por la publicidad, la moda y el status ha generado que el volumen de estos residuos aumente considerablemente. En el mundo se generaron 56 millones de toneladas de RAEE durante el 2019, equivalente a 7,3 kg anuales por habitante, observándose un aumento del 21 % desde el 2014 y, de no tomarse medidas, se estima que habrá un crecimiento del 56 % para el 2030, alcanzando los 74 millones de toneladas. Además, si se realiza un desglose por continentes, se observa que durante el 2019 Asia fue el que más RAEE generó con 24,9 Mt, pero América del Norte y Europa fueron los que tuvieron mayor generación por habitante (20,9 kg / habitante y 16,2 kg / habitante, respectivamente). Por otro lado, los números para América del Sur son mucho menores, observándose una generación de 9,1 kg /habitante. Específicamente Argentina se encuentra por encima del promedio de América del Sur pero bastante por debajo de América del Norte y Europa: si se considera el consumo de distintos aparatos eléctricos y electrónicos y se estima la vida útil de los mismos, se calculó que para el 2019 en nuestro país se generaron 465 mil toneladas de RAEE por año, arrojando un número de 10,3 kg / habitante y observándose un aumento de un 25 % en relación a lo generado en 2017 (MAyDS 2020).

Según datos oficiales, de los 56 Mt de residuos de RAEE generados a nivel mundial en 2019, 9,3 Mt han sido recogidos y reciclados de manera adecuada, es decir sólo el 17,4 %. Sin embargo, la mayor parte de ese porcentaje proviene de las políticas y acciones ejecutadas por los países europeos, que

si bien son quienes más residuos de RAEE generan (12 Mt) en correspondencia con sus mayores ingresos, casi la mitad de ellos (42,5 %) se encuentran documentados como recogidos y reciclados adecuadamente. En contraposición, la generación de residuos de África es de 2,9 Mt pero sólo un 0,9 % de ellos son gestionados oficialmente (Fig. 2) (Forti *et al.* 2020).

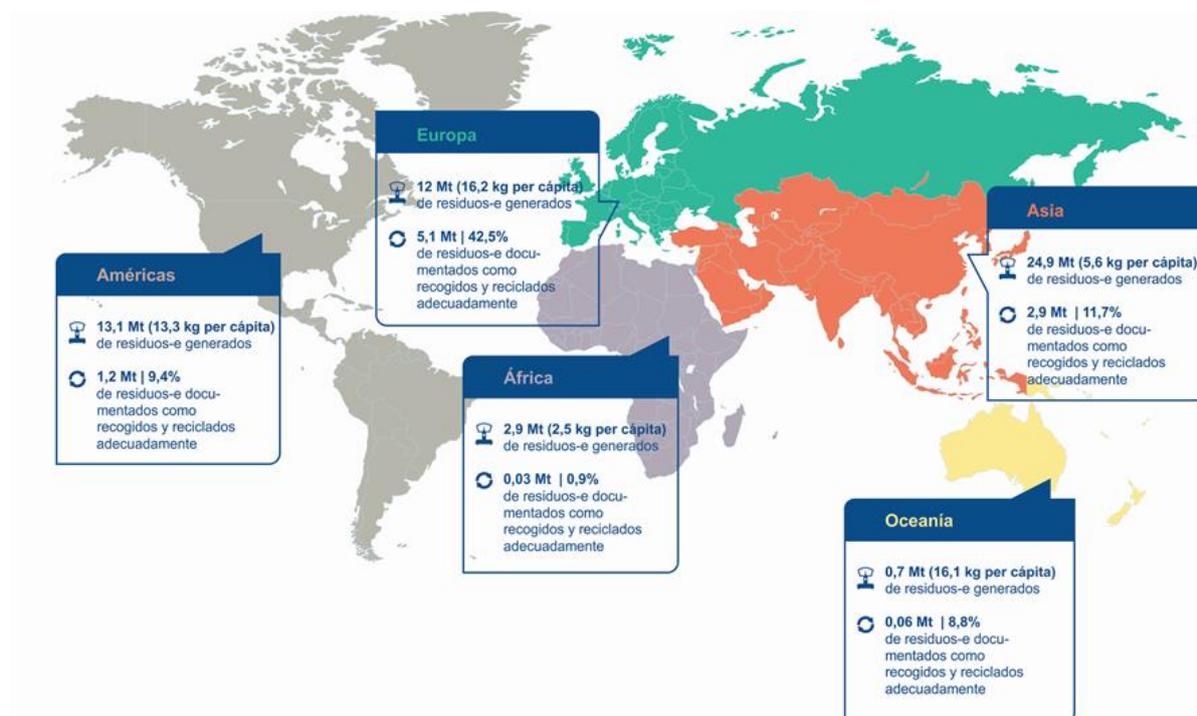


Figura 2. Distribución mundial de residuos de RAEE generados y tratados adecuadamente (Modificado de Forti *et al.* 2020).

Además de la generación y gestión de residuos en cada uno de los países/continentes, existe un movimiento transfronterizo de RAEE, calculándose que hasta un 20 % de ellos se mueve entre países. En general, este movimiento se produce desde los países desarrollados hacia países en desarrollo para su disposición final, frecuentemente través de exportaciones ilegales. En muchos casos, esos RAEE se trasladan como aparatos para reparación o reutilización con el objetivo de sortear la complejidad legal que entraña la exportación de residuos peligrosos. Pero, aunque fueran realmente aparatos con posibilidad de repararse o reutilizarse, y no una estrategia para evitar los costos del tratamiento adecuado del residuo, lo que ocurre en la práctica es que una parte de los aparatos se convierte en RAEE en el camino (por ejemplo, por roturas en el transporte) o agota su vida útil muy poco tiempo después de llegar al país de destino.

Si bien la mayoría de las exportaciones de RAEE se producen en sentido norte-sur (desde países desarrollados hacia países en desarrollo), en los últimos años se ha generado un crecimiento de las

exportaciones en sentido inverso. Esto se debe a que los materiales valiosos como las plaquetas de equipos informáticos entre otros, se exportan de los países en desarrollo a países desarrollados para su reciclaje, ya que cuentan con planes de adecuados para poder gestionarlos; de esta forma se replica la dinámica extractiva de la minería: el material valioso que se exportó como materia prima virgen vuelve a exportarse como material para recuperación (MAyDS 2020).

Al realizar una discriminación de los tipos de residuos de RAEE generados y sus abundancias para el año 2019 (Fig. 3), predomina la presencia de pequeños aparatos, seguido por los grandes aparatos y en tercer lugar aparecen los aparatos de intercambio de temperatura. En comparación a los residuos generados durante el año 2014 hubo un incremento en la abundancia de casi todos los tipos de residuos de RAEE, con la excepción de las pantallas y monitores que han disminuido su abundancia en un 1 % y observándose, además, un crecimiento a un ritmo más lento para el caso de los aparatos de informática y telecomunicaciones pequeños. Esto se puede explicar por el hecho que los aparatos de pantallas y monitores se han ido sustituyendo por pantallas planas mas ligeras, dando lugar a una disminución del peso total a pesar de que el número de piezas totales ha seguido aumentando (Forti *et al.* 2020).

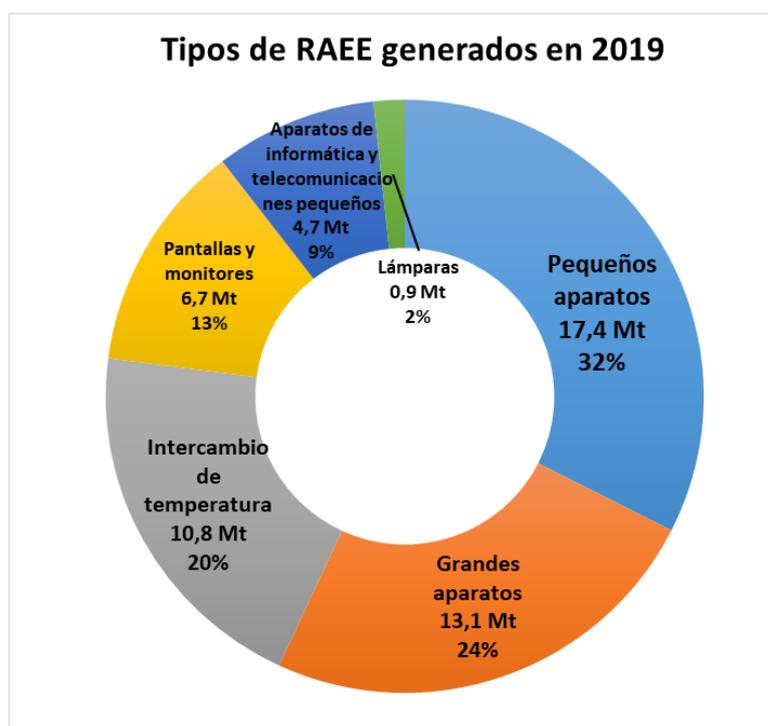


Figura 3. Discriminación de los tipos de RAEE generados durante 2019 (Forti *et al.* 2020)

Los volúmenes de RAEE generados por año a nivel mundial y las proyecciones a futuro muestran la necesidad imperante de elaborar un modelo de producción y consumo sustentable y políticas de

gestión de residuos y de economía circular donde los AEE cumplan un rol clave dentro de dichos planes de gestión, de manera tal de limitar la explotación primaria de recursos no renovables y así garantizar la provisión de recursos naturales para las generaciones futuras.

2.3 Pasivos ambientales mineros

Si bien cada uno de los países y regiones utilizan diferentes definiciones para el término de pasivos ambientales mineros (PAMs), en este informe se utilizará aquella aceptada por la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI) en el acta de acuerdos Santa Cruz del año 2008 y publicada por el Grupo de Expertos de Pasivos Ambientales Mineros en el Manual para el Inventario de Minas Abandonadas o Paralizadas, en donde se define a los PAMs de la siguiente manera: **“son aquellos elementos tales como: instalaciones, edificaciones, labores abiertas o subterráneas, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres, parques de maquinaria o parques de mineral que, estando en la actualidad en entornos de minería abandonada o inactiva, constituyen un riesgo potencial permanente para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente”** (ASGMI 2020).

Según lo establece su definición, los PAMs abarcan todo tipo de instalaciones que constituyan un riesgo potencial para la salud humana, la biodiversidad y el ambiente. Sin embargo, y considerando los objetivos de este informe, se destacan los depósitos de residuos mineros que pueden tener algún tipo de valor económico a través de la aplicación de nuevas técnicas que permitan el reprocesamiento de su material (Cuadro 2):

<p>► Escoria</p>
<p>Masa vítrea de baja densidad resultante de los procesos de fundición y refinación de metales, que contiene la mayor parte de las impurezas de la materia prima</p>
<p>► Dique de colas o depósito de relaves</p>
<p>Toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves (colas) provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales. Además, contempla sus obras anexas. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente definitivo, de los materiales sólidos provenientes del relave transportado desde la Planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos</p>
<p>► Colas o relaves</p>
<p>Desecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo</p>

Cuadro 2. Pasivos ambientales mineros potencialmente reminables (ASGMI 2022)

Se estima que, por cada tonelada de metal extraído de los minerales, se remueven entre 2 y 12 toneladas de material de sobrecarga. En Chile se producen 1,6 millones de toneladas de colas por día. En Sudáfrica existen alrededor de 17,7 millones de toneladas de colas de la minería de oro. En China se estima que unas 33.000 hectáreas de tierra han sido afectadas por actividades mineras, de las cuales el 13 % corresponde a diques de colas. En 2012 se informó un total de 52.532 de minas abandonadas en Australia, aunque se estima que el número real puede ser mayor por falta de información relevada. En la Unión Europea se han almacenado más de 1200 millones de toneladas de residuos de colas. A nivel mundial se estima que existen alrededor de 8.500 instalaciones de almacenamiento de colas activas, inactivas y cerradas. Utilizando su estimación del volumen de colas en las instalaciones listadas en divulgaciones públicas y extrapolando a 8.500 instalaciones totales, aproximadamente 217 mil millones de m³ de colas se encuentran almacenados globalmente.

Los números de los residuos de colas generados producto de la actividad minera indican la importancia de desarrollar en lo inmediato nuevas tecnologías que permitan el reprocesamiento de las colas, abordando la gestión desde el inicio de las actividades de extracción e implementando políticas de economía circular con el objetivo de generar cadenas de valor a nivel local y regional para el desarrollo de corrientes secundarias (subproductos).

3. ECONOMÍA CIRCULAR

El ritmo acelerado de crecimiento poblacional y la gran demanda de recursos naturales para el desarrollo tecnológico a nivel mundial, ha generado que, desde hace unas décadas, en principio los países más desarrollados y luego todos los países del mundo, pusieran el foco en modificar el sistema económico industrial dominante por uno más sustentable con el ambiente. Es a partir de allí que los distintos estados se preocuparon en discutir nuevas ideas y surgió así el concepto de economía circular.

La economía circular se define como un nuevo paradigma que busca modificar la forma de producción y consumo, cuya premisa es que los residuos dejen de ser catalogados como tales para poder ser identificados como recursos e ingresar nuevamente al sistema de producción, promoviendo un flujo constante. Esto provoca múltiples beneficios: por un lado, se reduce el volumen de residuos generados y, por otro lado, se reduce la extracción de recursos naturales no renovables. Además, durante los procesos de reciclado se identifica una marcada disminución de la huella de carbono,

como así también menores valores en los consumos de agua.

La economía circular implica abandonar el modelo actual de economía lineal en donde los recursos se extraen, se convierten en productos, se utilizan o se consumen y finalmente se desechan, por un modelo donde los productos y materiales se mantienen en circulación durante el mayor tiempo posible ya que estos se diseñan para que sean más duraderos y se puedan volver a utilizar, reparar y reciclar. De esta manera, el concepto de economía circular incluye principios de enfoques del ciclo de vida y “de la cuna a la cuna” (*cradle to cradle*) donde los residuos son considerados como “alimentos” para nuevos productos y procesos, y se sustenta en la transición hacia fuentes de energía renovables (Schröder *et al.* 2020).

La transformación que será necesaria realizar para pasar de un modelo lineal a un modelo de economía circular (Fig. 4) implica, dentro de la cadena de producción, optimizar el rendimiento de los

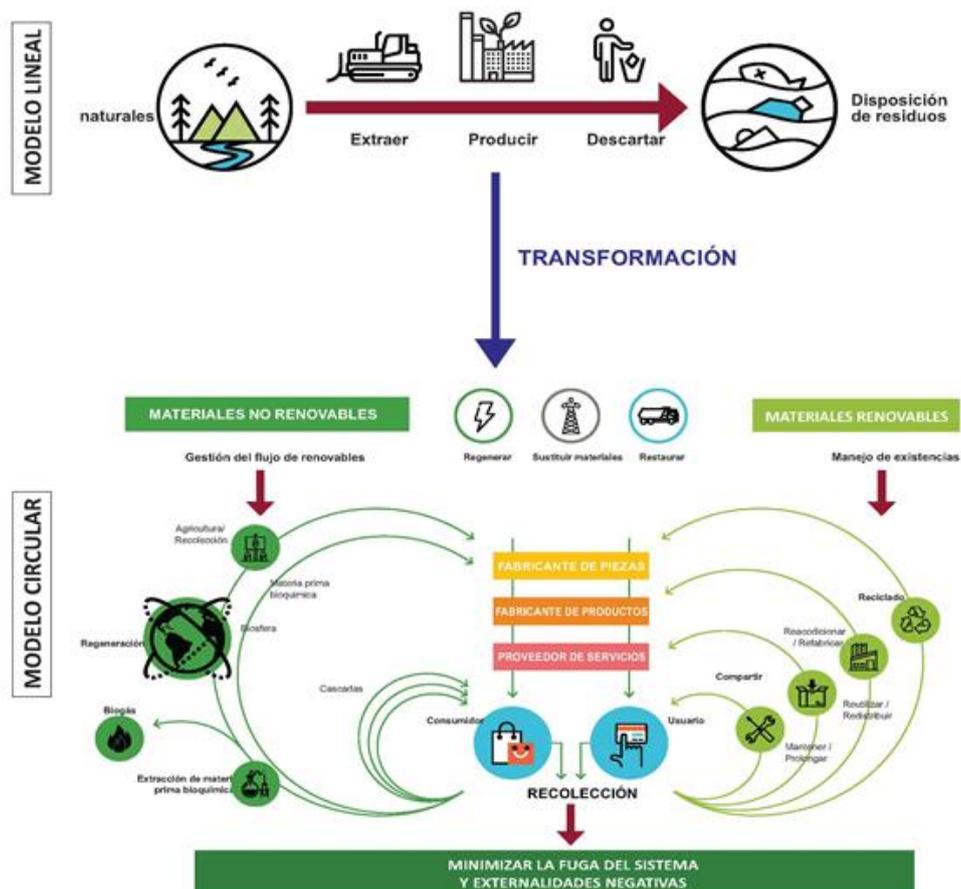


Figura 4. Principios para la transformación de una gestión de residuos de una economía lineal a la gestión de recursos para lograr una economía circular (modificado de UNEP 2018).

recursos mediante la circulación de los productos, componentes y materiales en uso con máxima utilidad en todo momento en los ciclos técnicos y biológicos, es decir se busca regenerar, compartir, optimizar. Finalmente, y como parte del proceso de recolección, se debe fomentar la eficacia del sistema mediante la revelación y la identificación de externalidades negativas (UNEP, 2018).

El esquema propuesto para una economía circular del proceso económico-productivo para los recursos minerales podría iniciarse en la extracción de recursos que se transforman en materias primas que son utilizadas en la producción de bienes, los cuales son consumidos por actores públicos y privados, generando residuos que son recolectados, tratados, reciclados y dispuestos al uso. El proceso de reciclado y tratamiento genera nuevos insumos para retroalimentar el sistema como nuevas materias primas, mejoramiento de suelos o generación de energía eléctrica o calor, favoreciendo de esta manera la conformación de un ciclo económico-productivo cerrado. Algunas etapas del ciclo de tratamiento de residuos son fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y representan el 3 % de la emisión total de GEI en todo el planeta (UNEP, 2018).

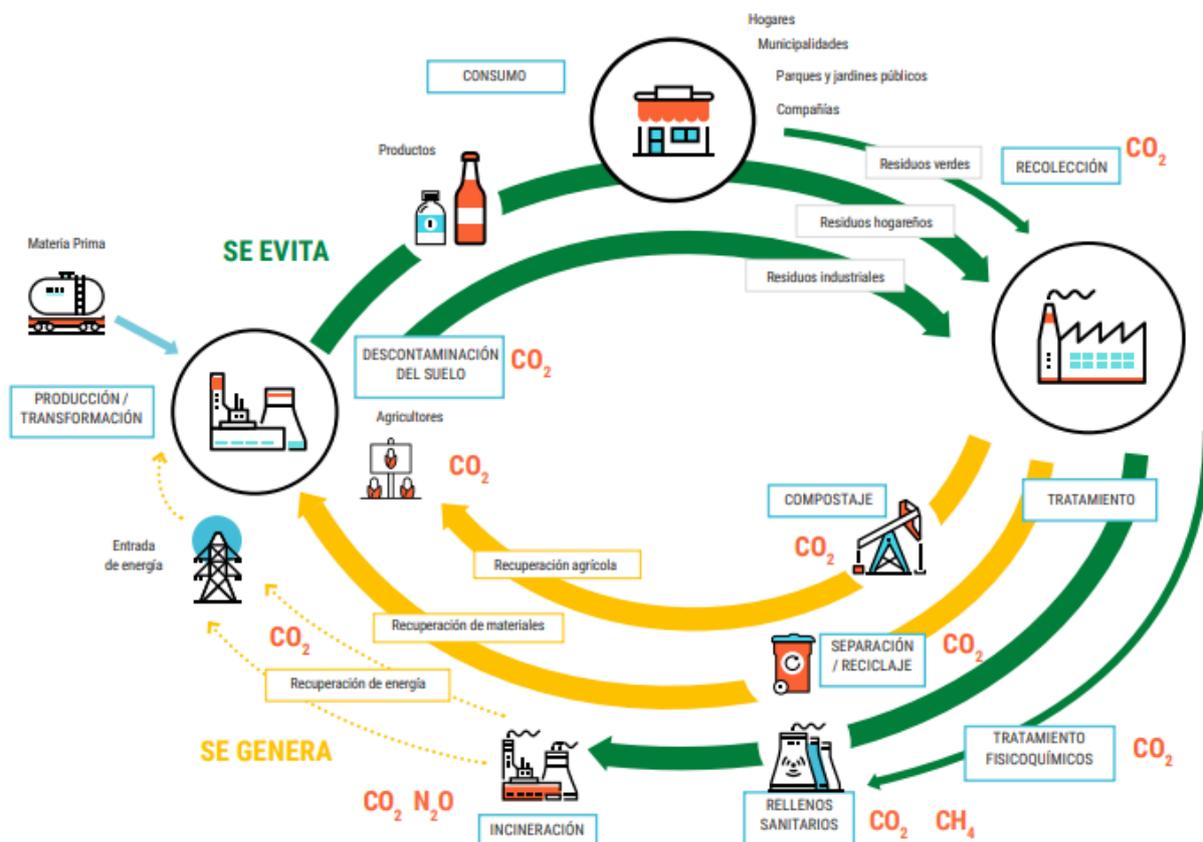


Figura 5. Etapas de un proceso económico circular (modificado de UNEP, 2018).

4. CASOS E INVESTIGACIONES ILUSTRATIVAS SOBRE RECICLADO DE MINERALES

4.1 Aerogeles de amiloide proteico para la recuperación de Au de RAEE

La publicación "Gold Recovery from E-Waste by Food-Waste Amyloid Aerogels" (Peydayesh et al., 2024) presenta un innovador método para recuperar oro de residuos electrónicos utilizando nanofibrilas de amiloide proteico derivadas del suero de leche. Este estudio, realizado por investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Zürich, Suiza, destaca la eficacia y economía de esta técnica en comparación con los métodos convencionales que emplean carbón activado. El proyecto no solo aborda la recuperación de oro de residuos electrónicos, sino que también integra los conceptos de sustentabilidad y economía circular al utilizar residuos sólidos urbanos para este fin, lo que reduce el volumen de desechos y promueve la recircularidad de los productos.

Para obtener los aerogeles de amiloide proteico, se crearon condiciones de una solución ácida y de alta temperatura, lo que permitió que la proteína de suero en leche formara estructuras de fibras alargadas del amiloide proteico. Estos aerogeles demostraron una alta eficiencia y selectividad en la adsorción de oro, logrando una reducción del 93,3 % en la concentración inicial de oro en las muestras. Además, pudieron convertir los iones de oro en nanopartículas y escamas cristalinas (Fig. 6).

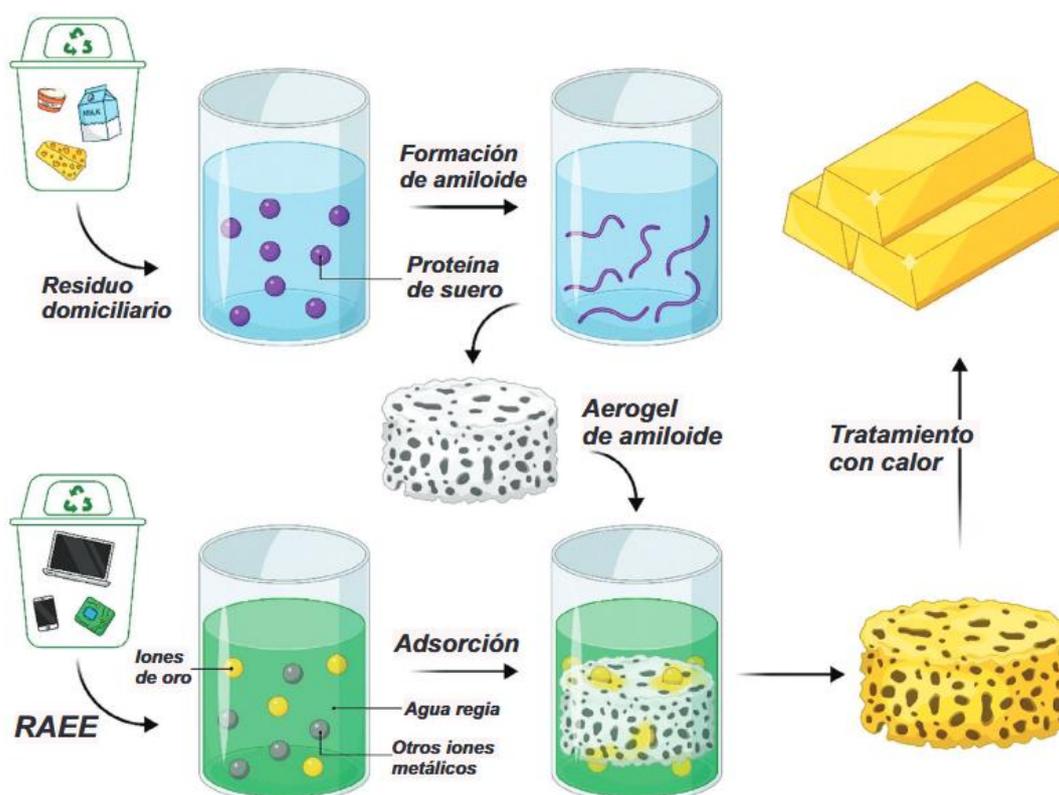


Figura 6. Liberación de Au a partir de aerogel de amiloide proteico (Predayesh et. al. 2024)

En pruebas adicionales, los aerogeles mostraron una eficacia del 66,8 % en la recuperación de oro de soluciones derivadas de residuos electrónicos, incluso cuando la concentración inicial de oro era significativamente menor que la de otros metales presentes. Las eficiencias de remoción para otros metales fueron del 0 % para Cu, 3.9 % para Ni, 0 % para Pb, 3.5 % para Zn, 6.6 % para Cr, 9 % para Fe y 1.9 % para Mn, lo que evidencia la selectividad del aerogel hacia el oro.

Las diferencias observadas en la adsorción de metales entre la solución de metales preparada con cantidades uniformes y las soluciones de residuos electrónicos se debieron a dos factores principales. Primero, las concentraciones de metales en las soluciones variaron, mientras que en la mezcla sintética estaban uniformemente presentes. Segundo, las interacciones químicas variadas entre los metales, los contraiones y otros solutos presentes en las soluciones de residuos electrónicos modificaron las condiciones de adsorción.

El tratamiento térmico posterior permitió la recuperación de pepitas de oro de alta pureza, con un contenido de oro del 90,8 % en peso, confiriendo viabilidad económica al proceso. Se determinó que el costo asociado para la recuperación de 1 gramo de oro era solo el 2,2 % del costo total de venta, lo que resalta su rentabilidad.

En cuanto a los impactos ambientales, se observó una disminución significativa en la eutrofización de agua dulce y el uso de combustibles fósiles en comparación con el uso de carbón activado. Sin embargo, se identificó un posible mayor daño a los ecosistemas debido al uso de proteína de suero animal, aunque este riesgo podría mitigarse utilizando proteína vegetal.

En resumen, este estudio destaca el potencial de los aerogeles de amiloide proteico derivados de subproductos alimenticios para la recuperación eficiente y sostenible de oro de residuos electrónicos, lo que contribuye a los principios de la economía circular y la gestión responsable de recursos.

4.2 Tecnologías para la recuperación de metales a partir de RAEE

La publicación “Recovery of rare and precious metals from urban mines—A review” (Wang *et al.* 2017) efectuada por investigadores de la Universidad de Tsinghua (Beijing) explica y evalúa las ventajas y desventajas de distintas tecnologías para la recuperación de metales raros y preciosos, que incluyen procesos convencionales (procesamiento pirometalúrgico, hidrometalúrgico y biometalúrgico) y otros innovadores (procesamiento electroquímico, fluido supercrítico, mecanoquímico y de líquidos iónicos).

Proporciona una clasificación de minerales (Cuadro 3) que agrupa metales por sus características físico-químicas de relevancia en cuanto a las tecnologías de recuperación aplicables a RAEE.

Categoría	Metales	Características
Metales preciosos	Au, Ag, Grupo de Pt (Pt, Pd, Rh, Os, Ir, Ru)	Bajo contenido en la naturaleza, alto precio; la mayoría se recupera a partir de subproductos.
Metales raros livianos	Li, Rb, Cs, Be	Baja gravedad específica y alta actividad química
Metales raros y refractarios	Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W	Punto de fusión más alto, generalmente obtenido por reducción de compuestos.
Metales raros y dispersos	Ga, In, Tl, Ge, Re, Se, Te	Bajo contenido en la naturaleza; la mayoría está contenido en otros minerales; debe ser recuperado de subproductos.
Metales de tierras raras	Sc, Y, Lantánidos	Similares en características químicas; asociados con otros metales en minerales de origen natural.
Metales raros radioactivos	Fr, Ra, Po, Actínidos	Radioactivos; a menudo asociados con metales de tierras raras en minerales de origen natural.

Cuadro 3. Clasificación y características de los metales raros y preciosos (Wang et al. 2017).

Los procesos de separación de metales de los componentes no metálicos suelen combinar dos o más técnicas para aumentar la eficacia. Las **tecnologías mecánicas / físicas** son las que primero se emplean en la separación de metales raros y preciosos de los componentes no metálicos en RAEE, como proceso de pretratamiento. Estas tecnologías incluyen el desagregado manual, trituración, clasificación y métodos de procesamiento similares. En la aplicación práctica, las tecnologías mecánicas / físicas pueden enriquecer efectivamente los metales raros y preciosos de muchas fuentes residuales para mejorar sus tasas de recuperación. Otra ventaja de este método es que causa menos contaminación secundaria durante el proceso de reciclaje.

La **tecnología pirometalúrgica** se refiere al tratamiento de varios residuos que contienen metales raros y preciosos en condiciones de alta temperatura y su reciclaje a través de reacciones químicas a alta temperatura. Es difícil recuperarlos directamente debido a su alta dispersión y baja concentración, y porque están mezclados con varios tipos de componentes no metálicos y otros metales base. Sin embargo, la extracción se puede lograr utilizando diferentes tecnologías de recuperación a alta temperatura para las diversas características de dispersión de los metales en los materiales de residuo. La incineración es seguida por otros procesos de refinación para extraer los metales puros. Actualmente, esta tecnología se utiliza principalmente para enriquecer y recuperar Au, Ag, Pt, Pd, Rh, In y Co de residuos electrónicos y convertidores catalíticos gastados de automóviles. El procesamiento pirometalúrgico para la recuperación de metales raros y preciosos incluye principalmente métodos de

incineración a alta temperatura (se refiere a la quema de residuos en un incinerador, donde los componentes no metálicos inflamables se convierten en valor calorífico recuperable después de la incineración, y los metales preciosos recuperables se enriquecen en los residuos desechados); reducción carbonotérmica al vacío (proceso de reducir los óxidos de metales raros y preciosos a metales con agentes reductores bajo condiciones de alta temperatura); y volatilización por cloración (método que consiste en calentar materiales crudos que contienen metales raros y preciosos y agentes de cloración juntos, luego clorar los metales para generar cloruros volátiles atrapados en hollín y loción; y finalmente se aplica un proceso hidrometalúrgico para la recuperación del metal). En resumen, el proceso pirometalúrgico es un buen método de preconcentración para metales raros y preciosos dispersos en materiales de residuo, y otros procesos de refinación posteriores pueden incluirse para una mayor recuperación de metal. El proceso es simple, tiene una gran capacidad y un amplio rango de aplicaciones, y también permite que el valor calorífico de los componentes no metálicos de las minas urbanas se recicle, y por ello esta tecnología ha estado en práctica durante años. Sin embargo, es propensa a producir una serie de problemas ambientales, como la emisión de compuestos orgánicos volátiles dañinos y humo tóxico, debido a la presencia de retardantes de llama halogenados y, además, tiene una selección deficiente en el reciclaje.

La **tecnología biometalúrgica** ha sido desarrollada en la última década como una técnica alternativa para recuperar metales raros y preciosos de minerales urbanos de muy baja ley. Esta tecnología incluye dos enfoques principales: biolixiviación y biosorción.

La **biolixiviación** se refiere al uso de microorganismos específicos, bacterias, hongos, algas o sus metabolitos para interactuar con metales a través de reacciones de oxidación-reducción microbianas y metálicas. Si bien la biolixiviación se ha aplicado para la recuperación de metales raros y preciosos de placas de circuito impreso y catalizadores de residuos y baterías de litio gastadas la eficiencia de recuperación es relativamente pequeña en comparación con la lixiviación hidrometalúrgica. Además, la mayoría de las aplicaciones de este método aún se encuentran a escala de laboratorio.

La **biosorción** se refiere a la sorción pasiva y/o complejación de iones de metales raros y preciosos por materiales biológicos. Los mecanismos de biosorción se basan en interacciones fisicoquímicas entre iones de metales y los grupos funcionales presentes en la superficie del material biológico, como la complejación, el intercambio iónico y la quelación de iones metálicos o interacciones electrostáticas. Se han desarrollado biosorbentes, incluidos diversos microorganismos, algas, bacterias, levaduras, hongos e incluso materiales de desecho biológico, para acumular metales de manera eficiente. La biosorción pertenece a un proceso de purificación posterior después de la lixiviación de metales raros y preciosos, y es una opción de bajo costo para la recuperación de iones de metales de una fase

acuosa. El proceso basado en biosorción ofrece muchas ventajas en comparación con los métodos convencionales utilizados: bajo costo operativo, minimización del volumen de lodos químicos y/o biológicos a manipular, y alta eficiencia en la desintoxicación de efluentes.

En resumen, como proceso de pretratamiento, la tecnología mecánica o física es necesaria para todos los desechos electrónicos, ya que puede enriquecer efectivamente los metales raros y preciosos para una posterior lixiviación de metal. La tecnología pirometalúrgica es simple, tiene una gran capacidad y amplio rango de aplicaciones por lo que ha sido aplicada para la recuperación efectiva de metales de residuos durante años. En comparación con la pirometalurgia, la hidrometalurgia es fácil de operar y ha mostrado altas tasas de recuperación de metal y es una tecnología que se aplica después del enriquecimiento de fusión a alta temperatura. Los procesos biometalúrgicos son el método más respetuoso con el medio ambiente en comparación con las técnicas anteriores, porque no se generan aguas residuales ni gases tóxicos. Sin embargo, las bajas tasas de lixiviación y los largos tiempos de operación limitan su aplicación. Por lo tanto, se requieren dos o tres métodos para la recuperación de metales con altas tasas de recuperación y baja contaminación.

Además de las tecnologías tradicionales mencionadas anteriormente, se están desarrollando nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y la rentabilidad económica en los procesos de recuperación de metales, dentro de las cuales se destacan: la tecnología electroquímica, la tecnología de fluidos supercríticos, la tecnología de líquidos iónicos y la tecnología mecanoquímica.

La **tecnología electroquímica** es esencialmente una deformación de la hidrometalurgia. Los esquemas de recuperación de metales raros y preciosos basados en electroquímica podrían describirse como sigue: (1) generación anódica de oxidantes para acelerar la disolución de metales de materiales sólidos o (2) electroganancia catódica de metales lixiviados para separación y recuperación. Con la consideración adecuada, los dos procesos pueden realizarse en una sola celda.

La **tecnología de fluidos supercríticos** se ha introducido como un método amigable con el medio ambiente para descomponer polímeros orgánicos y reciclar metales raros y preciosos. Este método tiene ventajas como baja viscosidad, alto coeficiente de transporte de masa, alta difusividad y alta solubilidad de orgánicos. El proceso de fluidos supercríticos se refiere a los fluidos utilizados; donde la temperatura y la presión se aumentan hasta el punto supercrítico. En las cercanías del punto crítico, las propiedades físicas (densidad, viscosidad, solubilidad, capacidad calorífica, constante dieléctrica, etc.) del fluido cambian abruptamente. La interfaz entre el líquido y el gas desaparecerá y el fluido se

convertirá en gas no condensable. El fluido supercrítico es suficiente para la degradación de polímeros no metálicos y la recuperación de metales en minas urbanas, bajo las características del fluido cuando está cerca del punto supercrítico. La tecnología de fluidos supercríticos ha mostrado una vasta superioridad tecnológica y aplicación potencial en la degradación de polímeros y la desintoxicación de contaminantes halogenados. Sin embargo, en el campo de la recuperación de metales raros y preciosos, ésta tecnología todavía está limitada por algunas desventajas técnicas como la necesidad de una inversión económica alta, especialmente para el equipo, y la tendencia a la depositación de los metales a recuperar en la pared de tuberías metálicas.

La **mecanoquímica**, comúnmente conocida como molienda de bolas, se refiere al estudio de transformaciones fisicoquímicas generadas por la fuerza mecánica. Se ha investigado que las fuerzas mecánicas como el cizallamiento, el impacto y la compresión ejercidas por la molienda de bolas transmitirán energía al polvo resultante, reducirán el tamaño de las partículas de polvo y destruirán las estructuras cristalinas. Por lo tanto, el proceso de molienda de bolas puede reducir la energía superficial específica de los productos de reacción para promover la reacción sólido-sólido imposible y mejorar la eficiencia de reacción. Además, a diferencia de las reacciones termoquímicas normales, las reacciones mecanoquímicas utilizan energía mecánica en lugar de energía térmica, de modo que la reacción podría completarse sin alta temperatura, alta presión u otras condiciones adversas. Esta tecnología ha demostrado la capacidad de modificar y mejorar significativamente el proceso de lixiviación, por lo que puede ser utilizada como un medio de pretratamiento y, combinada con tecnología hidrometalúrgica, para recuperar metales.

Los **líquidos iónicos** han suscitado un intenso interés como alternativas a los disolventes orgánicos convencionales, ya que, en la extracción de solventes convencionales, el uso de grandes cantidades de disolventes orgánicos volátiles ha sido problemático. Los líquidos iónicos tienen propiedades fisicoquímicas únicas: por ejemplo, pueden estar compuestos por varios cationes y aniones que modifican las propiedades y comportamientos de fase de los líquidos. Por lo tanto, se han aplicado principalmente en métodos de separación, como membranas soportadas por líquidos iónicos, aditivos de fase móvil, etc. Su aplicación en la extracción de metales raros y preciosos se ha ampliado recientemente gracias a los esfuerzos de los investigadores en el desarrollo de extractantes compatibles con líquidos iónicos hidrofóbicos, ya que se ha descubierto que su capacidad de extracción y selectividad para los metales aumentan al utilizar líquidos iónicos hidrofóbicos, que tienen aplicaciones potenciales en procesos de extracción líquido-líquido. La capacidad de los líquidos para ser reciclados es una gran ventaja para su implementación, pero los valores más elevados de

estos líquidos por sobre los disolventes tradicionales representa un factor negativo que limita su uso en el proceso de producción práctica, especialmente cuando se requieren grandes cantidades de solvente.

Se puede concluir que, a partir de la alta demanda de metales que motivan el desarrollo tecnológico de la sociedad actual y de la escasez de recursos naturales primarios para suplir dicha demanda, los países han invertido capital humano y económico en el estudio e investigación de nuevas tecnologías para la recuperación de minerales críticos y metales preciosos procedentes principalmente de los RAEE. Estos estudios han manifestado el desarrollo de distintas tecnologías tradicionales y emergentes, cada una de las cuales presenta ventajas y desventajas de distinta índole. Es por ello, que se recomienda la utilización de más de un proceso de manera combinada que propicie la obtención de un mayor beneficio, considerando tanto los aspectos económicos como los ambientales.

4.3 Oportunidades y desafíos para el aprovechamiento de relaves

La publicación "Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization" de Kinnunen y Kaksonen (2019) expone las brechas de conocimiento en la minería para transformar una economía lineal en circular. A través de un taller y entrevistas con representantes de la industria minera y expertos académicos, se discutieron nuevas oportunidades de negocios con residuos mineros y metalúrgicos, centrándose en el aprovechamiento de las colas mineras. Estas colas, ya extraídas y preprocesadas, representan una fuente de recursos secundaria con gran potencial, reduciendo el uso de energía y agua y alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos en la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible de la ONU, más específicamente al ODS11 "Ciudades y Comunidades Sostenibles" y al ODS12 "Producción y Consumo Responsables" al minimizar la producción de residuos (Fig. 6).



Figura 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 y 12

Mediante el aprovechamiento de los relaves se busca, además de la recuperación de los metales residuales, la utilización de la matriz mineral, lo que implicaría una reducción de todo el volumen de residuos en simultáneo con el valor económico obtenido. Al tratarse de materiales que ya fueron extraídos y procesados, se reducen significativamente los costos de tratamiento reales en comparación con la extracción primaria, ya que la minería y el procesamiento pueden representar el 40-60 % de los costos totales de procesamiento de minerales, e insume mayores volúmenes de agua y energía.

Una de los principales desafíos identificados se relaciona con la necesidad de desarrollar nuevas y mejores tecnologías, lo cual se encuentra limitado en parte por los altos costos de inversión que implica la instalación de plantas de procesamiento y los tiempos prolongados para obtener resultados comprobados y ganancias económicas. Estas tecnologías deberán desarrollar procedimientos tales que, además de la recuperación de metales, permitan la utilización de toda la matriz mineral de las colas. Si bien la mayoría de los métodos aún se encuentran en fase de estudio, el descenso generalizado de la ley de los minerales primarios en el último tiempo y las exigencias ambientales por parte de la sociedad en general, han acelerado los procesos de investigación y experimentación de nuevas técnicas para el reprocesamiento de las colas mineras.

La biominería a través de la biolixiviación, biooxidación y bioprecipitación se ha aplicado con éxito a minerales de bajo grado y procesamiento de residuos como las colas mineras. La biolixiviación con microorganismos acidófilos oxidantes de hierro y azufre se ha aplicado comercialmente para extraer metales de minerales de sulfuro de bajo grado y residuos mineros explorados que no pueden ser procesados económicamente a través de métodos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos tradicionales. Sin embargo, los largos tiempos de procesamiento pueden representar una barrera para la aplicación de estos métodos. Otros de los métodos propuestos como alternativa para recuperar metales de las colas son la tostación magnética, la tostación de cloración y la lixiviación electrocinética, pero presentan algunas deficiencias como los altos costos energéticos requeridos debido al uso de alta temperatura y electricidad para impulsar las reacciones deseadas, o la limitación para eliminar los metales contenidos dentro de la matriz mineral. Los posibles usos para las matrices incluyen, por ejemplo, mezclar colas desulfurados con materiales orgánicos para producir suelos fabricados, y el uso de colas para crear geopolímeros para usar como material de relleno para cavidades subterráneas y cubiertas herméticas de agua y oxígeno. La interconexión y la planificación a largo plazo son esenciales para identificar posibles tecnologías para la valorización de residuos ya en las primeras etapas de la vida de la mina, ya que los métodos de eliminación de residuos mineros pueden hacer

posible la utilización de residuos en el futuro o pueden determinar que los mismos no sean adecuados para ningún propósito.

La falta de conocimiento sobre la composición geoquímica de las colas, que en muchos casos representan pasivos ambientales mineros muy antiguos donde la información era muy acotada, es una limitación. Se ha propuesto un pensamiento a largo plazo a partir del almacenamiento de las materias primas para el futuro, cuando las condiciones sean favorables para su reprocesamiento. Un ejemplo para mejorar la brecha de conocimiento sobre la composición de las colas, lo representa el mercado en línea desarrollado por la agencia científica nacional australiana CSIRO denominado ASPIRE (Advisory System for Processing, Innovation & Resource Exchange). El ASPIRE es una herramienta web que proporciona un servicio activo de interconexión para empresas generadoras y utilizadoras de residuos, sugiriendo posibles relaciones y oportunidades de inversión en el dominio del reciclado y reminería.

El desarrollo de las cadenas de valor resultó ser otro aspecto relevante identificado en la investigación. La valorización de residuos no es un negocio central para las grandes empresas mineras que, al tener sus proyectos en áreas remotas, suelen tener costos logísticos muy elevados. Por este motivo, muchas empresas mineras estarían dispuestas a asociarse con otras organizaciones, preponderándose así el rol de las PYMEs en la revaloración de los subproductos. De esta manera, se puede implementar una red de PYMEs que aporten ideas innovadoras y ágiles para impulsar el desarrollo de elementos menores y secundarios ya desde la fase de planificación del proyecto minero considerando la selección de procesos más adecuados para la recuperación de los residuos.

Finalmente, otro desafío a destacar lo representan el aspecto ambiental y la opinión de las comunidades que se hallan cercanas al proyecto minero. En muchos casos, la minería suele estar estigmatizada y es señalada como responsable de la contaminación del agua y los suelos, por lo cual la apertura y reprocesamiento de colas en diques que ya se encuentran estabilizados física y químicamente podría representar un riesgo. Para minimizar esta acción, deben tomarse todo tipo de medidas de seguridad, realizar una evaluación previa de los impactos ambientales posibles y se deben organizar encuentros didácticos, informativos y participativos con la sociedad. Además, el marco normativo deberá ser lógico y predecible, de manera tal de promover la reapertura de diques de cola para favorecer la utilización de flujos económicos secundarios; asimismo la tributación podría dar ventaja al producto circular para impactar de manera positiva en la rentabilidad del negocio.

4.4 Recuperación de Au y Ag de escorias de fundición

En el estudio “Avances en la recuperación de oro y plata mediante flotación en escorias de procesamiento de menas de oro” (Hidalgo et al., 2015), se analiza la posibilidad de recuperar oro y plata mediante el tratamiento de escorias de fundición acumuladas en contenedores de la planta de precipitación y fundición de una empresa minera ubicada en la provincia de San Juan (Argentina). Este estudio representa un caso típico de reciclado de un pasivo ambiental minero mediante diversos procesos metalúrgicos aplicables en menas de oro.

Las escorias son el subproducto de la etapa final del proceso de fusión, utilizado para la purificación de minerales que poseen metales de interés comercial. Están conformadas básicamente por una mezcla de óxidos metálicos (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O), presentes en cualquier operación piro-metalúrgica que involucre sistemas fundidos.

El crecimiento de la demanda mundial de oro en la última década, impulsado no solo por el mercado de la joyería sino también por la creciente utilización del oro en la industria y en aplicaciones médicas, junto con el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar los procesos de extracción del mineral, ha despertado el interés por la recuperación de oro no solo a partir del procesamiento de menas, sino también del reciclado de escorias.

Las muestras tomadas de las escorias fueron, en primer lugar, reducidas en molinos de rollo a malla 6 (3,5 mm), obteniéndose una muestra final de 5 kg. Luego, esta muestra se sometió a una clasificación granulométrica a través de un tamizador vibratorio y se determinó el contenido de Au y Ag en cada fracción. Al observarse que la mayor concentración de Au y Ag se encontraba en la fracción de -35 mallas, se consideró que esta selección granulométrica representaba el primer proceso de concentración. La muestra reducida a la fracción de -35 mallas se concentró en un separador centrífugo tipo Knelson, obteniéndose dos concentrados y un estéril. Dado que el material estéril contenía leyes considerables de Au y Ag, se aplicaron tres series de prueba de flotación Rougher como método complementario para seguir recuperando mineral.

Los resultados obtenidos indicaron que, a partir del método de concentración por gravedad (centrífuga Knelson), se lograron porcentajes de recuperación del 42 % para Au y del 13,7 % para Ag. La recuperación de Au mejoró en un 87,7 % a través de la flotación del estéril de la separación centrífuga, y la recuperación de Ag mejoró en un 47,4 %.

De esta forma, se concluyó que, bajo ciertas condiciones experimentales, fue posible recuperar una alta proporción de Au y Ag de las escorias procedentes de procesos mineros en el caso analizado.

4.5 Desarrollo tecnológico para la factibilidad del reprocesamiento de colas

El estudio "Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis" (Araya et al. 2021) examinó la posibilidad de reutilizar los desechos mineros almacenados en los diques de cola de cobre en el norte de Chile para obtener materiales críticos.

Se determinó que los diques de cola activos en el norte de Chile contienen cantidades significativas de varios metales críticos, como elementos de tierras raras, vanadio, cobalto, metal de silicio y escandio. Resultó crucial el nivel de información de línea base de libre disponibilidad con el que cuenta el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) de Chile. Se utilizaron los datos geoquímicos que se habían relevado previamente sobre las colas contenidas en los diques mineros y, a partir de ello, se aplicó un análisis de opciones reales para evaluar el reprocesamiento del escandio como referencia para otros elementos. Los resultados indicaron un considerable potencial económico para el reprocesamiento de los diques de cola para obtener materiales críticos reciclables, considerando la cantidad disponible y los precios actuales de los materiales. El análisis de sensibilidad e incertidumbre reveló que el gasto de capital (CAPEX) tiene un impacto significativo en el valor neto actual del proyecto. Se concluyó que se requiere un desarrollo tecnológico considerable para mejorar los procesos de reprocesamiento y tecnologías para recuperar elementos valiosos.

Estos hallazgos proporcionan una base para considerar el reaprovechamiento de los diques de cola y la recuperación de materiales críticos como parte de las políticas de economía circular. Aunque el estudio demostró para el caso y escenarios analizados que el reprocesamiento de las colas no resultaría económicamente rentable, la necesidad de métodos más sostenibles para preservar los recursos naturales no renovables subraya la importancia de desarrollar una revalorización de las colas a escala industrial.

Se reconoce que esto solo será factible con una mayor investigación, el desarrollo de nuevas tecnologías y un enfoque multidisciplinario para garantizar que el reprocesamiento de las colas sea rentable y viable desde el punto de vista económico.

4.6 Reminado para la obtención de minerales para la transición energética

El estudio "Remining for Renewable Energy Metals: A Review of Characterization Needs, Resource Estimates, and Potential Environmental Effects" (Maest 2023) abarca un panorama global de la situación actual para realizar explotaciones sobre los residuos mineros dentro de los cuales se incluyen los diques de colas, escorias de fundición, escombreras y aguas mineras. Evalúa las necesidades técnicas, económicas y ambientales para hacer de la reminería una fuente viable de minerales para la

transición energética. Éstos pueden provenir de residuos de minas antiguas y modernas, tanto que hayan sido o no su objeto de explotación primaria. En general los residuos de mayor interés para la reminería en minas de metal abandonadas y existentes son las colas, debido a que ya se encuentran trituradas y molidas, es decir están “preprocesadas”, permitiendo evitar los costos operativos de la minería. Por otro lado, aquellos sitios que incluyen residuos de roca dura abandonada pueden generar una menor ganancia económica pero también revisten interés puesto que, además de crear nuevas oportunidades de trabajo, tienen la ventaja de limpiar impactos ambientales ignorados durante mucho tiempo (pasivos ambientales mineros).

Para planificar una explotación de residuos mineros se debe realizar una caracterización mineral para evaluar la viabilidad económica, técnica y ambiental de dichos residuos, de la misma manera que se realiza la evaluación para la explotación de yacimientos primarios. La concentración total de un metal en los residuos mineros no indica que todo ese metal sea recuperable. La liberación, definida como la disponibilidad del metal o mineral de interés para el procesamiento, es otro factor importante que ayudará a determinar el tipo más efectivo de beneficio y procesamiento y el valor o grado del cuerpo mineralizado. Una caracterización mineral completa debe incluir un plan de muestro detallado con recolección de muestras y que además incluya análisis geoquímicos (concentraciones totales de metales, pruebas de lixiviación a corto y largo plazo y pruebas de balance ácido-base) y también análisis de caracterización física que garanticen estabilidad del depósito y seguridad laboral. Además, es crucial realizar una evaluación de impacto ambiental para disponer los residuos resultantes de la reminería debido a que no todo el material podrá ser reprocesado. La gestión de residuos también incluye la caracterización y evaluación de los residuos para el reciclaje o reutilización (por ejemplo, como materiales de construcción, si son química y físicamente apropiados), o en caso de que esa no sea una opción viable, la posibilidad de disponerlos de manera segura utilizando revestimientos, tapas y otras protecciones que eviten un daño ambiental provocado por la reapertura de dichos residuos. En la evaluación económica de los costos y beneficio del reminado debería ponderarse la limpieza de minas abandonadas y antiguas para eliminar fuentes de contaminación no controladas y perpetuas y devolver la tierra y el agua a un uso beneficioso.

En algunos países desarrollados se están llevando a cabo caracterizaciones y evaluaciones a gran escala de los residuos mineros, con el objetivo de reminarlos, aunque llevarán muchos años para obtener resultados positivos a gran escala.

El USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) está desarrollando y refinando la imagen hiperespectral y otros métodos para determinar el potencial de los residuos mineros para contener

minerales críticos. Earth Mapping Resources Initiative (Earth MRI) está en las primeras etapas de realizar una evaluación de diez años de los sitios de residuos mineros en los Estados Unidos, enfocado en minerales críticos en colas y aguas mineras, y ha designado sitios piloto en varios estados. El programa determinará el número y la ubicación de los sitios de residuos mineros, la cantidad de material disponible que pueda contener minerales críticos, el tonelaje y la ley del material, y las características geológicas, geoquímicas y mineralógicas que puedan influir en la recuperación de las *commodities* de interés y los impactos ambientales. Se analizarán muestras de fase sólida (principalmente colas en la actualidad) para geoquímica multielementos, mineralogía por difracción de rayos X y balance ácido-base. Las muestras de agua se analizarán para cationes y aniones principales, elementos traza incluyendo metales preciosos, y alcalinidad/acidez.

El USGS también está trabajando con el Departamento de Energía de los Estados Unidos en métodos y tecnologías de caracterización de sitios mineros abandonados. También el gobierno de Estados Unidos obtiene información sobre el contenido de metales de residuos mineros descargados a tierra, agua y aire para todas las minas metalíferas en actualidad a partir del TRI (Toxics Release Inventory Program) de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). Durante el año 2021 un total de 87 instalaciones mineras informaron a TRI, y el sector minero de metales representó el 68 % de las cantidades de disposición en tierra.

La Comisión Europea publicó borradores de su Propuesta de Ley de Materias Primas Fundamentales el 16 de marzo y el 30 de junio de 2023. La Propuesta incluye el artículo 26, recuperación de materias primas críticas de los residuos extractivos, que obliga a los operadores a presentar planes de gestión de residuos y un estudio preliminar de evaluación económica sobre el potencial de recuperación de materias primas críticas de los residuos extractivos en un plazo de tres años desde la entrada en vigor del reglamento y que incluya una estimación de las cantidades y concentraciones en los residuos y una evaluación de su recuperabilidad técnica y económica. Cada Estado miembro debe establecer una base de datos pública y digital de todas las instalaciones de residuos cerradas (incluidos los sitios abandonados) en su territorio, enumerando la ubicación, extensión y volumen de residuos de la instalación; los nombres del operador, sucesor o antiguo operador; las cantidades y concentraciones aproximadas de todas las materias primas en los residuos y, cuando estén disponibles, en el depósito mineral original; y cualquier información relevante para permitir la recuperación de materias primas críticas. Si una instalación de residuos incluye potencialmente (no excluye) materias primas críticas económicamente recuperables, se debe realizar un muestreo geoquímico representativo. Para las instalaciones de residuos que indicaron potencialmente cantidades económicamente recuperables de materias primas críticas, los Estados miembros deben realizar un análisis más detallado utilizando el

registro de coronas de perforación o técnicas similares de acuerdo con los requisitos ambientales aplicables. Los Estados miembros deben, cuando sea posible, también incluir una clasificación de las instalaciones de residuos extractivos cerradas según la Clasificación Marco de Recursos de las Naciones Unidas.

Las bases de datos utilizadas en la Unión Europea (UE) para materias primas incluyeron ProSUM (Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining waste project -2015–2017-), que incluía datos sobre residuos mineros almacenados como una extensión de la base de datos Minerals4EU, y ORAMA (Optimising quality of information in Raw Materials data collection across Europe -2018–2019), que incluye datos de la República Checa, Dinamarca, Croacia, Irlanda, Noruega, Suecia, Eslovenia y Ucrania. El Registro Europeo de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (E-PRTR) proporciona acceso público a datos ambientales de instalaciones industriales, incluidas las mineras y de canteras, en los Estados miembros de la UE, Islandia, Liechtenstein, Noruega, Serbia, Suiza y el Reino Unido. Por ejemplo, están disponibles Cu, Cd, Cr, Pb, Ni y Zn, para operaciones mineras subterráneas durante años limitados (<https://industry.eea.europa.eu/analyse/summary-table>).

Además de los registros de contaminantes la UE participa en varios proyectos de reminería de gran alcance, incluido RAWMINA (<https://rawmina.eu/>) con socios en el Reino Unido y América del Sur y NEMO, que tiene como objetivo valorizar los residuos mineros sulfídicos de baja ley para recuperar materias primas críticas. En la página web <https://h2020-nemo.eu/project-2/> se puede acceder a información detallada sobre las principales ventajas de la puesta en marcha del proyecto, incluyendo los porcentajes de recuperación de metales preciosos y minerales críticos, y al mismo tiempo la planificación para la concentración de elementos peligrosos y la utilización de la matriz residual en cemento y materiales de construcción.

El Gobierno de Australia creó recientemente el Atlas de Residuos Mineros de Australia (<https://portal.ga.gov.au/persona/minewaste>), una herramienta de mapeo en línea interactiva con información sobre los diques de colas, escombreras, residuos de fundición y otros materiales relacionados con los residuos mineros australianos, específicamente diseñado para ayudar a identificar oportunidades para el suministro de minerales críticos desde fuentes secundarias. Las descargas de los datos incluyen el nombre de la mina, la ubicación, el tipo de residuo, el tipo de depósito, la estructura del residuo y el estado del residuo, pero actualmente no contienen información sobre el contenido químico de los residuos. En el estado de Queensland el grupo MIWATCH en cooperación con el Departamento de Recursos Naturales, Minas y Energía de Queensland desarrolla

un proyecto para examinar concentraciones de metales económicos en los residuos mineros (ver Mine Waste Transformation through Characterisation - Sustainable Minerals Institute - University of Queensland uq.edu.au).

El relevamiento, identificación y caracterización de los residuos mineros en diferentes partes del mundo indica la importancia de conocer la ubicación y principalmente los volúmenes de dichos residuos para poder realizar el cálculo de recursos y reservas y que puedan ser servir como fuente de metales para la transición hacia una economía circular. Si bien son pocos los casos de reminería, se pueden destacar algunos ejemplos de proyectos que están en fase de caracterización o evaluación económica, aunque varios ya han establecido fases de laboratorio para examinar los métodos de procesamiento más efectivos. Los proyectos en pleno funcionamiento son:

- Sitio de Cobalto de Kasese en Uganda: recuperación de Co de antiguas colas de minas de Cu utilizando métodos de biolixiviación
- Mina Golden Sunlight, Montana, EE. UU.: recuperación de Au de colas de Au existentes utilizando instalaciones existentes
- DRDGold, Sudáfrica: recuperación de Au de antiguas pilas de minas y colas de Au
- Proyecto New Century, Australia: recuperación de Zn de antiguas colas de Zn y metales base
- Pan African Resources, Sudáfrica: recuperación de Au de colas históricas de Au.

Los proyectos en pleno funcionamiento demuestran la preferencia por las colas como objetivos de reminería y, en general, la orientación de oro para la recuperación de las colas. Casi todos los proyectos son propiedad y están operados por empresas mineras que apuntan a reminar oro y otros metales preciosos, pero el imperativo global de expandir las tecnologías de energías renovables está aumentando el interés en los metales asociados con el potencial de aumentar la rentabilidad.

Las conclusiones y recomendaciones de la publicación referida (Maest 2023) identifican las siguientes necesidades:

- Caracterización más precisa de los materiales de origen de los residuos, incluida la mineralogía y evaluaciones metalúrgicas como la liberación mineral.
- Mejores estimaciones de recursos y reservas para los residuos mineros, basadas en una caracterización mejorada y evaluaciones económicas y ambientales.
- Mejoras en los enfoques de muestreo.
- Ejemplos y planes de circularidad completos para evaluar la recuperación potencial y el aprovechamiento más completo de los residuos restantes después del reminado.
- Mejores prácticas para el reminado, desde la exploración hasta la disposición final o reutilización.

5. CASOS DE RECICLADO DE METALES A PARTIR DE RAEE EN ARGENTINA

Entre los años 2019 y 2021, con base en el convenio marco entre la Universidad Argentina de la Empresa (UADE) y el Centro de Procesamiento de Minerales de INTEMIN-SEGEMAR, se llevó a cabo el proyecto científico-tecnológico de Biominería Urbana.

La primera experiencia, desarrollada en el laboratorio de Biominería del INTEMIN, estuvo enfocada en el procesamiento y reciclado de baterías agotadas para la recuperación de compuestos de litio. El proyecto involucró distintas etapas que implicaron, en primer lugar, la recolección de baterías durante 6 meses; luego se realizó una preselección y verificación de las descargas de las mismas; posteriormente las baterías seleccionadas fueron sumergidas en nitrógeno líquido; y, finalmente se realizó la molienda en molino de corte Retsch SM300 y la clasificación granulométrica para separar los fragmentos de plástico de las baterías. En simultáneo se realizaron campañas de muestreo al salar de Caucharí, al sudoeste de la provincia de Jujuy, para la extracción de microorganismos extremófilos autóctonos que presentaran una resistencia al litio y otros metales. Se tomaron muestras de salmuera de pozo a profundidad y superficie y se realizó la determinación de parámetros físico químicos *in situ*. Los resultados obtenidos de los análisis químicos determinaron que se logró recuperar un 60 % de litio de las baterías a partir de la utilización de dos cultivos combinados en distintas etapas: una especie de hongos (*Aspergillus sp.*) contaminados con altos contenidos de litio y otros metales y la especie de microorganismos *Sporosarcinas sp.* con la capacidad de precipitar carbonato de litio. El proyecto aún enfrenta muchos desafíos en el futuro, tales como la forma de molienda de las baterías, proceso complejo y costoso, y el escalado hacia un proceso industrial rentable.

La segunda experiencia se enmarcó dentro de un trabajo continuo que se ha estado realizando por más de 10 años para contribuir al desarrollo de la minería urbana local. Consistió de un análisis para la identificación y cuantificación de los componentes metálicos de los RAEE, por requerimiento de pequeñas y medianas empresas y cooperativas de reciclaje. Los materiales estaban formados por catalizadores metálicos y baterías que ya se encontraban triturados y calcinados para evitar emisiones contaminantes. Al recibir las muestras, se realizó un análisis químico de metales críticos (Ag, Au, Cu, Pd, Pt, Rh) y se confeccionó un informe técnico que fuera solicitado por organismos de control tributario con el objetivo de declarar el valor de los metales críticos para su comercialización fuera del país. Los resultados obtenidos fueron positivos debido a que se observó un incremento de un 40 %

respecto al año 2021 en la demanda de análisis de plaquetas electrónicas y catalizadores cerámicos, consolidando a los laboratorios de INTEMIN como laboratorios de referencia en el control de RAEE. Además, se pudo determinar que los metales analizados fueron en su mayoría Pt, Pd y Rh, los cuales aumentan significativamente el valor agregado de los RAEE's a exportar.

En junio de 2023 en la ciudad de Tafí del Valle, provincia de Catamarca, el Centro de Interpretación Ambiental y Tecnológico (CIAT) realizó una prueba a escala laboratorio de extracción de oro de materiales electrónicos en desuso (RAEE). Si bien este experimento se realizó a escala piloto, se logró el objetivo planteado y se propuso comenzar a trabajar en la elaboración de un informe de impacto ambiental que permita obtener un certificado de aptitud ambiental para la gestión de los RAEE, desde el inicio hasta su disposición final. Esta iniciativa representa un buen ejemplo de minería urbana que genera fuentes de trabajo local a medida que se reducen los riesgos ambientales y para la salud y se recuperan materiales valiosos que pueden reintegrarse en la industria, favoreciendo así la economía circular. Desde su creación en 2018 el CIAT innovó de manera constante en procesos de reciclado de materiales y en la separación y clasificación de residuos secos como cartón, vidrio, plástico, metales y plaquetas. Para la recolección de los residuos, la ciudad de Tafí Viejo, posee un servicio de recolección municipal que incluye un circuito exclusivo. Los ciudadanos pueden utilizar este sistema o depositar, de forma personal, en los puntos verdes que están habilitados las 24 horas.

La actividad económica legal alrededor del reciclado de metales tiene poca visibilidad. Se establecen relaciones directas entre empresas que producen residuos metálicos reciclables y las metalúrgicas, que por lo tanto no son ostensibles. El comercio electrónico coloca muchas otras operaciones de compraventa de residuos metálicos reciclables en la esfera privada. Los puntos de toma en su modalidad de comercios "Compro metales" y chatarreros son un polo visible de la actividad, en tanto que las metalúrgicas donde los insumos se procesan serían establecimientos en el otro polo, distribuidos en los cordones industriales de las grandes urbes. Las demoliciones no desdeñan la separación de antiguas cañerías de plomo, los desguaces industriales aprovechan la chatarra ferrosa, y existen puntos de toma de electrodomésticos, baterías, y partes de equipos en general destinadas al aprovechamiento de metales específicos que las componen. La mera observación de la vida de las grandes ciudades marca la presencia de recicladores urbanos que recuperan las latas de aluminio, en tanto que los bobinados de pequeños motores desechados en contenedores de basura son sistemáticamente desguazados en la vía pública. La lengua popular ya incorpora a principios del siglo XX al "ciruja", el cirujano de la basura, definido como la persona que busca y/o comercia con los desperdicios, trapos, botellas, etcétera, que recolecta en los basurales o vaciaderos de residuos,

morador de las proximidades de las quemas.

En paralelo con el chatarreo legal de metales ferrosos y no ferrosos, los medios de prensa reflejan constantemente fenómenos de la vida cotidiana que indican la presencia de una actividad informal / ilegal vinculada al reciclado de metales. Noticias acerca de la desaparición de monedas de la circulación económica son recurrentes en épocas de alta inflación, cuando el valor del metal contenido supera su valor facial. Oleadas de raterismo urbano arrasan con los herrajes de bronce, en tanto que organizaciones criminales de mayor entidad han provocado robo de esculturas y saqueos organizados de piezas ornamentales de bronce en cementerios. Los ataques de “quemacoches” estarían vinculados a facilitar la extracción de cables de los vehículos por parte de marginales. Dependiendo de las oscilaciones de los precios de los metales los hechos de robo se potencian y generalizan, o disminuyen, siendo el robo de cables eléctricos –incluso de media tensión con consecuencias fatales– un tema de gran actualidad e impacto a la fecha de éste informe. El mantenimiento de la red de telefonía fija en el área de la ciudad de Buenos Aires y alrededores se encuentra severamente amenazado por el robo de cables. En cuanto a chatarra ferrosa, su robo requiere de una logística y organización criminal más sofisticada, dado el volumen material que implica. En el pasado ha afectado principalmente al sistema ferroviario argentino, con el robo de decenas de kilómetros de vías férreas e incluso de un puente ferroviario. El robo de catalizadores de automóviles es un fenómeno mundial, que en Argentina no tiene gran impacto dada las características del parque automotor.

Resulta difícil dimensionar la magnitud del mercado local de metales reciclados, en tanto se encuentra en gran parte atomizado, y comprende una fracción ilegítima. La industria siderúrgica, por el contrario, permite una clara contabilidad de la fracción de *scrap* incorporado en sus procesos, y de los intercambios económicos involucrados.

6. POLÍTICAS Y PLANES DE GESTIÓN PARA EL RECICLADO DE MINERALES

La transición hacia una economía circular implica:

- Identificar oportunidades para avanzar en este modelo.
- Reducir la generación y disposición final de residuos.
- Incrementar la valorización de materiales en desuso.
- Fomentar la recuperación de materiales en desuso.
- Utilizar materiales en desuso como insumos para procesos industriales.

Los procedimientos y la búsqueda de nuevas tecnologías para el reciclado de minerales y recuperación de metales pueden constituir uno de los motores para la implementación de políticas de economía circular.

Existe la necesidad de planificar el diseño de los productos para que esté orientado a cumplir con lo que se denomina “metabolismo industrial”, es decir que una vez consumido en una primera instancia, se convierte en una materia prima secundaria para un nuevo proceso. Se ha identificado fundamental la definición de una adecuada normativa en el proceso de reciclado, ya que los materiales catalogados como residuos peligrosos reciben un tratamiento especial y están impedidos de ser reutilizados como nuevos insumos dentro de la cadena de producción. Por ello, es clave que desde los gobiernos se elaboren políticas de economía circular en las que estén involucrados todos los actores y se generen canales de comunicación y gestión para que exista un procedimiento en donde se incorporen la materia prima, los residuos y los productos al proceso de reciclado.

En el caso de los RAEE, su tratamiento y gestión representan una oportunidad para el reciclado de metales y elementos raros. El avance tecnológico en las últimas décadas ha generado un aumento notable en el volumen de los RAEE, y la constante demanda de metales para la fabricación de nuevos aparatos, sumado a la disminución de las reservas de recursos minerales primarios, ha puesto de manifiesto la necesidad de considerar el reciclado de metales de RAEE como una opción viable para satisfacer la demanda de una manera más sustentable. Abundan las investigaciones para hallar procesos de recuperación de metales que sean económica y ambientalmente favorables. Si bien se han encontrado nuevas tecnologías de recuperación de mineral, muchas se encuentran a nivel de escala de laboratorio y será necesario realizar un trabajo en conjunto entre gobiernos, productores, consumidores y la sociedad en general para implementar políticas de gestión de economía circular.

Las investigaciones y desarrollos para el reprocesamiento de las colas contenidas dentro de los diques de colas de la minería representan un nuevo desafío y oportunidad para la comunidad científica, gobiernos y empresas mineras. Si bien la gestión de los diques de colas responde a altos estándares contenidos en las evaluaciones de impacto ambiental y factibilidades de los proyectos, la nueva tendencia indica que se debe buscar la mayor sustentabilidad, con el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten obtener un nuevo beneficio económico a partir de éstos residuos, favoreciendo así la circularidad. Esto provocaría además un impacto positivo para el ambiente reduciendo el volumen y favoreciendo así el tratamiento y gestión de los pasivos ambientales mineros.

Para dar respuesta a este tipo de iniciativa, la Asamblea de Naciones Unidas para el Medio Ambiente

(UNEA) elaboró un documento informativo sobre los aspectos ambientales en la gestión de dique de colas, enmarcados dentro del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y basado en el Estándar Industrial Global sobre Gestión de Relaves (GISTM). Durante la elaboración de dicho informe, participó, además, el Servicio Geológico de Finlandia a partir de la realización de investigaciones preliminares y en la organización de una mesa redonda de expertos.

Si bien el informe se basa en los fallos catastróficos de los diques de colas a gran escala, impactos ambientales crónicos y minería de menor escala, brinda información relacionada a la circularidad en la gestión de diques de colas y cuáles son las barreras que deben superarse a la hora de plantear una política de reaprovechamiento de las colas (UNEP, 2024).

La mayoría de los ejemplos presentados en este informe sobre reciclado de minerales en diques de colas han contado con la participación de los servicios geológicos de sus países, que contribuyeron científicamente en el inventario, cubicación, caracterización físico-química y evaluación de riesgos de los diques de colas para su reaprovechamiento en el reciclado de minerales.

7. ROL DE LOS SERVICIOS GEOLÓGICOS

Un servicio geológico puede desempeñar varios roles importantes en el reciclado de minerales. Algunos de estos roles incluyen:

- **Investigación y Desarrollo:** investigar nuevas tecnologías y métodos para mejorar la eficiencia y la eficacia del reciclado de minerales. Esto incluye el desarrollo de técnicas avanzadas para la separación y recuperación de minerales a partir de residuos.
- **Evaluación de Recursos Secundarios:** realizar estudios y evaluaciones de residuos mineros, electrónicos y otros desechos industriales para identificar y cuantificar los minerales valiosos que pueden ser recuperados.
- **Asesoramiento Técnico:** proveer asesoramiento técnico a industrias y gobiernos sobre las mejores prácticas y tecnologías disponibles para el reciclado de minerales, así como sobre la implementación de procesos más sostenibles y eficientes.
- **Mapeo y Monitoreo:** crear mapas y llevar a cabo el monitoreo de depósitos de residuos y sitios de reciclaje para asegurar una gestión adecuada y minimizar el impacto ambiental.
- **Educación y Concienciación:** promover la educación y la concienciación sobre la importancia del reciclado de minerales y los beneficios ambientales y económicos que conlleva. Esto puede incluir la

organización de talleres, seminarios y la publicación de materiales informativos.

- Normativas y Regulaciones: colaborar con entidades gubernamentales para desarrollar y establecer normativas y regulaciones que fomenten el reciclado de minerales y aseguren que se realice de manera segura y sostenible.
- Colaboración Internacional: participar en proyectos y redes internacionales para compartir conocimientos y experiencias, así como para mantenerse al día con las mejores prácticas globales en el reciclado de minerales.

Al desempeñar estos roles, un servicio geológico contribuye significativamente a la economía circular, reduciendo la dependencia de la extracción de minerales primarios y mitigando los impactos ambientales asociados.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araya N., Ramírez Y., Kraslawsk. A., Cisternas L.A., 2021. Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options análisis. Journal of Environmental Management 284 (2021) 112060. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112060>

Argentina.gob.ar 2022. Minería urbana y biominería para recuperación de litio

<https://www.argentina.gob.ar/noticias/mineria-urbana-y-biomineria-para-recuperacion-de-litio>

Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI) 2020. Pasivos ambientales mineros. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. Grupo de Expertos en Pasivos Ambientales Mineros (GEPAM). Disponible en: Grupo de Expertos en Pasivos Ambientales Mineros (asgmi.org)

Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI) 2022. Glosario técnico en materia de gestión de pasivos ambientales mineros (2da edición). Grupo de Expertos en Pasivos Ambientales Mineros (GEPAM). Disponible en: Grupo de Expertos en Pasivos Ambientales Mineros (asgmi.org)

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) 2016. Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. Manuales de la CEPAL N°2, 211 pp. Naciones Unidas.

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/40407-guia-general-la-gestion-residuos-solidos-domiciliarios>

Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. 2020. Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos: Cantidades, flujos y potencial de la economía circular. Universidad de las Naciones Unidas (UNU)/Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones (UNITAR) – coorganizadores del programa SCYCLE, Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), Bonn/Ginebra/Rotterdam. Disponible en: [GEM-2020-Spanish.pdf \(itu.int\)](#)

Hidalgo, N., Diaz, A., Bazán, V., Sarquís, P. 2015. Avances en la recuperación de oro y plata mediante flotación en escorias de procesamiento de menas de oro. Boletín Geológico y Minero, 126 (4): 7-20.

Kinnunen P.H. M., Kaksonen A.H., 2019. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. Journal of Cleaner Production 228 (2019) 153-160. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>

Ley nacional N°25.916. Gestión integral de residuos domiciliarios. Texto completo | [Argentina.gob.ar](#)

Ley provincial N°13.592. Gestión integral de residuos sólidos urbanos. Texto actualizado | [Argentina.gob.ar](#)

Lovera, D., Vladimir, A., Coronado, R. 2004. La valoración de escorias metalúrgicas como recursos industriales. Revista del Instituto de Investigación (Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Perú), 7(13), 26-30. Disponible en: [SINTITUL-1 \(unmsm.edu.pe\)](#)

Maest A.S. 2023. Remining for Renewable Energy Metals: A Review of Characterization Needs, Resource Estimates, and Potential Environmental Effects. Minerals 2023, 13, 1454. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min13111454>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación (MAyDS) 2020. Gestión integral de RAEE. Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, una fuente de trabajo decente para avanzar hacia la economía circular (1ª ed.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Oficina de País de la Organización Internacional del Trabajo para Argentina. Disponible en [manual_raee.pdf](#)

Municipalidad de Tafí Viejo, 7 de junio 2023. Presentaron un proyecto de minería urbana en Tafí Viejo. <https://www.tafiviejo.gob.ar/noticia/ecologia-medio-ambiente/128862/presentaron-proyecto-mineria-urbana-tafi-viejo>

Palomino Q. A., Huisa Q. V. 2021. Reutilización y reciclaje de residuos sólidos en economías emergentes en Latinoamérica: una revisión sistemática. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5(6), 13184-13202. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1316

Peydayesh M., Boschi E., Mezzenga R. 2024. Recuperación de oro de residuos electrónicos a partir de aerogeles de amiloide de residuos de alimentos. Departamento de Salud, Ciencia y Tecnología de la Escuela Politécnica Federal de Zurich, Suiza. Artículo de investigación publicado en revista Advanced Materials. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/adma.202310642>

Protomastro, G. F., 2013. Minería urbana y la gestión de los recursos electrónicos (1ª ed.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Grupo Uno. Disponible en: Minería urbana y la gestión de los recursos electrónicos | ISBN 978-987-29862-1-6 - Libro

Schröder P., Albaladejo M., Alonso Ribas P., MacEwen M., Tilkanen J., 2020. The circular economy in Latin America and the Caribbean. Opportunities for building resilience. CHATHAM HOUSE, 73.

UNEP, 2024. Knowledge Gaps in Relation to the Environmental Aspects of Tailings Management. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Disponible en: Knowledge Gaps in Relation to the Environmental Aspects of Tailings Management | Green Policy Platform

United Nations Environment Programme, International Council on Mining and Metals, & Principles for Responsible Investment, 2020. Global Industry Standard on Tailings Management. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/36139>.

United Nations Environment Programme, 2018. Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/26448>.

Wang M., Tan Q., Chiang J.F., Li J., 2017. Recovery of rare and precious metals from urban mines—A review. Front. Environ. Sci. Eng. 2017, 11(5): 1. Disponible en: [DOI 10.1007/s11783-017-0963-1](https://doi.org/10.1007/s11783-017-0963-1)

ANEXO 1. LISTADO DE PÁGINAS WEB DE REFERENCIA

Página web	
Tipo	Lugar
https://grupobranceli.com/blog/el-reciclaje-de-metal-en-cifras/	
Empresa de gestión de residuos	Alicante, España
https://www.amcsgroup.com/blogs/recycling-price-trends-in-the-us-2022/	
Empresa de innovación para residuos y reciclaje	Sede en Irlanda y oficinas en Europa, Estados Unidos y Australasia
https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en	
Sitio sobre políticas de innovación en energía, cuidado ambiental y perspectiva en cambio climático	Unión Europea
https://www.unicore.com/en/	
Empresa sobre desarrollo de tecnología "limpia" y reciclaje de minerales	Multinacional belga con fuertes bases europeas
https://www.resourcepanel.org/reports/metal-recycling	
Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) Investigar los problemas de los recursos críticos del mundo para desarrollar soluciones prácticas	Panel Internacional de Recursos - creado por el Programa de Naciones Unidas
https://www.bioguia.com/ambiente/residuos-raee_30782731.html	
Bioguia- Página ambiental	
https://www.boliden.com/products/our-products/byproducts/	
BOLIDEN. Empresa minera y metalúrgica que realiza tanto extracción de materiales primarios de metales como reciclaje	Suecia
https://rawmina.eu/	
Comisión Europea. El proyecto busca utilizar los residuos mineros para su explotación y obtener minerales críticos	Europa
https://h2020-nemo.eu/project-2/	
Comisión Europea. El proyecto tiene como objetivo valorizar los residuos mineros sulfídicos de baja ley para recuperar materias primas críticas, a partir de pruebas piloto	Europa
https://portal.ga.gov.au/persona/minewaste	
Atlas de Residuos Mineros de Australia. Herramienta de mapeo en línea interactiva con información sobre los diques de colas, escombreras, residuos de fundición y otros materiales relacionados con los residuos mineros australianos	Australia

Página web	
Tipo	Lugar
https://smi.uq.edu.au/brc/research/mine-waste-transformation-through-characterisation	
Proyecto en cooperación con gobierno australiano para examinar nuevas concentraciones de metales económicos en los residuos mineros en Queensland, Australia	Queensland, Australia
https://congominas.org/drc_companies/4-societe-de-traitement-du-terril-de-lubumbashi	
Producción de cátodos de cobre, hidróxido de germanio, hidróxido de cobalto, concentrado de plata y óxido de zinc, a partir del Montón de Escoria, a través de una planta de tratamiento pirometalúrgico y una planta de tratamiento hidrometalúrgico	Lubumbashi, República Democrática del Congo
https://www.state.gov/minerals-security-partnership/	
La Asociación de Seguridad de Minerales (MSP por sus siglas en inglés) es una colaboración de 14 países y la Unión Europea (Australia, Canadá, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, India, Italia, Japón, Noruega, la República de Corea, Suecia, el Reino Unido, los Estados Unidos y la Unión Europea -representada por la Comisión Europea-) para catalizar la inversión pública y privada en cadenas de suministro responsables de minerales críticos a nivel global.	Departamento de Estado de Estados Unidos