



Cierre de Minas - Propuestas y Experiencias de Alemania y Perú

En el marco del Proyecto de Información y Asesoría para el Cierre de Minas en el Perú



Deutsch-Peruanische
Industrie- und Handelskammer
Cámara de Comercio e Industria
Peruano-Alemana



Ministerio Federal
de Economía
y Energía



Deutsch-Peruanische
Industrie- und Handelskammer
Cámara de Comercio e Industria
Peruano-Alemana

Cierre de Minas - Propuestas y Experiencias de Alemania y Perú

Es una publicación de la Cámara de Comercio e Industria Peruano-Alemana

Av. Camino Real 348, Of. 1502
San Isidro, Lima
Tel.: +51 1 441 8616
Email: info@camara-alemana.org.pe
www.peru.ahk.de

Project Manager:

Ann-Yasmin Reimers
Correo: ar@camara-alemana.org.pe

Coordinación del Proyecto:

Ann-Yasmin Reimers
Antje Wandelt
Jan Patrick Häntsche

Colaboradores:

Jan Patrick Häntsche
Jennifer Schwarten

Impresión:

Comunica2 S.A.C.

Publicación:

Internet:
<https://peru.ahk.de/es/publicaciones>
www.centromineroaleman.com



Imagen carátula:

Shutterstock
Ralf Geithe
Geiseltalsee

Los contenidos, materiales y obras (imágenes y gráficos) de esta publicación han sido proporcionados por terceros ajenos a la AHK Perú, quien se limita a compilarlos y presentarlos tal cual le han sido proporcionados, sin previa verificación o validación del contenido o sus fuentes. Por tanto, la AHK Perú se exime de cualquier responsabilidad en caso tales contenidos, materiales u obras (imágenes y gráficos) afecten derechos de terceros, en particular derechos de autor. En caso de tener algún comentario respecto a la pertinencia, corrección y/o legalidad de tales contenidos, materiales y/u obras, o sus fuentes, por favor comuníquese con nosotros al correo info@camara-alemana.org.pe

Estimados lectores,

cerrar una mina adecuadamente es un proceso largo, trabajoso y costoso. Pero realizar el cierre de mina correctamente, también es la base para obtener la licencia social para nuevos proyectos mineros y por ende es una inversión para alcanzar el éxito en el futuro de la minería. Alemania tiene una larga experiencia en minería, que abarca varios siglos y en las últimas décadas ha adquirido también una amplia experiencia en tecnología, administración y gestión del cierre de minas. Interesantes son también las lecciones aprendidas, de qué forma una gestión temprana y adecuada durante la fase de explotación puede disminuir costos posteriormente en el cierre de la mina.

Para facilitar el acceso a la experiencia alemana se creó el “Proyecto de Información y Asesoría para el Cierre de Minas en el Perú - 2018 – 2020”. En el transcurso de estos tres años (2018 – marzo 2021) en el marco del proyecto se han realizado numerosas actividades como conferencias, talleres y viajes con el fin de compartir experiencias y propuestas, así como fomentar el dialogo e intercambio de ideas entre los actores.

En la presente publicación hemos resumido las experiencias, propuestas y ejemplos de las instituciones y empresas alemanas y peruanas, que fueron presentados durante el proyecto. La publicación y el proyecto son parte del trabajo del Centro Peruano-Alemán de Negocios Mineros de la Cámara de Comercio e Industria Peruano-Alemana, el cual cuenta con apoyo del Ministerio Federal de Economía y Energía (BMWi) de Alemania.

Los invitamos a revisar las reseñas sobre las experiencias, tecnologías y casos de éxitos presentados durante el proyecto y a ponerse en contacto con los expertos.



Glück Auf!

Dr.-Ing. Jan Patrick Häntsche
Gerente Innovación y Tecnología
Cámara de Comercio e Industria Peruano-Alemana

Contenido

Contexto general y marco institucional:

Remediación de pasivos ambientales mineros, desafíos y oportunidades	1
El potencial de recursos de los residuos de las minas - Más que las concentraciones de metales	4
Potencial de relaves	14
Resumen ley de cierre de minas en Chile	16
Programa Tranque	20

Experiencias de Europa, Perú y Chile en el cierre de minas:

El cierre de minas y actividades de remediación en Alemania y Europa	21
Utilización combinada de minerales estratégicos y materiales de construcción de los relaves – Oportunidades y riesgos desde el punto de vista tecnológico, ambiental y económico	23
Estrategias de economía circular para el cierre de minas y remediación ambiental en la minería peruana.....	26
Estudio comparativo de experiencias positivas en la gestión de sitios contaminados (2017-2019)	30
Desafíos y oportunidades en la rehabilitación de pasivos ambientales mineros (PAM): Experiencias del proyecto MinSus en Chile y Perú	32

Soluciones tecnológicas alemanas para el cierre de minas:

Sostenibilidad y minería manejo de aguas.....	37
Tecnología backfill para el manejo sustentable de relaves	39
Muros de corte impermeables mezcladas en el lugar para encerrar las zonas contaminadas y estabilizar las presas de relaves	42
SUNfarming Food & Energy - More than a Solar Project - Solución integral para mineras: Producción de energía renovable y alimentos en una misma área de terreno	48

Contexto general y marco institucional:

Remediación de pasivos ambientales mineros, desafíos y oportunidades

Activos Mineros S.A.C. (AMSAC), Dr. Antonio Montenegro, Gerente General

04.12.2019 - Workshop “Cierre de minas y remediación de pasivos ambientales”

Activos Mineros SAC (AMSAC) es una empresa del Estado peruano, surgida a consecuencia de la transformación societaria de la Empresa Regional Grau Bayóvar (2006) para remediar los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de Centromin Perú SA y coadyuvar a promover la inversión privada. Es así que el objeto social de la empresa alcanza: i) la remediación ambiental que ejecuta por encargo, aspecto más significativo; ii) el apoyo a la promoción de la inversión privada que lidera Proinversión; iii) ejecución de otros encargos especiales del Estado.

Antecedentes de la remediación

En un país con larga historia minera, recién a partir de los años 90 se dictó normas ambientales y de responsabilidad social, a través de los PAMA y disposiciones de protección del ambiente; hecho que confluye con una etapa de expansión productiva y grandes inversiones en el Perú. El efecto de la antigua minería dejó un legado de alrededor de 8 mil pasivos ambientales mineros (PAM) en múltiples regiones del país. Su inventario e intervención corresponde al Ministerio de Energía y Minas (MINEM) entidad que prioriza los PAM que deben ser remediados, y por encargo específico los entrega a AMSAC en la forma de proyectos (ex unidades mineras – EUM). Cabe remarcar que los encargos se dan en áreas donde AMSAC no es titular de la superficie ni tiene derechos de concesión.

Proceso de remediación y contexto normativo

La remediación ambiental encargada a AMSAC se ejecuta por fases, siguiendo la normativa establecida por el Estado.

En principio, una vez recibido el encargo, se desarrolla la línea base o estructuración del proyecto, fase en la cual se valida el alcance técnico, social y legal, y la posibilidad de efectivizar la intervención en los PAM.

Posteriormente, se desarrollan los estudios consistentes en el Plan Cierre, Perfil del Proyecto y Expediente Técnico. El primero, es un instrumento ambiental, requisito establecido en la normativa regulada por el MINEM. Los dos siguientes obedecen al Sistema de Inversión Pública (Invierte.pe) que sigue las directrices del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF).

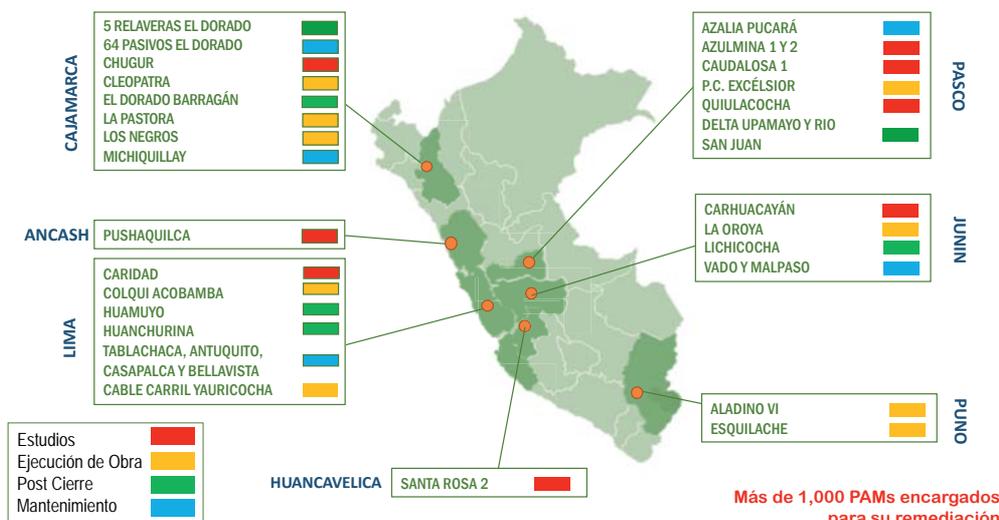
Luego del tiempo que conlleva las acciones y estudios descritos, empieza la fase de ejecución de obras de remediación. A su término inicia la etapa de post cierre (contemplado en la normativa ambiental) en la que, en un espacio de por lo menos 5 años, se debe mantener y monitorear la estabilidad física, química e hidrológica de los PAM remediados.

La última fase es el mantenimiento, la cual, dada la naturaleza de los PAM, tiene un horizonte de perpetuidad. Todo el proceso de remediación descrito además debe cumplir en sus distintas fases con lo establecido en la Ley de Contrataciones del Estado para la selección de las consultoras, ejecutores de obras y supervisiones necesarias y normadas, con los tiempos y requisitos que ello conlleva.

Proyectos a cargo de AMSAC

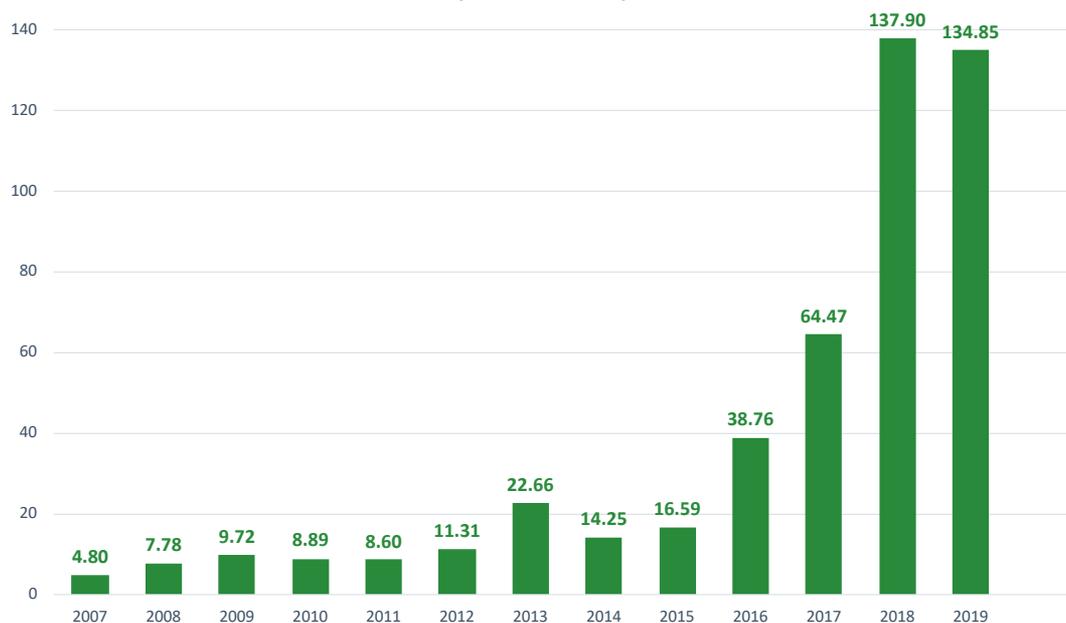
En la ilustración 1 se muestran los proyectos de AMSAC en el país, en sus distintas fases. El alcance nacional de los proyectos a cargo de AMSAC y el fortalecimiento creciente de su especialización técnica, se aprecia en la ilustración 2 de ejecución presupuestal

REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS



Ilustr. 1: proyectos de AMSAC en el Perú, en sus distintas fases ©AMSAC

EVOLUCIÓN DE LA INVERSIÓN EN REMEDIACIÓN AMBIENTAL (Miles DE S/)



Ilustr. 2: Evolución de la inversión en remediación ambiental (miles de S/.) ©AMSAC

histórica, ejecución que se traduce en el consiguiente beneficio del ambiente y calidad de vida de las poblaciones.

Proyecto destacado: Remediación del depósito de desmontes Excélsior (Pasco) Ubicado al suroeste de Cerro de Pasco, a una altitud de 4266 m.s.n.m, Excélsior es un depósito de desmontes mineros

provenientes del tajo abierto Raúl Rojas que, acumuló, en un área de 69 Ha, 50 MM de toneladas de desechos.

En el año 1999, Excélsior junto con el PAM Quiulacocha fueron incluidos en el Contrato de Transferencia de la Unidad de Producción de Paragsha (suscrito entre Volcán Cía. Minera y Centromín Perú), pero fueron devueltos al

Estado, al no considerarlos económicamente rentables.

Posteriormente, en los años 2005 y 2010, se promovió el reaprovechamiento del PAM Excelsior, primero por ProInversión y luego a través de una subasta internacional, quedando en ambos casos la convocatoria desierta, al ratificar que no contenían valores económicamente rentables.

Es así que luego de finalizar los estudios, en diciembre de 2017 se iniciaron las obras de remediación, con una inversión en esta etapa de S/ 155 MM, en beneficio de la comunidad aledaña de Champamarca. El avance a la fecha supera el 80% estimando la culminación de la obra en el primer trimestre de 2021.



Ilustr. 3: Proyectos Excelsior - Pasco ©AMSAC

Proyecto destacado: Remediación del Delta Upamayo (Pasco)

Ubicado a 32 Km al sur de Cerro de Pasco, a una altitud de 4080 m.s.n.m, el proyecto integral de remediación del Río San Juan y Delta Upamayo tiene como objetivo neutralizar los suelos ácidos y revegetar el delta con especies nativas en una planicie de

48 ha; en beneficio de las comunidades de Vicco, Cochamarca y San Pedro de Pari.

Las obras de remediación culminaron en febrero de 2019, estando a la fecha en etapa de post cierre en la que se aprecia con singular impacto, la recuperación de la flora y fauna del lugar, constituyéndose de a poco en una reserva y atractivo natural.

Es de destacar también que, el financiamiento del proyecto, cuya inversión en obra superó los S/ 16 MM, tuvo la participación tanto del Estado (representado por AMSAC) como de empresas privadas, siendo éstas El Brocal, Administradora Cerro SAC y Aurex.



Ilustr.4: Proyecto Upamayo ©AMSAC

Propuesta de un nuevo modelo de intervención

AMSAC ha venido trabajando la propuesta de desarrollo de una Política Nacional de Remediación Ambiental, que haga sostenible la intervención de PAM que se le encarga. Esta propuesta que ha sido comunicada al MINEM, se daría en resumen través de:

- Remediación ambiental: Ejecutando los trabajos en áreas de alto y muy alto riesgo para el medioambiente y salud de las

personas, que considere disposiciones que permitan medidas de mitigación, que posibilite una intervención inmediata.

- Reaprovechamiento: En los PAM con potencial y atractivo para la inversión privada, sobre la base de la nueva tecnología disponible.
- Obras por Impuestos: Mediante la intervención de la empresa privada en las zonas donde convergen actividades mineras en curso con áreas disturbadas abandonadas (PAM), que cambie con ello la percepción de la minería extractiva y abra las puertas de nuevas inversiones.

La complejidad del proceso de remediación de PAM relatada y la posibilidad de impulsar las propuestas de AMSAC para un nuevo modelo de intervención, requiere la necesaria actualización de la normativa ambiental, respecto del cual, AMSAC también ha presentado propuestas al MINEM.

El potencial de recursos de los residuos de las minas - Más que las concentraciones de metales

Instituto Helmholtz-Freiberg de Tecnología de Recursos, Philipp Büttner, Jochen Nühlen, Jonathan Engelhardt

3.10.2019 - Workshop y Rueda de Negocios: Tecnología alemana para el medio ambiente, minería y energía Misión tecnológica de empresas de Sajonia – Alemania”

En la última década, varios programas de financiación nacionales y europeos abordaron el potencial de recursos de los desechos mineros (incluidos los relaves y los vertederos de escoria metalúrgica), con un enfoque claro en el desarrollo de nuevas fuentes de materias primas críticas (CRM). La Comisión Europea definió las CRM como muy importantes para la industria europea de alta tecnología [1]. Las estrategias de recursos europeas y nacionales se refieren

a esta definición e incluyen el desarrollo de nuevas fuentes de CRM como uno de sus principales objetivos. El Ministerio Federal de Investigación y Educación de Alemania (BMBF) financió el programa „r3 -metales y minerales estratégicos- tecnologías innovadoras para la eficiencia de los recursos“ que comenzó en 2012. El objetivo del programa era asegurar el suministro nacional de metales y minerales de importancia estratégica. Los proyectos adecuados debían actuar en los ámbitos del reciclaje y la sustitución de materias primas, así como en el ámbito de la reducción del consumo de materiales. La minería urbana y la evaluación de la eficiencia de los recursos eran otros temas que se ajustaban al programa.

El Instituto Helmholtz de Freiberg para la Tecnología de Recursos (HIF) y el Instituto Fraunhofer de Tecnología Ambiental, de Seguridad y Energía (UMSICHT) ya trabajaron juntos en diferentes proyectos sobre la caracterización de los desechos de las minas y la extracción de recursos en la r3.

El Instituto Helmholtz de Freiberg para la Tecnología de los Recursos persigue el objetivo de desarrollar tecnologías innovadoras para la economía, de manera que las materias primas minerales y metalíferas estén más disponibles, se sometan a procesos de alta eficiencia y se reciclen de forma respetuosa con el medio ambiente. Como parte de la estrategia nacional para las materias primas en 2011, el gobierno alemán inició el HIF. Es una parte constitutiva del Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf y trabaja en estrecha colaboración con la TU Bergakademie Freiberg. El HIF es un miembro fundamental de la red europea de Materias Primas del EIT, habiendo desempeñado un papel decisivo en su establecimiento.

Fraunhofer UMSICHT es pionera en la gestión de energía y materias primas sostenibles mediante el suministro y la transferencia de resultados científicos a las empresas, la sociedad y la política. El equipo dedicado de UMSICHT

investiga y desarrolla, junto con sus socios, productos, procesos y servicios sostenibles.

Junto con la industria y los socios públicos, como el Servicio Geológico de Alemania (BGR), UMSICHT y HIF fundaron el grupo de residuos mineros (r³-mine-waste-cluster) para determinar un potencial realista de residuos mineros para Alemania y dar una estimación fiable de recursos para las materias primas secundarias.

Hoy en día, sin embargo, hay un interés político y público por el potencial de los metales valiosos de los residuos de las minas. Después del catastrófico accidente de los relaves en la mina de Vales Corrego do Feijão, Brasil, la presión social para reducir estos riesgos aumentó en la industria minera, en los propietarios de los residuos de la mina (por ejemplo, los estados) y en la política. Con la nueva Norma Industrial Global de Manejo de Relaves se desarrolló un nuevo conjunto de directrices para evitar estos accidentes en el futuro. „El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y los Principios de Inversión Responsable (PRI) comparten el compromiso de adoptar las mejores prácticas mundiales en materia de instalaciones de almacenamiento de relaves. Han convocado conjuntamente este examen mundial de los relaves para establecer una norma internacional“. [2]

Sus riesgos ambientales y al mismo tiempo su alto potencial como fuente de materias primas (críticas) hacen que los proyectos de residuos mineros sean un ejercicio complejo. Se necesitan soluciones que respeten las cuestiones ambientales, técnicas, civiles y económicas y que proporcionen enfoques holísticos y sostenibles. A fin de validar y ajustar los diferentes enfoques, el HIF coordina la alianza entre las minas. Los interesados locales que representan a las instituciones ambientales, técnicas, científicas, gubernamentales y civiles se reúnen para recomendar el desarrollo de solucio-

nes holísticas para los desechos de las minas con miras a su aplicación en todo el mundo.

1. El catastro alemán de residuos mineros

La BGR encargó a HIF y UMSICHT crear una base de datos de residuos de minas alemana en 2018. La investigación detallada siguió un enfoque estructural. El Mapa Geocientífico de la República Federal de Alemania sirvió de base para definir importantes regiones mineras del país. Este mapa identifica los lugares de producción más importantes de materias primas metálicas en regiones seleccionadas. Partiendo del supuesto de que la mayoría de los importantes emplazamientos de desechos mineros están situados en las proximidades de esos lugares de producción, se realizó una búsqueda en línea en la que se utilizó toda la información pertinente proporcionada en el mapa. Este enfoque permitió delimitar con precisión los lugares de producción e identificar los legados mineros. El aspecto local de los nombres de las minas daba indicios de una posible sobrecarga de la producción de mineral. La información sobre los sitios de procesamiento y fundición se obtuvo de manera idéntica y dio lugar a palabras clave que identificaron los vertederos de escoria asociados.

Conociendo los nombres de las reservas individuales, se llevó a cabo una profunda investigación en línea y de archivo. Además de los archivos estatales y oficiales, las siguientes fuentes en línea sirvieron como fuentes de investigación:

- bases de datos de publicaciones (Google Scholar, Scopus, Web of Science)
- sitios web de empresas de saneamiento (por ejemplo, Wismut GmbH)
- sitios web de asociaciones (asociaciones de tradición minera) y comunidades
- sitios web de coleccionistas de minerales (www.mineralienatlas.de)
- sitios web de las autoridades y oficinas,
- otros sitios web (por ejemplo, de turismo).

La información de las fuentes en línea era de calidad variable y muy heterogénea. Los grandes legados mineros (>50.000 t) representaban los objetivos del estudio. En consecuencia, un gran número de legados mineros clasificados como irrelevantes. Por último, se determinaron de esta manera los datos espaciales sobre la ubicación exacta, sobre el emplazamiento de los legados y sobre su contenido material. Los emplazamientos situados en el estado federal alemán de Sajonia proporcionaron una gran cantidad de información, ya que la Oficina Pública de Medio Ambiente, Geología y Agricultura ha publicado una serie de monografías sobre los emplazamientos mineros. La oficina proporciona los documentos en línea y, por lo tanto, una gran cantidad de información para una base de datos acorde. En otras regiones, las autoridades ofrecían fuentes menos exhaustivas y se estudiaban instituciones no autorizadas. Sin embargo, éstas no podían proporcionar la profundidad de información deseada.

Los archivos no digitales ofrecían información que requería grandes capacidades, ya que la relación tiempo-beneficio es significativamente ineficiente. Por lo tanto, esas fuentes no desempeñaban un papel importante en la adquisición de datos.

Además, en el curso del proyecto se mantuvo una amplia correspondencia con diversos autores estatales y representantes municipales por correo electrónico, llamadas telefónicas y citas in situ. Se pidió a los posibles portadores de conocimientos que proporcionaran datos geográficos y otros datos específicos de los lugares pertinentes. No se especificaron deliberadamente los datos solicitados a fin de mantener un alto grado de libertad para las autoridades en lo que respecta a la transferencia de datos.

Utilizando el ArcGIS de ESRI, la información sobre las ubicaciones de los desechos de las minas registradas se fusionó con otros

conjuntos de datos y se compararon y complementaron de forma subsiguiente. Para determinar los datos de referencia sobre los emplazamientos de desechos de minas, se evaluaron diversas fuentes de datos disponibles en todo el país o específicas de los distintos estados y distritos. Entre ellas se incluyen las de nivel federal:

- Límites administrativos (VG25)
- Mapa general del terreno (BÜK 1000)
- Nombres geográficos (GN250)
- CORINE Land Cover 10 ha (CLC10)
- ATKIS Base DLM (AAA)
- OpenStreetMap (OSM)
- El conjunto de datos geográficos “Áreas protegidas en Alemania” de la Agencia Federal para la Conservación de la Naturaleza,
- Modelo digital del terreno (DGM10)

En la base de datos se han identificado un total de 2377 legados mineros y se han almacenado con información adicional especializada que tiene en cuenta las tareas realizadas manualmente. En la ilustración 5 se muestran los diferentes niveles y fuentes para la recopilación de datos. Muchos antiguos emplazamientos de desechos mineros están potencialmente contaminados con metales pesados y otras sustancias peligrosas procedentes del procesamiento de minerales.

Las autoridades locales responsables de la protección del medio ambiente pueden, en consecuencia, disponer de más información en casos concretos. Por otra parte, el análisis del GIS realizado para la base de datos sobre los desechos mineros puede proporcionar potenciales de peligro que pueden ser examinados con más detalle en el futuro.

La estimación de la re-minería potencial necesita un alto nivel de detalle información. Esfuerzos que consumen tiempo para acceder al nivel alto particular la información tiene que ser estimada para cada legado individual.



Ilust. 5: El proceso de recopilación de datos para la base de datos de residuos de minas de Alemania (catastro)/ © Nühlen/ Fraunhofer UMSICHT

Desde el punto de vista económico, no es posible realizar una base de datos central de detalles amplios y altamente cualificados sobre los legados mineros, ya que la entrada de datos investigables es cualitativa y cuantitativamente muy heterogénea en cuanto a los datos espaciales y temporales y al grado de digitalización.

2. Proyectos de residuos mineros de HIF

El HIF comenzó a trabajar en los problemas de los residuos mineros con el proyecto „Metales y minerales estratégicos de los residuos mineros de Sajonia (SMSB)“ como parte del programa r3. Junto con los socios G.E.O.S. Freiberg GmbH, TU Bergakademie Freiberg, AKW Equipment + Process Design y SAXonia Standortentwicklungs- und-verwaltungsgesellschaft mbH, los expertos investigaron la mineralogía de las antiguas presas de relaves y establecieron enfoques para caracterizaciones precisas. Además, se investigaron los enfoques para extraer los CRM de forma económica y ecológica.

Durante el proyecto, el HIF utilizó el nuevo término „re-minería“ para describir la reprocesamiento sostenible de los residuos de la minería y el enfoque holístico de residuos casi nulos. El término representa la idea de extraer metales valiosos minimizando al mismo tiempo los riesgos ambientales. En el proyecto SMSB, se recopilaban en una

base de datos los datos del top 20 presas más largas de residuos de Sajonia. El conjunto de datos incluía la ubicación geográfica, varios detalles de propiedad, la estructura espacial, el contenido de los recursos, el potencial de valor añadido, así como el origen de los materiales que se encontraban en ellos. Dos de estas presas de relaves fueron estudiadas en detalle con campañas de perforación y muestras de revestimiento en combinación con pruebas de procesamiento del material de residuos. Este último enfoque utilizó tecnologías de flotación y biolixiviación.

Los datos mineralógicos precisos de las muestras del revestimiento, como el tamaño de las partículas, la información geoquímica y la liberación de minerales, sirvieron de base para modelar los análogos virtuales del relave en 3D. La información de los sensores remotos y de los documentos históricos se integró en sofisticados métodos de interpolación geoestadística. Debido a una función de ponderación de tres características principales del material durante el procesamiento común, los modelos respetan el comportamiento de las partículas en la ruta de procesamiento y dan como resultado una estimación realista de la extracción de recursos para el relave estudiado [3].

En el proyecto interdisciplinario SMSB, el HIF desarrolló su Know-How en varias disciplinas, como teleobservación (remote sensing), la

caracterización mineralógica de los desechos de las minas, la modelización geoestadística en 3D de los desechos con respecto a la caracterización de los materiales, la biolixiviación de los desechos sulfídicos y el procesamiento de partículas finas (por flotación). Los prometedores resultados del proyecto tienen un alto potencial de aplicación en la industria de los recursos, pero aún requieren validaciones para alcanzar una mayor preparación tecnológica. En varios proyectos de seguimiento, los conocimientos sobre la caracterización y el procesamiento de los desechos de las minas podrían aumentar considerablemente en los últimos años.

De estos proyectos, en parte todavía en curso, se obtuvieron valiosas experiencias en la estimación del potencial de los recursos de relaves, que se muestran en la ilustración 6.

3. Estimación realista de los recursos para los residuos de minas

Una lección aprendida de los proyectos de residuos de minas es que no existe un enfoque generalmente válido para estimar el potencial de los residuos de minas. Cada residuo de mina es diferente. Cada sitio tiene su propia historia. Se utilizaron diferentes tecnologías para diferentes recursos primarios en un entorno regional específico. Incluso si el contenido de metales y minerales valiosos es alto, no es una garantía para un reprocesamiento exitoso de un montón de residuos de mina. Los desafíos técnicos dependen principalmente de los parámetros mineralógicos del material.

Sin embargo, los desafíos no técnicos son cruciales para la transformación del potencial mineralógico en un proyecto de re-minería viable desde el punto de vista económico y ecológico. Hay tres grupos de atributos que influyen en la viabilidad y que deben diferenciarse: 1) el potencial mineralógico y de emplazamiento, 2) el

National	<ul style="list-style-type: none"> • Re-Mining: Semi-mobile bioleaching plant for sulfidic mine tailings • Re-Mining plus: Semi mobile processing and extraction plant for sulfidic mine tailings • recomine: Regional BMBF WIR-alliance with society, industry and scientific partners working on holistic mine waste treatment strategies, products and services
Bi-National	<ul style="list-style-type: none"> • MoCa (with Brasil): Development of a production chain for rare earth elements from tailings of the ultramafic alkaline-carbonatite complex Catalão/Goiás • Mantaro (with Peru): Mastering Adapted Natural & Technological Advances in Resource Optimization • EcoMetals (with France): Innovative eco-efficient biohydrometallurgy process for the recovery of strategic and rare metals: primary and secondary resources • NOMECOR (with Poland): Tailings as Raw Material Storage for Copper and Building Materials
European	<ul style="list-style-type: none"> • SULTAN: European Training Network (ETN) for the Remediation and Reprocessing of Sulfidic Mining Waste Sites • FineFuture: Innovative technologies and concepts for fine particle flotation: unlocking future fine-grained deposits and Critical Raw Materials resources for the EU • RE-ACTIVATE: EIT RawMaterials Network of Infrastructure - Developing superior technical infrastructure to foster technologies and methodologies for re-activation of former mine sites

Ilust. 6: Los principales proyectos relacionados con la minería en el HIF en los últimos cinco años (en parte en curso) / © Büttner/HZDR

potencial tecnológico y 3) los aspectos civiles y ambientales.

3.1. El potencial mineralógico y del sitio

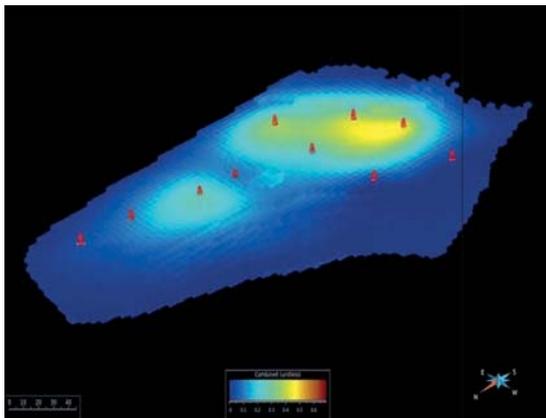
Es necesario recopilar todas las publicaciones, conjuntos de datos, mapas e información histórica disponibles sobre las antiguas actividades de minería y procesamiento, así como sobre el montón de desechos de la mina al comienzo de cada investigación. Además, es esencial comprender el anterior diagrama de flujo de procesamiento e identificar el proceso particular que condujo a la eliminación de los desechos de la mina. El hecho de que una mesa vibratoria u otra tecnología como los separadores magnéticos o las celdas de flotación hayan eliminado el legado de interés es una información clave crítica que ya contiene información sobre la condición actual del material. Posteriormente, el potencial mineralógico de los actuales residuos de la mina tiene que ser caracterizado por una detallada investigación mineralógica y geoquímica. Es necesario comprender la composición mineralógica del material, la liberación y la distribución del tamaño de los granos. Esta información se tiene en cuenta para definir las rutas de reprocesamiento que permitan una extracción eficiente del mineral o minerales y el metal o los metales objetivo. Además, los resultados analíticos proporcionarán información sobre el contenido de elementos y minerales peligrosos en el material. Basándose en las leyes y reglamentos nacionales particulares, estos componentes tóxicos requieren tratamientos especiales y costosos, si las concentraciones superan ciertos límites.

Por consiguiente, la descontaminación debe considerarse también en un estudio de viabilidad de la re-minería. El volumen y la homogeneidad del legado investigado son otras dos características. Ambas son cruciales para estimar la cantidad de metales valiosos dentro de un montón de residuos de la mina. El volumen define un cuerpo específico que potencialmente contiene los metales

valiosos esperados. Los conjuntos de datos históricos o los conjuntos de datos generados por las tecnologías de teleobservación en combinación con los mapas históricos proporcionan la información espacial necesaria. La homogeneidad del legado define si los parámetros materiales y, por tanto, la concentración de los metales valiosos varía dentro del cuerpo de desechos de la mina. Por consiguiente, es necesaria una estrategia de muestreo geoestadístico que proporcione una selección representativa de muestras que ofrezca información fiable sobre la homogeneidad y la caracterización de los minerales. Los montones de desechos de las minas también tienen un valor en términos de su potencial inmobiliario. Los legados cercanos o en los municipios pueden tener un potencial inmobiliario que puede ser un factor decisivo en un estudio de viabilidad. No obstante, el reprocesamiento correspondiente tiene que reducir la cantidad de material de desecho de manera significativa para considerar el potencial inmobiliario como un factor decisivo.

Los precios de los metales también influirán en la viabilidad económica de proyectos de re-minería. Si hay una alta variabilidad en el precio del metal, es importante calcular diferentes casos. Por último, es importante examinar más de cerca la infraestructura disponible en cada lugar. Las actividades de minería y procesamiento en curso con plantas activas en la proximidad del lugar de interés son muy beneficiosas para la viabilidad. Los sitios mineros abandonados requieren una inversión intensiva en nuevo equipo. Por lo tanto, es necesario conocer la accesibilidad de la industria metalúrgica más cercana, que puede ser el cliente potencial de los concentrados de metales o minerales que se procesaron en el lugar. Las distancias y el tipo de infraestructura (por ejemplo, ferrocarriles, autopistas, caminos rurales y sistemas de transporte) dan una importante estimación del costo del transporte. La ilustración 7 muestra un modelo combinado de parámetros

interpolados de los tres principales parámetros mineralógicos importantes: liberación, concentración y tamaño de grano para el relave Davidschacht en Freiberg, Alemania. Estos parámetros tienen influencia en el éxito del reprocesamiento del material de relaves. Los colores azulados identifican unidades que no contienen partículas, las cuales tienen un alto potencial para una extracción exitosa por biolixiviación. Las unidades rojizas tienen una alta estimación de éxito.



Ilust. 7: Modelo 3D del éxito del reprocesamiento determinando los parámetros minerales de relave Davidschacht Freiberg/ © Satge/HZDR

3.2. El potencial tecnológico

Sobre la base de un estudio detallado del potencial mineralógico y del sitio, es necesario estimar el potencial tecnológico. El objetivo es responder a la pregunta de si una tecnología es capaz de extraer los metales y minerales objetivo del material de manera rentable. Una comprensión más profunda de los parámetros de los minerales objetivo y de la petrografía del material permite desarrollar tecnologías de procesamiento y diagramas de flujo de reprocesamiento. En cualquier caso, la solución será una combinación de varias tecnologías específicas para el sitio, como la clasificación basada en sensores, la molienda, la separación magnética, la lixiviación química o biológica, la flotación, los pasos de hidro o pirometalurgia, la separación por densidad u otras. Con las pruebas a escala piloto, el rendimiento de cada paso del diagrama de flujo requiere evaluación y optimización. Algunos

de los principales parámetros técnicos importantes para el diagrama de flujo son:

- El consumo total de energía de la planta
- La tasa de recuperación de la ruta de procesamiento
- El grado de concentración final
- El grado de elementos peligrosos en los concentrados
- El rendimiento de la planta
- El costo logístico para ejecutar la producción de concentrado

Todos estos parámetros tienen una gran influencia en el capital resultante gastos (Capex), gastos operacionales (opex) y en los ingresos por ventas. Cada uno de los parámetros tiene el potencial de hacer que una actividad de re-minería no sea rentable. Para definir el potencial tecnológico, es necesario investigar y medir estos parámetros de forma específica para cada lugar y hoja de flujo y, si es necesario, optimizarlos. El resultado debe ser la tecnología más lucrativa que haga factible el proyecto de re-minería.

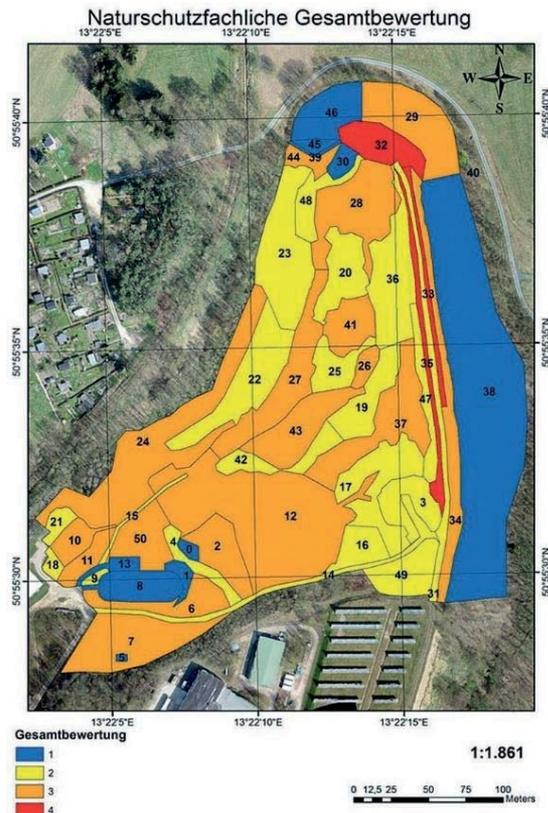
3.3. Los aspectos civiles y ambientales

Además de los aspectos técnicos, mineralógicos y específicos del lugar, un vertedero de residuos mineros tiene siempre aspectos no técnicos, civiles, que o bien aportan una ventaja a un posible proyecto de re-minería o bien lo dificultan. Los aspectos no tecnológicos pueden dividirse en dos grupos, los aspectos medioambientales y los civiles.

Los aspectos medioambientales pueden verse desde dos perspectivas diferentes. Una perspectiva es que los residuos de la mina son una fuente de emisión e interactúan con el medio ambiente de forma negativa. Los contaminantes de metales pesados, las emisiones de polvo contaminado o el drenaje de ácidos afectarán a los ecosistemas circundantes de forma negativa. Esto suele dar lugar a una presión civil a las autoridades regionales para que inicien la remediación. La reparación cuesta dinero a la sociedad. Si un concepto holístico de re-minería se ocupa de

estas emisiones peligrosas y extrae los metales valiosos al mismo tiempo, la sociedad y en particular la ciudadanía local se beneficiará de estos nuevos conceptos de remediación sostenible. Los ingresos de la extracción de metales crearán un flujo financiero para la remediación. La remediación común cubre los residuos de la mina con una capa densa e impermeable y requiere una vigilancia infinita para detectar posibles fugas e inestabilidades. Los conceptos holísticos evitarán cualquier tarea de monitoreo infinito y por lo tanto los costos eternos. Los materiales peligrosos de las soluciones holísticas se extraerán durante el procesamiento del material, se concentrarán posteriormente y se depositarán finalmente en pequeñas cantidades en depósitos especiales y altamente protegidos. Además, algunos contaminantes son una fuente potencial de materias primas críticas (por ejemplo, el antimonio) y pueden servir de apoyo al suministro interno para CRM en países con industrias de alta tecnología.

La perspectiva negativa de los aspectos ambientales puede obstaculizar los proyectos de re-minería. Los sitios de residuos de minas abandonados a menudo no se sometieron a procedimientos profesionales de cierre de minas. Las plantas raras resistentes a los metales pesados podían crecer sin ser perturbadas y los animales raros podían desarrollar enormes poblaciones en estos sitios. Como este tipo de hábitats son escasos en el paisaje cultivado, los sitios mineros abandonados son frecuentes escondites para las especies raras protegidas. Las leyes europeas y nacionales de protección del medio ambiente son muy estrictos. El lagarto de arena es, por ejemplo, un obstáculo frecuente para cualquier actividad en los legados mineros de Alemania. La ilustración 8 muestra los resultados de un estudio sobre las poblaciones de lagartos de arena en los relaves de Davidschacht en Freiberg, que fue encargado por el HIF como preparación para el sitio de desarrollo de la recompensa. Las zonas rojas están clasificadas como zonas de



Ilust. 8: Clasificación de la población de lagartos de arena por zonas en Davidschacht de Freiberg (por Olias, natur-schutzinstitut Freiberg, 2017)/ © Olias/NSI Freiberg

alta protección, debido a la fuerte población de lagartos de arena en estas zonas. Reprocesar los residuos de la mina implicaría molestar a los animales protegidos. Tal perturbación sólo está permitida si la sociedad tiene un interés cualificado (por ejemplo, cuando hay un alto riesgo debido a posibles emisiones tóxicas). La motivación de una extracción económica de metal no es suficiente en lo que respecta a la ley, incluso si proporciona CRM a la industria nacional. Por lo tanto, la perspectiva negativa de los aspectos ambientales es de gran importancia y puede detener una actividad de re-minería a pesar de cualquier estudio de viabilidad positivo. El grupo de los aspectos civiles suele estar relacionado con la historia regional. La tenencia de la tierra es uno de ellos. Mientras que las empresas estatales eran propietarias de las minas en la antigua República Democrática Alemana, las explotaciones mineras eran a menudo tierras desapropiadas. Durante la desapropiación, las autoridades combinaron varias parcelas en

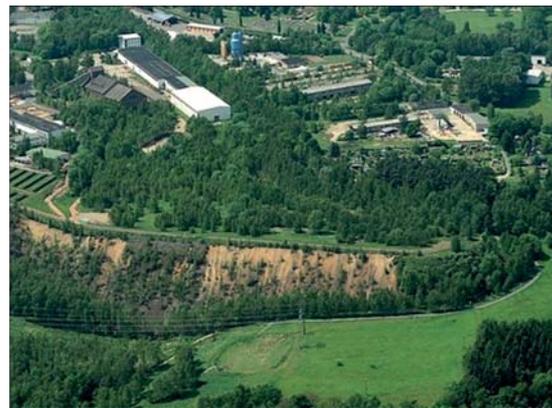
una o más parcelas más grandes. Los legados mineros de Alemania del Este cubren así unas pocas parcelas o incluso sólo una. En las partes occidentales de Alemania, los residuos mineros (por ejemplo, en las montañas del Harz) suelen cubrir más de diez parcelas, que pertenecen a diferentes propietarios. Para iniciar un proceso de re-minería, todos los propietarios tienen que vender sus parcelas o por lo menos participar en un proyecto acorde. La complejidad de la propiedad de los bienes raíces hace que sea mucho más difícil realizar un proyecto de re-minería. Este es un problema predominante en los países con un historial de minería llevada a cabo por empresas privadas y debe ser considerado para estimar el potencial de re-minería de cada residuo de mina.

Las Montañas de mineral de la región minera recibieron el estatus de patrimonio mundial de la UnESCo en 2020. Junto con tal honor, se produce otro aspecto civil que hay que tener en cuenta. Las zonas mineras históricas, incluidos los sitios de residuos mineros con un alto potencial mineralógico, forman parte de las áreas protegidas bajo el estatus de patrimonio mundial (Ilustración 9). Cualquier construcción técnica o paisajística en estos sitios requiere un permiso de la oficina de UnESCo en París. De lo contrario, la ubicación, si no toda la región, pone en peligro su condición de patrimonio mundial de UnESCo. Si un proyecto de re-minería pone en peligro esta situación, es muy probable que la aceptación civil del proyecto no se dé y represente una amenaza para cualquier posible proyecto de re-minería.

El uso real de la tierra es, por supuesto, otro criterio importante. Los vertederos de residuos de las minas pueden estar cubiertos por la infraestructura de los municipios (por ejemplo, paneles solares) o por partes de un bosque o un terreno maderero. El acceso a los desechos de la mina también debe ser aclarado, antes de que un proyecto pueda comenzar. Si el lugar se encuentra en un parque nacional o en una zona de conservación de la naturaleza, es poco probable que se obtenga un permiso

para un proyecto de re-exploración de la mina con equipo pesado.

La aceptación civil es un factor local importante. ¿El proyecto afectará a las comunidades circundantes y cómo? ¿La minería forma parte de la identidad de la región o la re-minería perturbará la identidad? La ciudadanía en una región turística, por ejemplo, puede no aceptar las emisiones de polvo y ruido que afectarán negativamente a los negocios turísticos. En contraste con esas perspectivas negativas, una actividad minera floreciente puede abrir localmente nuevos negocios y, por lo tanto, dar lugar a nuevas formas de empleo y de capital humano. Esas perspectivas pueden incluso impulsar proyectos enteros de re-minería.



Ilust. 9: La vista protegida por el patrimonio mundial de la UnESCo a la ladera de Davidschacht en Freiberg (por SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH)/ © SAXONIA GmbH

Los aspectos civiles y ambientales son los principales aspectos para las actividades de re-minería, porque tienen una influencia existencial en los proyectos de re-minería. Los desafíos técnicos pueden ser manejados a menudo con mejoras claras. Los desafíos civiles y ambientales pueden requerir años de trabajo de persuasión de la ciudadanía. Por consiguiente, es necesario tener en cuenta a los ciudadanos locales en la estimación del potencial de recursos para los desechos de la mina. Los estudios de viabilidad que no tienen en cuenta las cifras derivadas de la participación de los interesados civiles distan mucho de ser una evaluación realista.

4. Recomine – Tecnologías ambientales orientadas a los recursos

La base de datos de residuos de minas alemana (catastro) es GIS y proporciona una prueba de varios de los aspectos mencionados para identificar problemas potenciales para los proyectos de re-minería. Muestra al menos la ubicación de 2377 sitios de residuos mineros. La base de datos permite cargar varios mapas (por ejemplo, de zonas de conservación de la naturaleza, de parques nacionales y de uso de la tierra) en el Visor del SIG e iniciar un escaneo para detectar superposiciones. De ello en total:

- 389 emplazamiento de desechos de minas dentro de reservas naturales (16%),
- 19 en el Parque Nacional Harz (0.8%)
- 325 reservas en zonas de flora, fauna y hábitat protegida (FFH) (14%)

Es muy probable que los residuos de las minas en estas zonas, que constituyen el 30% de todos los residuos de las minas enumeradas, no sean accesibles para proyectos de re-minería. La base de datos muestra, pues, que es esencial tener en cuenta los aspectos civiles y ambientales para realizar un examen realista del potencial de los desechos de las minas en Alemania.

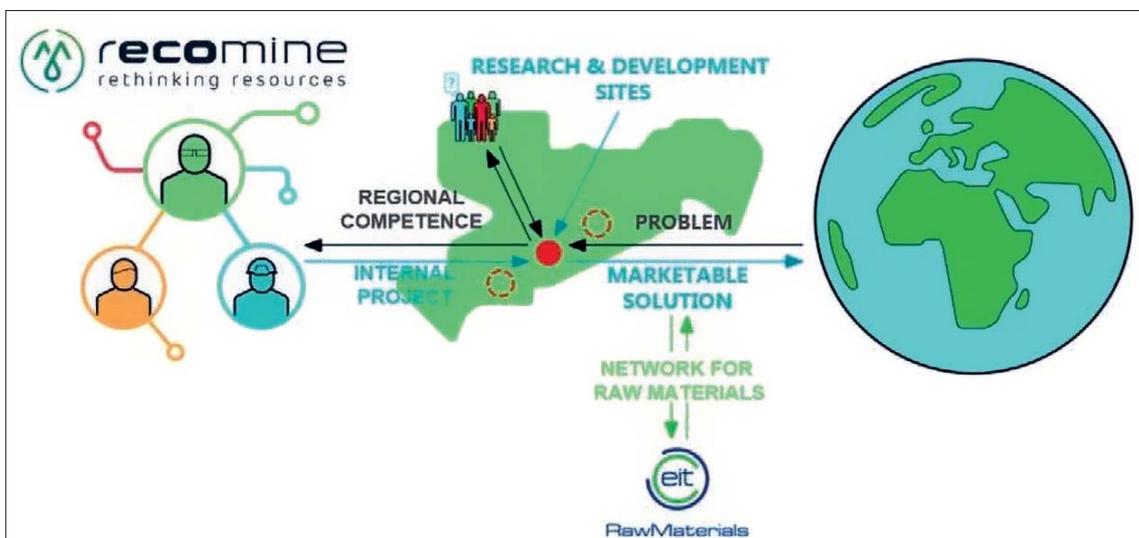
El uso real de las áreas de los emplazamientos de residuos mineros que no se encuentran en ninguna zona protegida es:

- Bosque (39%)
- Superficie agrícola (17%)
- Edificios (15%)

Este escaneo muestra otro aspecto. Si un municipio cubre el área de la zona de residuos de la mina, también es poco probable que la vuelva a minar en un futuro próximo.

Es necesario desarrollar nuevos conceptos holísticos sobre los desechos de las minas en el futuro, que respeten las cuestiones civiles, los aspectos mineralógicos y que combinen la tecnología de los recursos, la tecnología ambiental y la digitalización para crear un valor social y soluciones sostenibles de los desechos de las minas para una industria minera moderna.

Para alcanzar estos objetivos, el HIF coordina la recomine-alianza, que es financiada por el BMBF para los próximos cinco años. La recomine-alianza tiene la visión de seguir desarrollando las competencias creadas a nivel regional en el campo de las tecnologías ambientales para el desarrollo de fuentes de materias primas dispersas. En la ilustración 10 se muestra el proceso de etapas de recomine. Los sitios de prueba y demostración en las Montañas de Minería permiten la



Ilust. 10: El proceso recomine de stage-gate/ © Büttner/HZDR

recomposición para validar los enfoques en los entornos operacionales que representan análogos de los sitios contaminados en todo el mundo. La rehabilitación de esos lugares puede ser viable desde el punto de vista financiero mediante la recuperación de las materias primas restantes para reducir los costos de rehabilitación.

Los proyectos recomine emiten sistemas en tres tipos diferentes de sitios contaminados: (1) escombreras y vertederos mineros, (2) sistemas de agua del drenaje de la mina y de las filtraciones de relaves, y (3) montones de residuos industriales como escorias y cenizas. La industria y las instituciones de investigación de la recomine-alianza poseen un notable conocimiento en materia de automatización y tecnología de sensores, lo que permite establecer tecnologías de futuro y eficientes con la máxima eficacia. La historia de la minería y la metalurgia en las Montañas de Minería caracteriza a la región como un modelo ideal para el desarrollo de tecnologías ambientales orientadas a los recursos en plantas piloto y de demostración.

Referencias

- [1] European Commission, (2020): Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/En/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=En>
- [2] <https://globaltailingsreview.org/>, 29.09.2020
- [3] Büttner, P., Osbahr, I., Zimmermann, R., Leissner, T., Satge, L. & Gutzmer, J. (2018): recovery Potential of flotation tailings assessed by spatial modelling of automated mineralogy data, Minerals Engineering, Volume 116: 143-151; ISSN 0892-6875

Potencial de relaves

Instituto Helmholtz-Freiberg de Tecnología de Recursos, Philipp Büttner, Recomine

15.12.2020 - Online-Workshop: Re-mining de residuos

Desde el año 2012 recomine, una organización de networking en minería alemán, trabaja en proyectos en temas de tratamiento, tipificación de los relaves y su reproceso.

Las herramientas para análisis de los recursos potenciales son datos históricos de mapas, datos de drones con elevaciones digitales de superficies en base a las aplicaciones de cada dron. Junto con estos datos y la combinación de data de análisis mineralógica para obtener gráficos de modelos de presas de relaves, con las cuales se pueden identificar qué zonas son interesantes para su reproceso. Además, se puede entrar en detalle de los minerales para predecir cuantas toneladas de minerales se pueden recuperar de los relaves y cuáles son los comportamientos de los demás minerales y si se pueden usar por ejemplo para construcción.

El Helmholtz Institute for Resource Technology (HIF) es una comunidad de investigación enfocada en diferentes ramas como el campo de la energía, la materia, la salud. HIF es parte del campo de energía y recursos e investigan estos campos desarrollando nuevas tecnologías de investigación contribuyendo con la sostenibilidad, el crecimiento de la industria y además realizan entrenamientos a nuevas generaciones de profesionales en los campos de generación de recursos. Como instituto están fundados desde el año 2011 y actualmente tienen alrededor de 140 trabajadores de más de 25 países. Los sectores principales en los que trabajan son exploración, biotecnología, procesos físicos y procesos metalúrgicos. Como secciones transversales tienen la modelización y

la valoración, sistemas integrados de producción de metal y la analítica para tener la cadena de valor completa de la producción de metal. También se enfatiza el trabajo en la economía circular por lo que HIF trabaja en conjunto a otras empresas u organizaciones como lo es TheiaX Erzlabor para poder cumplir con todo el proceso de investigación. Recomine network está trabajando con todos los residuos mineros como aguas residuales, relaves, escorias y cenizas.

El instituto está ubicado en la región montañosa de Alemania en Baja Sajonia, una región rica en plomo, zinc, uranio, tungsteno, estaño y plata. La minería se realizó hasta los años 90 y posteriormente las minas se cerraron. Por este motivo existe gran cantidad de residuos de las actividades mineras, relaves, vertederos mineros y drenaje de ácido minero. Posterior a que las minas cerraran, las empresas se preocuparon durante estos 30 años en la limpieza y remediación de estos sitios, a causa de la gran cantidad de contaminación y además que es una zona altamente poblada. Gracias a estas zonas, recomine ha ganado bastante experiencia junto a sus demás socios en la remediación de los relaves.

En el año 2010-2011 en Europa y en Alemania se inició una gran carrera por los relaves nuevamente. La industria estaba mirando el mercado de los metales, el cual en ese momento contaba con muchos problemas y se dieron cuenta que existía un riesgo alto de abastecimiento de metales importantes. Con esta motivación les dieron una mirada importante a los diques de relaves y empezaron los programas de investigación de mineralogía y muestras de perforación. El objetivo era crear nuevas fuentes de materias primas críticas en Europa, sin depender de terceros países proveedores. Todos estos materiales son necesarios para las energías renovables, e-mobility y para el sector de defensa y espacial.

En las operaciones mineras, se realizan las exploraciones, los estudios geológicos, la perforación, estudios de previsibilidad, estudios de visibilidad. A cada paso los riesgos son bajos, pero los costos son altos al invertir en los estudios de abrir una mina. Siempre existe el riesgo de perder el dinero hasta abrir la mina por la existencia de problemas o errores. En cambio, con los relaves esto es diferente. En una etapa posterior se conoce el volumen del lugar, ya existen datos relevantes de la mina, se cuenta con el material en la superficie y si se hace una buena investigación en mineralogía de los relaves de las preases, se sabe qué esperar de los relaves, contenido y los metales que hay lo cual es relevante para calcular el riesgo y las oportunidades de ganancia. Hay bajo riesgo, pero también grados bajos.

Los riesgos en los relaves, en los Alpes por ejemplo, alta contaminación con metales pesados como lo son el arsénico, también con los drenajes de ácido de los relaves, ya que llevan los metales pesados a los ríos o agua. Este último punto de limpieza del agua también se tiene que considerar como costos monetarios. Además, hay que considerar que las normativas son cada vez más estrictas. Cosas que eran posible hace 40 años actualmente ya no lo son para la protección de estas comunidades. También existe riesgos de rotura y colapsos de presas. Por la explotación de uranio, también tuvieron problemas de emisiones de gas radón de los relaves radioactivos, muy peligrosos para la salud humana, causantes de enfermedades como el cáncer. En Alemania se realizaron todos los estudios para mejorar estas condiciones de relaves de uranio para mejorar las comunidades, lo cual también es una motivación del trabajo que se realiza a favor del medio ambiente.

En base en estos grandes accidentes, varias empresas mineras empezaron a tomar acciones en los relaves para que no volvieran

a pasar. Crearon la Global Industry Standard sobre la gestión de residuos, la cual fue publicada el año 2019 en Londres. Varias empresas trabajan en conjunto en una estrategia de “cero daño” para las personas y el medio ambiente. Actualmente tienen 15 principios y 77 objetivos a lo largo de todo el ciclo de vida de un relave y son más estrictos que la legislación nacional. Para poder cumplir con este propósito recomina que se considere que hay tres aspectos importantes a considerar. El primero es saber si hay un potencial general en metales y minerales de los relaves y si se pueden aprovechar. El aspecto social es otro aspecto importante el cual incluye la contaminación y la protección del medio ambiente. El último aspecto es el tecnológico, si se cuenta con buenos equipos y si esta tecnología puede extraer los metales de los relaves o limpiar los materiales tóxicos. Según la experiencia de recomina, cada relave es diferente en su potencial, tecnología y sociedad.

El potencial de los relaves no sólo son los elementos de valor, como están distribuidos en los relaves, la homogeneidad, la cantidad de los cambios de vertido y dónde hay áreas con material de grano grueso o grano fino. También es importante saber la cantidad de elementos tóxicos, ya que tienen que estar en depósitos especiales y también posteriormente en un almacenaje especial que se tiene que pagar. La mineralogía es de importancia de los materiales, la búsqueda de su liberación, el tamaño de las partículas y otros parámetros importantes que se quieren conocer y de acuerdo con la tecnología que se quiere usar. Otros aspectos importantes para considerar son los datos disponibles, los precios del metal, la infraestructura regional, el valor de la propiedad y los residuos aptos para material de construcción. Posteriormente se puede considerar los aspectos sociales y de medio ambiente. Se tienen que considerar la protección de la flora y fauna donde se encuentran los relaves, el uso de la tierra, la legislación nacional, si existiera monumentos históricos. Muchas

veces el problema más grande también es la aceptación de las comunidades y la titularidad de las propiedades.

Si se esclareció la mineralogía, el potencial, toda la data se puede definir un diagrama de flujo adecuado. Se pueden definir procesos de lixiviación química, biolixiviación, flotación, hidro metalurgia, pirometalurgia. Basado en la mineralogía se pueden modelar los procesos para ver los metales, los concentrados, definir el CAPEX o OPEX y además la compensación de costos.

Un ejemplo de mineralogía de relaves que conduce a un proceso óptimo es el Sulphidic Mine Tailing en Saxonia. Se realizaron varias investigaciones de mineralogía y metales. Se descubrió que había zinc e indio. Al mismo tiempo se descubrieron elementos tóxicos como el arsénico, arseno piryde y cadmio. Es importante saber el tamaño de granos y su distribución. En este caso existían pequeñas fracciones y granos gruesos con grandes cantidades de metales. Los elementos de interés se encontraban dentro de material sulfídico. Se usó la biolixiviación como la tecnología adecuada en este caso. Para este caso se ha creado como tecnologías un contenedor semi móvil (solución basada en contenedores), con el reactor de biolixiviación de extracción líquido-líquido con celda de electrólisis. Para todos los pasos anteriores se sugiere como el paso principal la mineralogía.

Resumen ley de cierre de minas en Chile

Asesorías ALM, Ana Luisa Morales

04.12.2019 - Workshop “Cierre de minas y remediación de pasivos ambientales”

En el año 2011 Chile no contaba con regulación específica de cierre de faenas mineras que exigiera una garantía financiera que asegurara al Estado, contar con fondos para cubrir los costos de mantener estables

las instalaciones mineras, en el caso que la empresa incumpliera total o parcialmente, sus obligaciones contempladas en esta ley.

Sin embargo, cabe señalar que, en el año 1994 con la promulgación de la ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, se establecieron las responsabilidades por daño ambiental y la necesidad de evaluar los impactos ambientales de los proyectos o actividades en todas sus etapas. Esto último, significó introducir la evaluación de impactos con posterioridad al cese de operaciones de los proyectos y la identificación de medidas de mitigación.

Teniendo en consideración que los proyectos de desarrollo minero son de larga vida útil y que, por lo general, el ingreso al SEIA (sistema de Evaluación de Impacto Ambiental) se efectúa en la etapa de ingeniería conceptual, en la práctica, los planes de cierre incluidos en los estudios (o Declaraciones) de impacto ambiental, han sido de carácter conceptual, e incluyeron definiciones de criterios ambientales que guiarían en el futuro el desarrollo de planes de cierre más acabados.

Si bien en el país se contaba con el Título X del Reglamento de Seguridad Minera D.S. N° 132, cuya modificación fue publicada en el Diario Oficial en el mes de febrero de 2004, en donde establecía un conjunto de normas destinadas a regular el cierre de faenas mineras. Sin embargo, el reglamento no abordaba la exigencia de garantías financieras que aseguraran al Estado los recursos económicos necesarios para implementar un plan de cierre, en caso de incumplimiento total o parcial del operador minero, por lo que existía la necesidad de exigir a las faenas mineras garantías financieras, para que estas permitieran al Estado hacerse cargo del cierre en caso de incumplimiento o abandono por parte del titular minero.

Existía una necesidad de una nueva regulación que pudiera abordar ciertos criterios como:

- La Ausencia de una normativa específica, que regulara los aspectos

negativos de la Industria Minera Extractiva.

- “El que contamina paga”. La empresa minera debe hacerse cargo de las externalidades, e incorporarlas como un elemento más dentro del negocio minero.
- Impedir la producción de nuevos Pasivos Mineros.
- Una garantía financiera que asegurara al Estado, el cumplimiento de las medidas de cierre comprometidas por la empresa.

La Ley 20.551 que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras (en adelante la ley o ley 20.551) fue publicada el 11 de noviembre de 2011 y entró en vigor a partir del 11 de noviembre de 2012, con la publicación del Reglamento de esta Ley D.S. N° 41 Aprueba Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones mineras.

El objetivo principal de la ley es prevenir, minimizar o controlar los riesgos o impactos negativos en la salud y la seguridad de las personas o el medio ambiente cuando ocurren situaciones como paralización temporal de las operaciones mineras o término de la vida útil de la faena. El plan de cierre es la principal herramienta establecida en esta ley y se define como el documento que especifica el conjunto de medidas y acciones que la empresa minera adoptará con el fin de lograr el cierre de su faena e instalaciones en forma ordenada, eficiente, progresiva y oportuna, dentro del marco jurídico vigente, y considerando objetivos propios y adecuados a las características de la faena minera y su entorno, así como una programación global y de detalle de las actividades y sus costos.

La ley 20.551 establece que la empresa minera no podrá iniciar actividades de construcción u operación, sin la aprobación por parte del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) del correspondiente Plan de Cierre.

El plan de cierre es crítico para la operación de las compañías mineras, ya que mientras no tengan la aprobación de sus respectivos planes, no podrán comenzar las actividades de construcción y operación de los proyectos mineros correspondientes.

En Chile desde el año 2008 el Servicio Nacional de Geología y Minería dio inicio al “Catastro Nacional de Faenas Mineras Abandonadas y/o Paralizadas”. Con esa iniciativa el Servicio comenzó el registro sistemático de faenas mineras abandonadas y paralizadas, incorporando una evaluación preliminar de riesgos en base a probabilidades y consecuencias. Desde el año 2008 y hasta 2016 se han levantado 653 faenas mineras abandonadas. Este era uno de los objetivos de la ley, impedir la generación de nuevos pasivos mineros.

La importancia de incorporar legalmente una garantía financiera radica en la necesidad de certeza legal y técnica para los inversionistas en minería, así como para los organismos fiscalizadores del sector. También en impulsar una planificación más integral en el sector minero, incorporando desde el inicio de la faena la planificación de su cierre.

El ámbito de aplicación de la ley 20.551 corresponde a la totalidad de las faenas de la industria extractiva minera en Chile, por lo que la totalidad de las faenas mineras debía presentar al SERNAGEOMIN un plan de cierre.

El plan de cierre corresponde a un documento que incorpora la ejecución de un conjunto de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos de se pudieran derivar del proceso de extracción y desarrollo de la industria minera extractiva. La ley busca asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones mineras remanentes.

Por lo anterior, el plan de cierre debe ser considerado como parte del ciclo de la vida útil de una faena minera, además, debe ser ejecutado por la empresa minera antes del término de sus operaciones, para que estas

medidas se encuentren implementadas antes del cese de la faena.

Una vez aprobado el plan de cierre, este obliga a la empresa minera a ejecutar la totalidad de las medidas y actividades contempladas en dicho documento, de acuerdo con los plazos fijados en dicho documento.

Los principales objetivos establecidos por la ley 20.551, corresponden a:

1. Ejecutar medidas destinadas a mitigar los efectos de la Industria extractiva minera.
2. Asegurar la Estabilidad Física y Química de las instalaciones remanentes, en los lugares en que se desarrolle la Actividad Minera.
3. Resguardar la Vida, Salud y Seguridad de las Personas y del Medio Ambiente.
4. Crear un Fondo Post-Cierre, que será administrado por SERNAGEOMIN, con el objeto de monitorear y mantener las instalaciones a perpetuidad de las Faenas Cerradas.
5. Establecer Garantías que resguardaran al estado, para hacerse cargo del cierre efectivo de las Faenas e Instalaciones Mineras, en caso de un abandono.
6. Evitar el Abandono después del cese de las Operaciones.

Si bien en Chile la minería se encuentra segmentada por pequeña, mediana y gran minería, la ley no estableció un tratamiento diferenciado según escala de explotación, entonces, todas las faenas mineras que se encontraban en operación en Chile a la entrada en vigencia de la ley debían cumplir con el compromiso de presentar y ejecutar el plan de cierre aprobado por SERNAGEOMIN.

La ley 20.551 para su aplicación estableció dos procedimientos de aprobación de plan de cierre, por lo que los documentos presentados a la autoridad se podían someter a la aprobación mediante el procedimiento de aplicación general o el simplificado. Además, esta ley es vinculante en varios de sus artículos con la ley ambiental (Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente), por lo anterior los procedimientos de aplicación tienen directa

relación con las definiciones establecidas en la ley 19.300.

La definición de los procedimientos de aplicación de la ley 20.551 son:

1. Procedimiento de aplicación general

Empresa minera o de beneficio cuya capacidad de extracción de mineral sea superior a las 10.000 ton/mes por faena.

2. Procedimiento simplificado

Aplicable a empresa minera cuya capacidad de extracción de mineral sea igual o inferior a las 10.000 ton/mes por faena.

Las principales diferencias entre estos procedimientos radican en la capacidad financiera de las empresas, esto se detalla en la ilustración 11.

Procedimiento Simplificado	Procedimiento de Aplicación General
Faenas no garantizan	Faenas que garantizan
No entregan fondo de post cierre	Entregan fondo de post cierre a perpetuidad

Ilustr. 11: Resumen Procedimiento de Aplicación Simplificado y General

Todo plan de cierre que se encuentre sometido al procedimiento de aplicación general, deberá incluir una garantía que asegure al Estado, en todo momento, la disponibilidad de fondos para cubrir, en forma exclusiva, los costos de las acciones, medidas y obras contempladas en el plan de cierre, cuando la empresa minera incumpla, total o parcialmente, las obligaciones contempladas en la ley.

En cuanto a las empresas mineras pequeñas sometidas al procedimiento simplificado, ellas no estarán obligadas a constituir garantía de cumplimiento de planes de cierre. En este rango de la minería el Servicio velará por el cumplimiento de las actividades programadas en el plan de cierre y por las que

el mismo disponga durante la operación de la faena minera, a través de un estricto programa de fiscalización y monitoreo.

Dada la larga data de los proyectos mineros y una forma de dar seguimiento al desarrollo y avance de los diferentes proyectos, los planes de cierre acogidos al procedimiento de aplicación general, deben ser auditados cada cinco años por un auditor externo, inscrito en el registro del SERNAGEOMIN, con el objeto de certificar al servicio la adecuación, cumplimiento del contenido del plan de cierre y de su actualización, así como el cumplimiento de las garantías y la programación de la ejecución de los cierre de forma de velar por la implementación y el avance efectivo del proyecto minero.

La ley además estableció que, con el fin de controlar la situación posterior de las faenas cerradas, se creó el fondo de post cierre, cuya finalidad es financiar las medidas de seguimiento y control, de forma de mantener las medidas de cierre de las instalaciones remanentes a perpetuidad, el fondo será administrado por el Servicio.

La Ley que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras de 2012 fortaleció la reglamentación de los desechos mineros y amplió las responsabilidades ambientales, lo que sin duda constituyó un paso importante para prevenir la existencia de faenas abandonadas en el futuro.

El principio del desarrollo sostenible emerge como un paradigma, que equilibra los objetivos económicos, sociales y ambientales de la sociedad, y presenta el desafío de garantizar las necesidades de las generaciones futuras con equidad social y respeto por el medio ambiente.

Este proceso hacia el desarrollo sostenible está en constante evolución y ha desempeñado plenamente su papel en la agenda internacional, y es cada vez más utilizado para la toma de decisiones, a nivel mundial, regional y local por los diferentes países.

Además, se debe considerar el exigente mercado internacional que, de no incorporar la totalidad de los costos de la demanda de la producción minera, podría conllevar un riesgo importante al que Chile y cualquier país verse enfrentado ante una competencia de otro país que si lo ha hecho. De aquí nace la importancia de una regulación asociada al cierre de faenas, con el objeto de considerar el cierre como parte de la planificación minera y a internalizar los costos de cierre por las faenas, de modo que sus operaciones no afecten negativamente a la población y al medio ambiente terminada la vida útil de la faena minera. además, busca la no generación de pasivos mineros y que el titular minero asuma la responsabilidad económica por las acciones generadas.

Sin embargo, este es un primer paso y aún tienen desafíos importantes en materia de cierre que debe considerar, como la remediación y la planificación territorial.

Para más información sobre la experiencia de ley de Cierre de Chile, puede visitar la página web de la CEPAL, donde se encuentran un documento con un extenso análisis de la ley 20.551: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45931-historia-aplicacion-analisis-la-ley-num-20551-que-regula-cierre-faenas>

Programa Tranque

Fundación Chile, Dr. Ing. Carla Calderón Rosas

04.12.2019 - Workshop “Cierre de minas y remediación de pasivos ambientales”

Programa Tranque es una iniciativa público-privada que busca contribuir a la operación segura y confiable de los depósitos de relaves, desarrollando herramientas para mejorar el monitoreo de la estabilidad física y el potencial impacto en las aguas circundantes, poniendo a disposición información de calidad, confiable y oportuna a autoridades,

compañías mineras y comunidades, mejorando así la comunicación entre las partes y la respuesta ante situaciones de emergencias.

En 2018 esta iniciativa tomó un nuevo impulso al ser considerada dentro del Plan Nacional de Relaves anunciada por el Ministerio de Minería, que dentro de sus pilares considera la implementación de herramientas para la gestión de depósitos activos aportando a la creación del Observatorio Nacional de Depósitos de Relaves.

La iniciativa pública-privada, bajo el alero del Programa Nacional de Minería Alta Ley, es co-diseñada e implementada por Fundación Chile, Corfo, Ministerio de Minería, Sernageomin, ONEMI, SMA, DGA, Antofagasta Minerals, BHP, Codelco, Anglo American, ENAMI, SONAMI INRIA Chile, AMTC y Valor Compartido.

Experiencias de Europa, Perú y Chile en el cierre de minas:

El cierre de minas y actividades de remediación en Alemania y Europa

Fichtner Water & Transportation GmbH Sucursal Perú; Nikolaus Linder & Victor Velasco, Perú

5. & 6.12.2018: Workshop Peruano-Alemán: “Experiencias y Buenas Prácticas en el Cierre de Minas de Alemania”

Introducción al cierre de minas y la remediación

Los impactos de las actividades mineras deben examinarse bajo el aspecto de las actividades subterráneas y de las actividades a tajo abierto.

Los impactos directos de las actividades de minería subterránea son*:

- Hundimiento
- Derrumbes
- Emisión de gases
- Descenso y contaminación del nivel del agua subterránea
- Perturbación de la dirección del flujo de ríos y arroyos, etc.
- Terremotos

Los impactos indirectos son*:

- Vertido de relaves, desechos, residuos*:
- Transformación del paisaje
- Uso de la tierra
- Condiciones de las aguas subterráneas y superficiales
- Montones de desechos y relaves
- Emisión de ruido
- Emisión de polvo
- Deslizamiento de tierra
- Montones de desechos y lagos a cielo abierto
- Considerando el futuro uso/ utilización de la zona

Los impactos de los montones de desechos y relaves mineros son*:

- Inestabilidades de presa
- Lixiviación y AMD
- Estabilidad y deshidratación

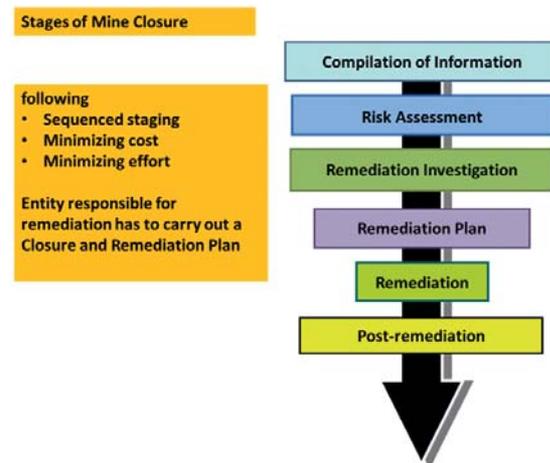
Para la remediación se identifican numerosos promotores*:

- Las preocupaciones medioambientales como promotor – Directivas de la UE
- Responsabilidad de pagar el costo
- Relaciones públicas e inquietudes sociales
- Conversión de los sitios mineros cerrados para obtener nuevas áreas para un mayor desarrollo

* entre otros

Remediación y uso de seguimiento de las zonas mineras

La Autoridad Minera del estado de Renania del Norte- Westfalia en Alemania persigue el siguiente concepto de cierre de minas, definido en un plan de aprobación individual para las operaciones:



Ilustr. 12: Concepto de Cierre de Minas

Gestión de riesgos para la minería histórica

La Autoridad del estado de Renania del Norte- Westfalia en Alemania es responsable de la eliminación de los peligros causados por las aberturas de las minas históricas abandonadas. Las aberturas de minas históricas son estructuras mineras subterráneas y son latentemente peligrosas.

Pero la autoridad sólo puede actuar en caso de un peligro preciso o presente.

La Autoridad de Minería tiene una responsabilidad por sus instalaciones, responsabilidades por la operación minera histórica sin responsabilidad de la persona o el propietario. En una evaluación jurídica se recomendó la aplicación de una gestión de riesgos para las estructuras mineras históricas peligrosas.

Con estos antecedentes, la autoridad minera ha establecido una gestión de riesgos para los sitios mineros históricos. Las objeciones son:

- Prevención de lesiones personales y daños materiales o a la propiedad
- Garantía de la mejor seguridad disponible para la población
- Transparencia de los procedimientos y decisiones
- Enfoque sostenible y programado para la investigación preventiva y las medidas de reparación
- Garantía de la utilización efectiva del dinero de los impuestos

Garantía financiera para las medidas de remediación

Europa ha establecido una directiva de residuos de minas para aplicar disposiciones adecuadas mediante la suspensión de una garantía financiera o equivalente para evitar daños ambientales y paisajísticos tras el cierre de una operación minera.

Un plan de cierre, que incluye un plan de gestión de residuos y un programa de rehabilitación, debe ser presentado y aprobado por la autoridad competente antes de la eliminación de residuos en el sitio. Para garantizar que se lleven a cabo los trabajos de cierre y rehabilitación adecuados, también será obligatorio que el operador de la mina proporciona una garantía financiera, p.ej. en forma de depósito financiero, incluidos los fondos de garantía mutua patrocinados por la industria o equivalente para este propósito.

Aspectos sociales y relaciones públicas

El propósito de una ESIA (Evaluación de Impacto Ambiental Social) es identificar los impactos positivos y negativos causados por la implementación del proyecto. Esto se evalúa mediante un análisis de los efectos resultantes de la interacción entre los componentes ambientales y sociales y las diversas actividades de un proyecto y su desarrollo.

La experiencia ha demostrado que cuando se busca una discusión abierta con las partes interesadas en una etapa temprana, el nivel de propiedad y participación aumenta sustancialmente y se reduce el riesgo de disenso al presentar la solicitud de planificación (respaldada por la EIAS – www.wbcsd.org).

Gestión del agua y juntas intermunicipales

“Emscher-genossenschaft” es la junta de agua pública más antigua y grande de Alemania, ubicada en Essen (Renania del Norte -Westfalia, Alemania) y responsable por la cuenca de captación de 865km² de Emscher con 2,2 millones de ciudadanos. Las principales tareas de la junta de agua son la descarga y el tratamiento de aguas residuales, la protección contra inundaciones, la gestión de las aguas subterráneas, la resolución de reclamaciones causadas por la minería de carbón, la restauración de los ríos y la protección de ecosistemas.

A lo largo de Emscher y sus afluentes, el olor pútrido, el agua contaminada y las inundaciones no solo frenaban el desarrollo económico, sino que causaban enfermedades y epidemias como el tifus y la malaria. A partir de 1885, las iniciativas legislativas comenzaron a desarrollar soluciones para toda la cuenca y finalmente en 1899 las empresas mineras, los actores industriales y los alcaldes de las ciudades en crecimiento establecieron la Emscher-genossenschaft para organizar el drenaje de agua regional.

Lo valioso de una junta de agua intermunicipal se puede ver en el nuevo Megaproyecto

Emscher. Dentro de su programa de 4.500 millones de euros, las aguas residuales se tratan y el Emscher volverá a ser natural.

El principio de una junta (de agua) en el siglo XXI sigue siendo una autoridad para resolver tareas /problemas de infraestructura intermunicipales.

Ejemplo: Diseño técnico detallado para el tratamiento de aguas ácidas de la mina Novo Brdo Mine, Artana / KOSOVO

El complejo Trepça Mining & Metallurgical en Kosovo sirvió como columna vertebral de la economía de Kosovo en el pasado, ya que la minería era la industria principal de Kosovo. Una de las minas pertenecientes al Grupo Minas Trepça es la mina de plomo (Pb) y zinc (Zn) en Artana /Novo Brdo, ubicada al este de Prishtina, algunas operaciones mineras aún continúan.

El propósito de este proyecto fue preparar un diseño técnico para el tratamiento del drenaje ácido de la mina en la salida de un terraplén, para neutralizar la acidez y eliminar el flujo de metales pesados y otros contaminantes al río aguas abajo, para eliminar un significativo origen de contaminación por metales pesados y otras obras de remediación.

A primera fase fue crucial para determinar el origen de los contaminantes, la extensión y los flujos de agua contaminada. Esto es importante para determinar la metodología de la remediación, la ubicación más adecuada, basada en un análisis multicriterio.

Con base en estos datos, también se han hecho recomendaciones con respecto a qué tecnología se recomienda utilizar para el tratamiento del drenaje ácido de la mina. La selección de la tecnología de tratamiento en cooperación con el Cliente y la Autoridad puede causar conflictos con respecto a la viabilidad financiera del proyecto.

Ejemplo: Rehabilitación del complejo minero de carbón Vihovići, Mostar

La ciudad de Mostar se encuentra en el sur de Bosnia y Herzegovina. En las afueras de

la ciudad (Vihovići), se explotó lignito en minería subterránea y a tajo abierto desde mediados del siglo XIX. Desde la década de 1980, gran parte del área de explotación se sobreconstruyó mediante la expansión de áreas residenciales.

Fichtner llevó a cabo la ingeniería para estabilizar geotécnicamente el pozo restante que contiene una magnitud de pendientes de gravedad, para mejorar las condiciones ecológicas, para minimizar el potencial de autoignición del carbón subterráneo mediante el sellado de la superficie y para preparar el área para su reutilización. El proyecto fue financiado por el KfW.

El monto del presupuesto disponible, así como las restricciones especiales y geotécnicas dieron como resultado el diseño de bancos y pendientes que dan pocas o ninguna posibilidad de desarrollo futuro en términos de área de construcción.

Utilización combinada de minerales estratégicos y materiales de construcción de los relaves – Oportunidades y riesgos desde el punto de vista tecnológico, ambiental y económico

Helmholtz-Institute Freiberg for Resource Technology, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Stefan Dirlich

06.10.2020 - Charla online: Propuestas para una minería sustentable a gran escala

En el siguiente texto se resumen los resultados del Proyecto de investigación polaco-alemán “NOvel hybrid MEthod for COPper Recovery” (NOMECOR). El Proyecto fue financiado por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo (NCBR) por la parte polaca y el Ministerio de Ciencia y Educación de Alemania (BMBF), en el marco del plan de financiamiento STAIR-II, y lo llevó a cabo un consorcio integrado por dos socios polacos y tres alemanes: GEOS,

Freiberg (GER), Hydrogeomet (PL), HZDR (GER), Instituto de Metalurgia No Férrea (PL) e Instituto de Tecnología de Karlsruhe (GER).

Introducción

Los relaves son enormes restos de actividades de minería y/o procesamiento de minerales y suponen una posible amenaza ambiental que contiene numerosas sustancias peligrosas. No obstante, al mismo tiempo los relaves pueden considerarse como existencias de elementos valiosos que pueden recuperarse potencialmente.



Ilust. 13: Sección del estanque Zelazny Most (Photo: Stefan Dirlich)

El Proyecto NOMEOR tenía por objeto desarrollar un método híbrido innovador para recuperar el cobre de los relaves y utilizar simultáneamente los compartimientos minerales del material como insumo de la producción de cemento. El alcance del proyecto no solo era desarrollar posibles tecnologías para la recuperación y utilización de objetos valiosos y minerales, sino también evaluar esas tecnologías en función de su riesgo tecnológico, así como de sus repercusiones económicas y ecológicas. El alcance del proyecto no sólo era desarrollar posibles tecnologías para la recuperación y utilización de objetos valiosos y minerales, sino también evaluar esas tecnologías en función de su riesgo tecnológico, así como de sus repercusiones económicas y ecológicas. Los objetivos del proyecto eran los siguientes.

Los procesos (bio)-hidrometalúrgicos deberían seguir desarrollándose para mejorar la recuperación de los minerales del material de

desecho, ya sea mediante el procesamiento hidrometalúrgico convencional o mediante procesos biotecnológicos. Para la recuperación de las partes minerales (como aditivo en la producción de cemento) deberían desarrollarse las etapas del proceso. Además, se debía compilar un concepto de gestión para la revitalización y recuperación de los relaves de la flotación secundaria, así como evaluar el potencial de Alemania y Polonia. Por último, debían reducirse al mínimo los riesgos ambientales que emanaban de los relaves, así como reactivarse a largo plazo la superficie cubierta por los mismos para mejorar el uso de la tierra.

Estudio

El estanque de flotación ha sido utilizado como depósito desde 1977. A finales de 2018, la masa almacenada de material de desecho ascendía a un millón de toneladas o 635 millones de m³, y el estanque alcanzó una altura de 186 metros sobre el nivel del mar. Es necesario encontrar otras soluciones para el almacenamiento del material en el futuro, ya que el permiso existente sólo es válido para otros nueve metros.

Procesos de recuperación del cobre y otros minerales valiosos

El socio Hydrogeomet se encargó de la toma de muestras y preparó once perforaciones de cero a diez metros de profundidad y once excavaciones exploratorias. Estas se analizaron en cuanto a su composición mineralógica y se prepararon para su entrega a los demás socios, que posteriormente llevaron a cabo nuevas investigaciones y experimentos relativos a la recuperación de elementos valiosos y la eliminación de sustancias peligrosas.

Experimentos hidrometalúrgicos

Se realizaron experimentos hidrometalúrgicos en forma de frascos con material de desechos homogeneizados sin tratar, residuos de lixiviación en columna y residuos de lixiviación en tanque. El objetivo principal era recuperar

el cobre y otros objetos de valor, así como eliminar las sustancias peligrosas.

Los mejores resultados de lixiviación se encontraron en la lixiviación de amoníaco con concentrado, aire comprimido y arena, incluida una adición repetida de solución de amoníaco con un tiempo de lixiviación prolongado. Como parece que la lixiviación amoniacal es adecuada para la lixiviación de cobre a partir de concentrado de flotación, y el agente de extracción LIX-84 es selectivo para el cobre. En base a estos resultados se desarrolló un diagrama de flujo para los pasos del proceso hidrometalúrgico.

Biolixiviación

Para desarrollar un concepto biohidrometalúrgico, se realizaron experimentos en frascos agitadores con un 5% de sólidos con muestreo a los 3, 6, 10 y 14 días. Como agente lixivante sirvió de medio para el cultivo y el *Thiobacillus thioparus*. Las bacterias interactuaron directamente con los sólidos (en contraste con *Y. lipolytica*) y oxidaron el contenido de azufre reducido. Los resultados muestran que *T. thioparus* lixivió un 8% de cobre y un 5% de arsénico después de 6 días, pero que las cantidades no difieren mucho de las que sólo tienen el medio. En principio, el proceso que debería ocurrir es que se produzca un intercambio de iones metálicos con iones de agua, seguido de una formación compleja con metabolitos orgánicos y, por último, la hidrólisis del material y la movilización del metal fomentada por bacterias u otros microorganismos. Sin embargo, en este caso no se encontraron e investigaron los correctos, pero como el número de microorganismos es enorme, se da el potencial, y es necesario seguir investigando para detectar aquellas bacterias que se adapten a las condiciones específicas.

Producción de cemento a partir de partes minerales

El instituto de Tecnología de Karlsruhe se encargó de la elaboración de las etapas de

procesamiento relativas a la utilización de los compartimientos minerales.

El material de desecho se destinó como material de entrada en la producción de cemento. Para investigarlo, se realizaron experimentos de calcinación. Además de la prueba de la viabilidad principal, el objetivo de los experimentos era principalmente la identificación de parámetros para una calcinación optimizada. Como muestra la investigación, la temperatura óptima está entre 950 y 1.000 °C con un tiempo de calcinación de más de 30 minutos. La cantidad de mineralizante (Na_2CO_3) que se debe añadir es del 5% en el caso óptimo, mientras que la atmósfera de gas debe contener más del 90% de CO_2 . Debido a la composición del material de desecho es imposible evitar la limpieza de elementos contaminantes como el CO_2 y el Hg, lo que conlleva un aumento significativo de los costos generales del procesamiento.

Evaluación tecnológica y económica-ecológica

La evaluación implicó un análisis de las posibilidades, potenciales y riesgos de la tecnología de recuperación. Se consideraron las tecnologías de recuperación de metales estratégicos (cobre, etc.) y la producción de un residuo que sea adecuado como materia prima para material de construcción que contenga las menores cantidades posibles de sustancias peligrosas y perturbadoras. En cuanto a la evaluación ecológica económica, los asociados prefirieron una comparación más sencilla que una evaluación del ciclo de vida real. Al final, los ingresos de la prospección se oponían a los costos de procesamiento (disminución, separación, enriquecimiento). Sin embargo, cabe señalar que, en realidad, una evaluación sería más compleja si incluyera otros aspectos como el consumo de agua, el consumo de energía, los productos químicos y los costos de procesamiento, por ejemplo. En principio, el proceso es factible, pero el reto consiste

en adaptar la tecnología para que sea económica.

Concepto de implementación

Por último, como la situación económica no permitía realmente la aplicación del proceso originalmente desarrollado, los científicos de la RMI rediseñaron ligeramente los diagramas de flujo para unir la viabilidad técnica con la economía reduciendo los esfuerzos. El material separado en fracciones finas y gruesas no se utilizará en la producción de cemento en este concepto, pero la fracción fina se utilizará como material de construcción directamente. Este enfoque reduce en gran medida los costos de procesamiento, pero aún tiene un beneficio aparte de la recuperación de elementos valiosos del material de desecho. El uso como material de construcción permite que el estanque de flotación sea más alto, y la deposición de material puede extenderse por algunos años más antes de que el estanque se cierre.

Conclusiones y perspectivas

Los resultados científicos del proyecto demostraron que, en principio, tanto la recuperación de objetos valiosos como el cobre es tecnológicamente factible como la tecnología para hacer uso de las partes minerales del material de desecho está funcionando. Sin embargo, las limitaciones económicas dificultan la aplicación de las tecnologías propuestas originalmente. No obstante, al final los asociados elaboraron un concepto ligeramente diferente para la aplicación que aún cumplía los objetivos previstos. La aplicación de este concepto podría abordarse en un futuro más cercano, ya que asegura el uso más prolongado del depósito además de la utilización de objetos de valor.

Estrategias de economía circular para el cierre de minas y remediación ambiental en la minería peruana

Golden Growing S.A.C., Ing. Ben Ricaldi Tinoco, PMP®, CEO

10.12.2020 - Minera sustentable

1. Introducción

Uno de los retos de la minería en el Perú y a nivel mundial es conseguir el desarrollo sostenible a largo plazo, mediante un equilibrio entre lo económico, social y ambiental. Por lo cual, el planeamiento del cierre de minas desde la etapa de estudios hasta el cierre definitivo es de vital importancia para conseguir dicho fin.

De otro lado, la remediación de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) es una problemática mundial en todos los países donde se ha desarrollado la minería, puesto que la falta de tecnología ambiental, inadecuado manejo operativo y débil normativa ambiental en el pasado, han generado por muchos años repercusiones que afectan al ecosistema y la salud de las poblaciones.

Ante esta situación, se requiere de estrategias innovadoras en las Empresas y el Estado que fomenten la implementación de políticas de economía circular para reducir y reaprovechar los residuos y efluentes que se generan en todos los procesos de la actividad minera.

2. Principales problemáticas para el cierre de minas y remediación ambiental de PAM

Existe una marcada diferencia entre el cierre de minas y la remediación ambiental de PAM, dado que una empresa minera está obligada a cumplir altos estándares de calidad ambiental en la construcción, operación y cierre de la mina. No obstante, en el caso de la remediación de PAM, la mayoría se encuentran en condiciones de inestabilidad y vienen causando daños al medio ambiente. Sin embargo, en ambos casos se comparte

problemáticas similares en cuanto a los siguientes aspectos:

2.1. Relaves con potencial de generación de aguas ácidas

Debido al contenido de minerales sulfurados como la pirita en los relaves y la presencia de agua por lluvias, dichos componentes mineros generan aguas ácidas, que en su mayoría contienen metales pesados de forma disuelta o en suspensión, los cuales requieren de tratamiento para evitar impactos en cuerpos de agua como ríos, manantiales y lagunas. De otro lado, en algunos casos dichos residuos aún presentan contenido metálico con valor económico, lo que significa un reto para su reaprovechamiento.

2.2. Escases de top soil

En la mayoría de los casos donde se proyectan actividades de revegetación para el cierre de componentes mineros, se requiere de “top soil” para su ejecución. No obstante, tanto para el cierre de minas como en la remediación de PAM existe una escasez de dicho material, el

cual nos conduce a la utilización de canteras de top soil (suelo orgánico), dentro del ámbito de influencia del proyecto. Dicho aspecto genera mayores costos de cierre e impactos ambientales al disturbar nuevas áreas para remediar otras.

2.3. Altos costos para el tratamiento de aguas mina

La mayoría de las minas en la actualidad cuentan con plantas de tratamiento de agua, los cuales son esenciales para mitigar los impactos de la actividad, dichos costos son cubiertos por la operación minera durante su vida útil. No obstante, en la fase de post cierre dichos costos podrían ser poco sostenibles, debido a que en la etapa post cierre no se perciben ingresos y es necesario cubrir de forma permanente los costos operación y mantenimiento. Del mismo modo en el caso de los PAM resulta poco viable para el estado construir y cubrir altos costos de mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas de mina bajo tecnologías convencionales a largo plazo.



Ilust. 14: Fuente: Fotos referenciales - Proyecto Relavera Tambomayo (<https://sanmartin.com/proyectos/construccion-de-deposito-de-relaves-%EF%AC%81tradostambomayo/>) – Gráfico elaboración Propia

En función a los problemas expuestos se requieren de estrategias y políticas innovadoras para hacerle frente a dichos retos, los cuales, en caso de no abordarse de manera adecuada, serán un obstáculo para lograr el desarrollo sostenible de la minería a largo plazo, asimismo, ponen en riesgo el medio ambiente para las futuras generaciones.

3. Estrategias de solución

En función a las problemáticas expuestas la adopción de políticas de economía circular nos brinda una puerta de oportunidades para conseguir los objetivos de desarrollo sostenible de la minería a largo plazo, a continuación, describimos algunas de estas estrategias:

- **Reaprovechamiento de relaves con valor económico**

Usando ciencias como la geo metalurgia a depósitos de relaves, podemos encontrar el método técnico y económico más viable para recuperar metales valiosos, un ejemplo de ello es la Minera Los Rosales ubicado en la región de Puno en Perú, que actualmente viene emprendiendo un proyecto para el reprocesamiento de relaves antiguos considerados como PAM por el estado donde se

viene recuperando el contenido de Oro de los relaves.

- **Separación de completa de sulfuros de relaves**

En base a procesos metalúrgicos de flotación se pueden reprocesar los relaves con el fin de separar por completo la pirita y demás minerales sulfurados para obtener relaves no generadores de acidez y así puedan tener otros usos en la industria. Este es el caso de la Empresa Minera Nexa Resources en su Unidad Minera Cerro Lindo, donde vienen desarrollando una tecnología para separar por completo la pirita de sus relaves para obtener baritina el cual tiene utilidad en otras industrias; asimismo, ahorra espacio e incrementa la vida útil de la relavera debido al proceso de filtrado previo.

- **Uso de energía fotovoltaica en el tratamiento de aguas de mina**

El uso de energía renovable en minería se viene volviendo atractiva para complementar su actividad. No obstante, en el caso del cierre de minas y la remediación de PAM se vuelven una opción importante con el fin de reducir los costos de energía



Ilust. 15: Fuente: Fotos MIRECO (www.mireco.or.kr) – Elaboración Propia

- en la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento en su etapa post cierre. Este es el caso de la empresa Mine Reclamation Corporation (MIRECO) de Corea del Sur, la cual utiliza energía fotovoltaica en todas sus plantas de tratamiento de aguas ácidas en combinación con tratamientos pasivos (biotecnología), los cuales fueron originadas por ex minas de carbón, la tecnología de energía adoptada brinda una reducción de costos de más de 20 % con respecto al uso de energías convencionales en la etapa post cierre, la misma que viene acompañada de un sistema de automatización para un mejor control operativo.
- **Creación de suelos artificiales a partir de residuos de comedores mineros**
Mediante la optimización y uso de nuevas tecnologías en la gestión de residuos sólidos orgánicos que genera un campamento minero, se puede obtener compost y abono orgánico, los cuales al ser combinados con material estéril de los mismos relaves reprocesados libres de sulfuros, se pueden crear suelos con la capacidad de reemplazar al top soil requerido en la etapa de cierre para la revegetación de áreas impactadas. Un proyecto que viene siendo estudiado en su etapa de pilotaje es el caso de la Empresa minera La Zanja, la cual en base a desechos orgánicos disponibles de la zona viene creando tecnosoles para utilizarlos en el cierre de minas.
 - El desarrollo de tecnologías de reprocesamiento de relaves para recuperar metales valiosos y separación completa de sulfuros en relaves, tanto en la minería actual y remediación de PAM, son ejemplos que demuestran la viabilidad de adoptar políticas de economía circular en la actividad minera.
 - El uso de energía fotovoltaica en la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas de mina contribuye a la reducción de costos en la etapa post cierre, este tipo de tecnologías son de vital importancia en el caso de los PAM, dado que el Estado tiene limitados recursos para su mantenimiento a largo plazo.
 - La creación de suelos artificiales usando los mismos residuos que genera la actividad minera, nos brindan un triple beneficio dado que se utilizan los residuos orgánicos de los comedores mineros, se pueden reutilizar relaves libres de sulfuros previamente tratados y realizar la revegetación de áreas en la etapa de cierre o remediación ambiental.
 - Finalmente, se puede concluir que la adopción de las diferentes estrategias expuestas para el cierre de minas y remediación ambiental de pasivos mineros nos acerca a la adopción de una política de economía circular en la actividad minera en el Perú, el mismo que contribuirá a alcanzar un medio ambiente adecuado para las futuras generaciones.

Conclusiones

- En función a la problemática expuesta, es de vital importancia adoptar políticas de economía circular en las empresas mineras y el estado, con el fin de encontrar tecnologías efectivas para el cierre de minas y remediación ambiental de PAM, los cuales contribuyen a conseguir el desarrollo sostenible de la minería a largo plazo.

Estudio comparativo de experiencias positivas en la gestión de sitios contaminados (2017-2019)

H. Domsch, GKZ Freiberg e.V.; J. Bongärts, TU Bergakademie Freiberg; B. Alger y E. Casals, CDM Smith Consult GmbH; R. Giese y T. Roth, DGFZ e.V.; R. Nindel, ibes AG

06.10.2020 - Charla online: Propuestas para una minería sustentable a gran escala

Objetivos

El sector minero es fundamental para los países de la Región Andina (Bolivia, Chile, Ecuador, Colombia y Perú), debido a que las materias primas son sus principales productos de exportación. No obstante, la minería ha generado conflictos sociales debido al uso de métodos de extracción perjudiciales para el medio ambiente, al poco involucramiento de los pueblos indígenas y a la gestión poco transparente de los escasos recursos del sector público. Un enfoque de „no hacer nada“ en el contexto del cierre de minas ha contribuido a una mala reputación de la minería, especialmente en la población afectada. Ante esto, el sector minero debe recuperar credibilidad, ya que juega un papel clave en la implementación de la Agenda 2030 para el desarrollo social y económico sostenible en la Región Andina.

En la Región Andina existen numerosos Pasivos Ambientales Mineros (PAM), que están asociados con riesgos para el medio ambiente y la población. Para hacer frente a este problema, las autoridades necesitan modelos adecuados de financiamiento, estructuras y mecanismos sólidos de coordinación, así como los conocimientos técnicos necesarios. En este contexto, el objetivo de GIZ (Asociación Alemana para la Cooperación Internacional) y el BGR (Instituto Federal Alemán de Geociencias y Recursos Naturales), es dar soporte técnico a activar y desarrollar un marco conceptual para guiar las actividades mineras nacionales a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El estudio del GKZ (Centro de

Geocompetencia de Freiberg, Alemania) está dirigido a asesorar a los países de la Región Andina junto con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas.

Metodología y estructura

El método del estudio es la comparación de experiencias exitosas en el manejo de los PAM en Europa y América del Sur. El estudio se basa en los ODS de la Agenda 2030 y sus indicadores. Se examinaron seis casos de estudio (Chile Lo Aguirre, Perú Colquirrumi, Irlanda Avoca, Montenegro Podgorica KAP, Alemania Lichtenberg y Rammelsberg).

Los seis casos de estudio seleccionados muestran la diversidad de estrategias en cuanto a la obtención de licencias y autorizaciones, medidas técnicas y de ingeniería desarrolladas, así como los aspectos medioambientales, sociales y económicos. Basado en la variedad de condiciones y metodologías aplicadas en estos casos, el análisis rescató que se encontró en cada caso una solución particular y adecuada a su complejidad. Además, es frecuente que las soluciones de carácter sostenible no fueron encontradas en la primera fase de planificación del proyecto, sino que se han ido desarrollando y evolucionando a medida que avanzan los trabajos de remediación. No obstante, las soluciones encontradas requieren una verificación específica de viabilidad y adaptabilidad relacionada al uso posterior del sitio remediado.

Resultados

Cada uno de los casos es único en el detalle de sus soluciones de remediación aplicadas, pero tienen en común características comparables en sus respectivos puntos de partida, como, por ejemplo, que la explotación minera finalizó según el plazo previsto o de manera prematura, debido principalmente al agotamiento de los yacimientos o a cambios en la situación económica o política.

Normalmente, la actividad minera deja sitios con elevados riesgos e impactos ambientales y sociales negativos, que muchas veces no son asumidos bajo la responsabilidad de las empresas mineras. La legislación hoy en día exige una previsión de fondos o garantías para la remediación de los PAM antes del inicio de las actividades mineras. Es importante considerar en la remediación de PAM la necesidad de instituciones gubernamentales proactivas, capacitadas que puedan cumplir con su rol en la supervisión y fiscalización. En algunos casos, fue necesario que el Estado adquiriera las propiedades mineras con el fin de asumir la responsabilidad del (antiguo) operador. Los casos de Lo Aguirre y Colquirrumi muestran como el operador minero pudo asumir su responsabilidad con éxito.

Para desarrollar un concepto de remediación es necesario conocer la situación local de los PAM, y por ello el conjunto de medidas a implementar está determinado por los objetivos ambientales y sociales que se quieren lograr con la remediación. Si se anteponen otros objetivos (por ejemplo, la preservación del sitio como patrimonio cultural) pueden surgir conflictos que podrían arriesgar la viabilidad económica de la remediación. Otro aspecto importante es que la planificación inicial para la ejecución de la remediación muchas veces debe corregirse o ampliarse, con el consecuente efecto en los costos y las medidas de control. El estudio muestra que los planes de remediación pueden cambiar con el avance de la implementación de medidas, y por ello, es indispensable considerar las lecciones aprendidas durante la ejecución de la remediación y aceptar un transcurso con cambios.

Como el financiamiento se aseguró típicamente después del cierre y no a través de la creación de reservas o garantías financieras durante la operación minera, es de suma importancia para una exitosa remediación que el financiamiento esté asegurado desde un principio. El caso de Lichtenberg en Alemania se distingue de los demás, porque las

medidas de remediación fueron financiadas con importantes fondos estatales a base de una decisión política (reunificación de Alemania). Esta forma de financiamiento difícilmente puede replicarse. Colquirrumi en Perú es particular, ya que las medidas de remediación fueron financiadas por la empresa minera privada. Asimismo, en Lo Aguirre en Chile la empresa minera financió la remediación mayormente con los ingresos del reaprovechamiento de minerales de relaves.



Ilust. 16: Instalaciones de gestión hidráulica del lago post-minero de Zwenkau, Alemania



Ilust. 17: Ceremonia de cierre de la excursión de 2018 en la GIZ, Berlín

Después del cierre de las operaciones mineras es necesario garantizar un uso posterior del sitio a largo plazo, a partir del cual se deben trazar los objetivos de la remediación de los PAM. Las opciones son hasta ahora bastante limitadas y se centran en la recuperación del medio ambiente, algunas veces combinadas con un uso turístico-recreativo o industrial, como por ejemplo para las energías renovables.

Los casos de estudio muestran diferentes enfoques en el manejo y gestión de la participación e involucramiento de los actores interesados y, en consecuencia, se obtienen resultados

y planteamientos muy distintos desde el punto de vista de la sostenibilidad. Por un lado, la ejecución de las medidas de remediación necesarias puede interpretarse como un mero servicio de ingeniería, mientras que otras medidas requieren una gestión integral que involucre a todas las partes para lograr la aceptación y adopción de las medidas planificadas. El análisis comparativo de los casos ofrece un panorama muy heterogéneo en cuanto a la necesidad, la importancia y el alcance de la gestión de los actores involucrados.

Desafíos y oportunidades en la rehabilitación de pasivos ambientales mineros (PAM): Experiencias del proyecto MinSus en Chile y Perú

BGR, Mag. rer. nat. Achim Constantin

09.12.2020 – Rehabilitación minera - cierre de minas y potencial para la minería secundaria en Chile y Perú (alemán)

Presentación del proyecto MinSus

El proyecto “Cooperación regional para una gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos (MinSus)”, es un programa de la Cooperación Alemana, financiado por el Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de la República Federal de Alemania.

Este programa se desarrolla desde el año 2016 en los países andinos de Bolivia, Chile, Ecuador, Colombia y Perú. Las entidades ejecutoras son la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y la Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (en castellano: Instituto Federal de Geociencias y Recursos naturales), los cuales implementan módulos independientes de este proyecto, en conjunto con su contraparte regional, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). A nivel de los países, el programa MinSus colabora con instituciones públicas, tales como ministerios de minería, ministerio del ambiente, autoridades de certificación y

control ambiental, servicios geológicos, defensorías del pueblo, entre otros. Además, existen colaboraciones con asociaciones mineras, la sociedad civil, y universidades.

Mientras que la GIZ trabaja prioritariamente en los campos de acción de política y estrategias, y gobernanza de actores, la BGR, siendo una institución técnica-científica del gobierno Federal de Alemania, se enfoca en actividades relacionados a la transferencia tecnológica y la innovación en el sector minero-ambiental. En este contexto, ha trabajado principalmente en temas relacionados al uso eficiente de agua y energía en procesos mineros, el cierre de minas, y la gestión de pasivos ambientales mineros. Para más información sobre el proyecto, ver www.minsus.net.

Proyecto piloto de relaves abandonados de La Ciénega en Pataz/Perú

Un ejemplo de las actividades realizadas por BGR en materia de gestión de pasivos ambientales mineros (PAM), es el proyecto piloto sobre los PAM de La Ciénega en Perú.

En 2016, la BGR inició investigaciones en cinco relaves abandonados en el departamento de la Libertad, en Perú, los que colindan con el pueblo andino de Pataz. Los relaves son producto de una antigua actividad minera aurífera, que no cuenta con responsable legal para la remediación. En tal sentido, se puede considerar pasivos ambientales mineros de carácter huérfano.

En total, los PAM de la Ciénega abarcan instalaciones abandonadas de la antigua planta de beneficio y corresponden a aproximadamente 90.000 t de relaves, los cuales se encontraban al aire libre, sin ninguna protección para las personas o el medio ambiente. Además, cabe destacar que la población local utilizaba estos relaves como cancha de fútbol, o como área de juegos infantiles. En otras palabras, los niños de la zona -uno de los grupos poblacionales más vulnerables-, estaban directamente expuestos a estos desechos mineros.

Cabe destacar que, hasta el inicio de los trabajos de la BGR, no se contaba con información sobre el contenido químico de estos relaves. En tal sentido, se desconocía si los relaves abandonados representaban algún riesgo para la población o el medio ambiente.

En esto radicaba la importancia de desarrollar investigaciones geo-ambientales sobre estos legados mineros, incluyendo la toma de muestras de los desechos mineros, suelo y agua, así como la realización de ensayos geoquímicos y mineralógicos. Posteriormente, los resultados fueron evaluados por especialistas de Alemania y los reportes correspondientes están disponibles en la página web de MinSus. En resumen, los análisis desarrollados determinaron dos hallazgos importantes:

- 1) Se comprobó la sospecha de que los relaves representan un riesgo potencial para la salud humana y el ambiente, confirmando la presencia de metales pesados y metaloides, en particular de plomo, cadmio y arsénico, cuyas concentraciones se encuentran muy por encima de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelos de Perú, o los Bodenprüfwerte (en castellano: Valores de evaluación para suelos, aplicables para vía de exposición suelo-hombre, según BBodschV) de Alemania.
- 2) Por otro lado, se determinó que los relaves de La Ciénega aún contienen cierta ley, con un contenido promedio de 1.5 gramos de oro por tonelada, lo que equivale un monto bruto de aproximadamente 135 kg. Cabe destacar que se trata del contenido total de oro, lo que no es sinónimo a la fracción recuperable.

En base a estos alarmantes resultados obtenidos por BGR, se formó una mesa redonda para la remediación de los PAM de La Ciénega, con participación de entidades públicas nacionales y locales, la empresa minera PODEROSA (concesionario actual pero no

responsable legal de los PAM), y la sociedad civil. Además, se realizaron campañas de sensibilización con la población local y se implementaron medidas institucionales para limitar el acceso a los relaves. Sin embargo, por la necesidad de contar con un espacio recreacional en la zona, la empresa PODEROSA está actualmente construyendo una cancha de fútbol alternativa cerca del pueblo.

Por otro lado, el Ministerio de Energía y Minas de Perú ha priorizado desde 2019, la remediación de los PAM de la Ciénega en su lista de los pasivos ambientales mineros de alto riesgo.

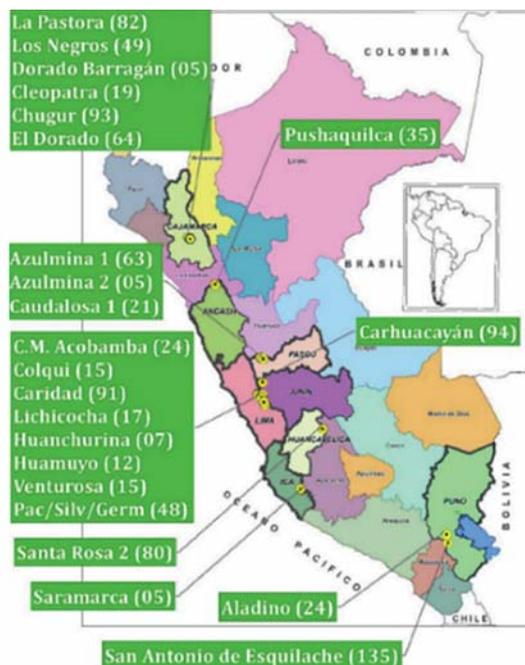
Actualmente, la BGR sigue asesorando a la mesa redonda, al Ministerio, y al Gobierno Regional de La Libertad en la toma de decisiones respecto a la remediación de dichos relaves.

Además, se llevaron a cabo una serie de estudios especializados a fin de determinar las mejores opciones de remediación. Como resultado, quedaron los siguientes tipos de rehabilitación para los relaves:

- Aplicación de medidas de confinamiento, para lo cual la empresa alemana UMTEC realizó un estudio de factibilidad con propuestas de ingeniería idónea.
- Remoción de los relaves al depósito de relaves Hualanga de PODEROSA, la que cuenta con todos los requerimientos ambientales y de seguridad, de acuerdo con la normativa peruana vigente, para una disposición segura de los relaves.

Considerando que los PAM de La Ciénega aún contienen cierta ley, se está evaluando actualmente si es técnicamente viable reprocesar estos relaves, y de esa manera, co-financiar las medidas de remediación. Para ello la BGR, en conjunto con el servicio geológico de Perú (INGEMMET - Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú), y la universidad PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú), están realizando ensayos mineralógicos y metalúrgicos, a fin de determinar procesos aptos para la recuperación del oro,

pero también para disminuir el contenido de los contaminantes en los relaves. Los resultados finales de estas investigaciones aún están pendientes, debido a retrasos ligados a la pandemia por COVID-19. Sin embargo, se espera concluir estos ensayos en el primer trimestre de 2021.



Ilust. 18: PAM de muy alto y alto riesgo en Perú (Fuente: AMASC, 2017)

Situación de la gestión de los PAM en Perú

El Perú cuenta desde hace siglos con una historia de extracción de recursos minerales metálicos, tales como el oro, la plata, el cobre, el zinc, el plomo y el mercurio. A lo largo de esa historia minera, se han generado una gran cantidad de pasivos ambientales mineros, sobre todo debido a la operación ambientalmente inadecuada de la extracción y beneficio de los minerales, y por falta de un cierre idóneo de las minas al final de su vida útil. Gran parte de estos pasivos se han generado antes de la existencia de alguna regulación ambiental en el país, la que apareció aproximadamente en los años 90 en el Perú, y la que se ha desarrollado sustancialmente desde entonces. Cabe mencionar, que los PAM en Perú han sido generados tanto por minas a escala industrial, como a mediana o pequeña escala, incluyendo la minería arte-

sanal. La falta o insuficiencia de estándares ambientales, vacíos en el cumplimiento de las regulaciones ambientales vigentes, y limitaciones en el control de los mismos, son factores que han favorecido la generación de estos pasivos.

Cabe destacar que entre los riesgos principales para el ser humano y el ambiente son, por un lado, los riesgos físicos como el colapso de tranques, deslizamientos, colapso de infraestructura, derrame de relaveras; por otro lado, que los PAM pueden representar fuentes de contaminación, sobre todo desde los residuos mineros o los restos de los procesos de beneficio, la generación de drenajes ácidos, y en consecuencia, la contaminación de medios ambientales como el agua, el suelo o el aire.

El panorama de los PAM en Perú es muy diverso. Por un lado, existen ex unidades mineras de gran envergadura, tales como el complejo metalúrgico La Oroya (explotación de minerales polimetálicos desde el año 1922, fundición desde el año 1932 para la producción de plomo, zinc, cobre y metales preciosos), y sus minas asociadas, que han generado contaminaciones en los suelos con metales pesados, sobre todo por plomo, zinc y arsénico, en una extensión de aproximadamente 2.300 km².

Por otro lado, existen en Perú pasivos ambientales mineros desde la época colonial. Un ejemplo de ello son las contaminaciones en Huancavelica por mercurio y de otros metales pesados, debido a la extracción y fundición de cinabrio a lo largo de 400 años.

Además, existen PAMs generados por la pequeña minería y minería artesanal, una actividad que se realiza mayormente de forma informal (Se estima que en Perú existen aproximadamente 500.000 pequeños) o ilegal, y con bajos estándares ambientales, lo que favorece riesgos en esta materia durante su operación. Además, estas actividades no realizan un cierre adecuado de las minas, instalaciones y componentes de beneficio o desechos.



Ilust. 19: Evolución de la legislación Peruana sobre PAM y contaminaciones del suelo; Fuente: MINAM, adaptado

Ante estos desafíos, el Estado peruano ha incluido paulatinamente el tema de PAM en su legislación sobre minería y medio ambiente. Hoy en día, el Perú es único país en la región andina que cuenta con una ley de PAM y una normativa específica nacional sobre contaminaciones de suelos.

Además, es el único país de la región con un programa nacional para la remediación de PAM. Este último está dirigido por el Ministerio de Energía y Minas, y los proyectos de remediación se ejecutan por la empresa estatal de derecho privado Activos Mineros S.A.C. (AMSAC). El programa incluye un inventario de los PAM en el territorio nacional, y la priorización de los mismos de acuerdo a su riesgo potencial para la población y el medio ambiente. Hasta la fecha, se han registrado alrededor de 9.000 PAM, de los cuales 5,157 son considerados de alto y muy alto riesgo. Cabe destacar, que la unidad de registro del inventario son componentes o instalaciones abandonadas, es decir, una ex - unidad minera puede abarcar varios PAM.

En el periodo comprendido entre 2008 y 2019, el Estado peruano ha remediado, a través del AMSAC, más de mil PAM, con una inversión total de US\$ 130 millones. Cabe destacar que algunos proyectos de remediación contaban con co-financiamiento de empresas mineras del sector privado.

Desafíos y oportunidades para la gestión de PAM en Perú

A continuación, se presenta un resumen de los desafíos (-) y oportunidades (+) para la gestión

de PAM en Perú, considerando también la perspectiva desde empresas alemanas, las cuales han sido el público objetivo del taller del 12 de diciembre de 2020.

- Pese a los grandes avances en la legislación sobre PAM en Perú, aún queda pendiente mejorar las regulaciones, por ejemplo, respecto a las responsabilidades de los dueños o propietarios de áreas con PAM (Zustandsstörer), los cuales no son los causantes de los mismos (Handlungsstörer).
- El programa estatal de PAM no cuenta con una fuente de financiamiento continuo, lo que dificulta la planificación de los proyectos a largo plazo.
- +/- Existe un inventario de PAM con una metodología de priorización en base de criterios preliminares de riesgo para cada componente abandonado. Queda pendiente un enfoque de priorización más integral, considerando también oportunidades como el potencial de reaprovechamiento de los PAM.
- Las competencias y funciones de los diferentes organismos e instituciones estatales no son siempre claras en materia de la gestión de PAM.
- El programa estatal de PAM es centralizado en el Ministerio de Energía y Minas al nivel nacional. No existen programas de remediación a nivel regional o local.
- Los mecanismos de participación de la población en proyectos de remediación son escasos, aunque serían, en muchos casos, actores importantes respecto al post-uso de los PAMs.

- +/- Fortalecer el involucramiento voluntario del sector privado en proyectos de remediación; incluir la remediación de PAMs huérfanos en nuevos contratos de explotación.
- + En Perú, el tema de PAM es prioritario para el Estado, y también atañe al sector privado, puesto que los PAM dañan a la imagen de la minería en general, y dificultan la obtención de la “licencia social para operar”.
- +/- Actualmente se aplican pocas tecnologías innovadoras en la investigación y remediación de PAM. Esto podría ser una oportunidad para proveedores internacionales especializados.
- +/- Los recursos humanos con conocimientos sobre PAM son limitados en las instituciones públicas y empresas. Es una oportunidad para proveedores de capacitaciones especializados.

Situación de la gestión de los PAM en Chile

En Chile no existe hasta la fecha una ley para la gestión de PAM, ni un programa estatal con financiamiento para la remediación de los PAM existentes en el país. Sin embargo, existen iniciativas de remediaciones voluntarias por empresas mineras, las que abarcan especialmente la remoción de relaves o el reprocesamiento de desechos mineros.

Además, el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, SERNAGEOMIN, ha elaborado en conjunto con la BGR, un inventario de los depósitos de relaves en el territorio nacional, incluyendo una evaluación preliminar de los riesgos asociados para la salud y el ambiente. Este inventario abarca en total 742 tranques, y cuenta con información sobre el contenido geoquímico de los relaves.

Desde 2020, el Estado de Chile viene implementando el “Plan Nacional de Depósitos de Relaves”, el cual incluye también depósitos de relaves abandonados. Dicho plan descansa en tres pilares:

- 1) Seguridad de la Población: por ejemplo, dentro de las medidas recogidas en el plan, está la creación de un observatorio de depósitos de relaves, permitiendo el monitoreo en línea y centralizado en su estabilidad física y química.
- 2) Medio Ambiente: dentro de este plan de acción se contempla el desarrollo de iniciativas que tienen por objeto la reubicación de depósitos de relaves abandonados ubicados en la cercanía de zonas pobladas mediante acuerdos público – privados, permitiendo que la misma industria minera dé solución a los problemas del sector.
- 3) Economía Circular e Innovación: este eje apunta a la transformación de un pasivo en un activo, fomentando la extracción de valor desde los depósitos de relaves, haciéndose expansivo este pilar a los “depósitos artificiales mineros”, tales como, botaderos, escoriales, rípios de lixiviación, pilas de descarte, entre otros.

Desafíos y oportunidades para la gestión de PAM en Chile

A continuación, se presenta un resumen de los desafíos (-) y oportunidades (+) para la gestión de PAM en Chile.

- Falta de un programa estatal para la remediación de PAM. Las experiencias internacionales muestran que fuentes de financiamiento públicos son esenciales para una adecuada gestión y remediación de los legados ambientales de actividades económicas pasadas.
- Falta un marco jurídico sobre PAM y sitios contaminados.
- +/- Las instituciones públicas en Chile cuentan, por lo general, con personal altamente calificado. Sin embargo, no tienen competencias asignadas a la gestión de PAM.
- +/- El problema de los PAM debe ser

- solucionado en primer lugar por el sector privado.
- El volumen de los relaves dispuestos por la minería de cobre es muy grande (ca. 10 mil millones de toneladas).
 - El potencial de reaprovechamiento de relaves está dado en algunos casos, por ejemplo, para cobre, hierro, cobalto o tierras raras, pero faltan investigaciones más detalladas para un panorama más general.
 - + El sector público y privado en Chile está, por lo general, abierto a la innovación y hay interés de aprovechar los conocimientos de empresas internacionales, tales como las de Alemania.

Soluciones tecnológicas alemanas para el cierre de minas:

Sostenibilidad y minería manejo de aguas

DAS Environmental Expert GMBH, Dr. Jörg Winter; G.E.O.S. MBH Freiberg, Dr. Roland Mayer & Dr. Frank Haubrich

Artículo conceptual: Horizonte Minero Ed.129

Las materias primas y los minerales proporcionados por la minería alrededor del mundo son fundamentales para la vida moderna. De acuerdo con las Naciones Unidas, la extracción de minerales y minerales industriales aumentó 27 veces durante el siglo XX mientras que la población mundial creció 24 veces (<https://sustainabledevelopment.un.org/topics/mining>). Dichos números implican que la minería está directamente conectada con los dos principales determinantes de los esfuerzos por lograr un desarrollo sostenible: el aumento de la población y el consumo per cápita. Por consiguiente, la industria minera pone especial énfasis en la sostenibilidad y la mitigación del deterioro del medioambiente.

DAS Experto Ambiental, de aquí en adelante DAS, y su socio G.E.O.S. aspiran a crear un equilibrio entre el crecimiento económico y la preservación de los recursos naturales. A fin de lograr este objetivo, DAS y G.E.O.S respaldan la industria minera ofreciendo soluciones para el tratamiento de las aguas residuales y estrategias para mejorar la extracción de recursos valiosos durante los procesos mineros.

DAS, como experto en el tratamiento del agua residual industrial, ofrece a la industria minera una amplia gama de soluciones técnicas con experiencia en aplicaciones, tales como la eliminación de sólidos, finos de carbón y metales. G.E.O.S. se concentra en mejorar la extracción de recursos valiosos como se indica a continuación.

Junto con otros socios del proyecto, se han desarrollado métodos de procesamiento avanzados y estrategias (período del proyecto desde 11/2017 hasta 05/2018) para una recuperación optimizada de casiterita, columbita y subproductos derivados (por ej. ilmenita, monacita y topacio) bajo la premisa del aumento en la comercialización de los concentrados de minerales.

Los minerales están parcialmente contaminados con sustancias radioactivas que impiden la comercialización de los concentrados. Se examinó la manera de separar dichas sustancias radioactivas de los concentrados de Casiterita (Sn) y Columbita (Nb, Ta).

Durante este trabajo, también se estudió cómo separar satisfactoriamente subproductos, tales como Ilmenita, Monacita y Topacio.

Se utilizaron métodos físicos, como la separación por densidad y la separación magnética. Se demostró la optimización de los procesos de recuperación para varias empresas de procesamiento.

Extracción de elementos valiosos de los minerales y del agua (Chile)

Se identificaron elementos estratégicos en diferentes depósitos mineros antiguos, tales como botaderos y depósitos de relaves (período del proyecto 10/2013-09/2016). Mediante tecnologías físicas, químicas y biológicas, se aplicaron distintos métodos para disminuir los costos totales de recuperación.

Además, se desarrollaron métodos bajo la condición principal de minimizar los impactos ambientales perjudiciales resultantes de los antiguos depósitos y evitar que se generen nuevos problemas debido a la eliminación del material estéril. Producción de materiales para el tratamiento de aguas a partir de la escoria de cobre (Chile).

Las escorias de cobre, que generalmente son un material residual, se utilizan para producir materiales de tratamiento de aguas (período del proyecto 01/2018-12/2020). En el presente proyecto, la escoria de cobre se usa como una materia prima para la producción biológica de schwertmannita y ferrihidrita mediante el uso de sulfato ferroso bivalente y sílice.

Los materiales de adsorción producidos a partir de la schwertmannita y la ferrihidrita son útiles para la eliminación y/o extracción de los llamados oxoaniones, tales como arseniato, molibdato, fosfato, cromato y vanadato generados por los efluentes mineros y el agua industrial residual.

La posibilidad de desorber la materia previamente adsorbida permite usos múltiples del material de adsorción y la extracción y enriquecimiento de componentes valiosos.

Biolixivación de relaves de flotación (Alemania)

Se han desarrollado tecnologías económicamente viables (período del proyecto 10/2012-03/2016) para recuperar metales de los relaves de manera sostenible.

Se utilizó una (bio)-tecnología especial para la recuperación de Zn, Fe, Cu, In de minerales de sulfuro polimetálicos.

Estase basa en un proceso de airlift-bioleaching que permite una lixiviación muy efectiva, incluso en el contenido extremadamente sólido presente en el líquido del proceso. Se han desarrollado recomendaciones para el saneamiento y reprocesamiento de los relaves de antiguos botaderos y depósitos de relaves.

Biolixivación de mineral de skarn de bajo grado (Europa)

El objetivo del proyecto FAME incluyó el desarrollo de tecnologías de proceso flexibles y económicas para depósitos de minerales pequeños y de bajo grado de Europa con una mineralogía compleja y teniendo en cuenta

los minerales de greisen, skarn y pegmatita (período del proyecto 01/2015- 12/2018).

Se han utilizado tecnologías biohidrometalúrgicas para mejorar el procesamiento de los sulfuros de los subproductos y desarrollar estrategias de procesamiento innovadoras para las materias primas. Se ha desarrollado una tecnología de biolixiviación flexible y portátil para extraer metales y recuperar subproductos tales como cinc, cobre e indio.

Ciertamente, dichos procesos biohidrometalúrgicos pueden contribuir a lograr una mayor recuperación del metal una vez implementados en las tecnologías de procesamiento definitivo de los minerales.

Tecnología backfill para el manejo sustentable de relaves

BASF Construction Chemicals/Master Builders Solutions Peru, Ing. Álvaro Bendezú Wilson

5. & 6.12.2018: Workshop Peruano-Alemán: “Experiencias y Buenas Prácticas en el Cierre de Minas de Alemania”

Introducción

El backfill, o también denominado relleno, es una actividad común que se realiza continuamente durante la explotación de una mina subterránea. El relleno es una actividad que se hace necesaria para rellenar los vacíos producidos (tajos) en las excavaciones subterráneas debido a la extracción de material que contiene el mineral de interés comercial para la mina.

Los vacíos generados por las excavaciones subterráneas necesarias para la extracción de mineral deben ser rellenados para cumplir diversas funciones y objetivos. Los principales objetivos del relleno son mantener la estabilidad de las excavaciones (evitar derrumbes, colapsos, subsidencias superficiales) y permitir la extracción progresiva del cuerpo mineralizado de manera segura (según el método de minado que se emplee).

Según los requerimientos de resistencia para el material de relleno, éste se puede clasificar en cementado y no-cementado. El relleno cementado se implementa cuando se requiere un material con características estructurales que alcance un nivel de resistencia tal que le permita autosostenerse cuando quede expuesto generalmente en forma de muros o techos por donde se desarrollarán las operaciones subterráneas. Los rellenos no-cementados generalmente se emplean para el relleno de tajos que no quedarán expuestos al desarrollo de excavaciones posteriores o en situaciones donde el relleno cumple una función de plataforma de trabajo (piso) para las actividades de excavación.

El relleno cementado se compone de sólidos (generalmente áridos varios, relaves, cemento) y agua (requerida para generar la hidratación del cemento que otorga la resistencia requerida a dicho material). Se pueden utilizar áridos de desecho de las operaciones mineras (mezclas de bolones, piedra y finos) y también relaves. La elección del material a usar para la producción de relleno dependerá de su disponibilidad en el sitio de la operación minera y la demanda requerida. Los costos operativos del relleno cementado son típicamente alrededor del 20-30% del costo operativo total de la mina, por lo que es importante su manejo adecuado para mantener o mejorar niveles de rentabilidad de la operación minera.

Los tipos de relleno cementado más comunes son el rockfill (CRF), relleno hidráulico (CHF) y relleno en pasta (CPF). El uso de CPF se hace cada vez más predominante a nivel global debido a que tal método maximiza la reutilización de relaves para su empleo en relleno de excavaciones subterráneas, lo que constituye una ventaja ambiental sabiendo que los relaves representan un riesgo de contaminación ambiental cuando son depositados en superficie y su disposición segura en la etapa de cierre de mina repre-

senta un costo considerable para la empresa minera.

Relleno en pasta cementado (CPF)

El CPF se produce típicamente con una mezcla de relaves totales, agua y cemento. Este material se genera en una planta de producción ubicada en superficie o en subterráneo. El CPF se transporta desde la planta de producción hasta el tajo/excavación a rellenar a través de tuberías previamente instaladas. Según la relación de dimensiones verticales y horizontales de los tramos de tubería, el transporte del relleno puede darse por gravedad o con la ayuda de bombas de desplazamiento positivo para lograr que se produzca la descarga exitosamente donde sea requerido.



Ilust.20: Apariencia de relleno en pasta (CPF) típico
©Master Builders Solutions Peru

El CPF contiene relaves con suficiente cantidad de finos que permite obtener una mezcla homogénea y sin segregación de los componentes que lo conforman. Es importante el manejo adecuado de las proporciones de relaves, agua y cemento para que el relleno alcance una performance óptima respecto a los requisitos de transportabilidad y resistencia.

La transportabilidad del CPF se cuantifica con parámetros de reología. El CPF debe alcanzar ciertas características reológicas para ser descargado en el tajo a rellenar sin obstrucción de la línea de tubería. Mientras más agua contenga una mezcla de CPF, mayor

será su facilidad de transporte y menor será la resistencia que alcance el relleno endurecido. Las resistencias bajas pueden ser superadas con el incremento de la dosis de cemento. Es importante indicar que el cemento constituye alrededor del 70-80% del costo operativo de una planta de CPF y su consumo debe ser reducido tanto como sea posible por razones económicas.

Respecto a su aplicación en CPF, los relaves presentan composiciones químicas y mineralógicas variadas, según el tipo de formación geológica de la que provengan. De modo similar, el agua industrial usada para la producción de relleno también tiene particularidades de pH, contenido de sólidos disueltos, etc. Los diversos tipos de cemento presentan procesos de hidratación distintos al interactuar con variedad de tipos de relaves y agua industrial. Tal diversidad de las características de los materiales componentes del relleno genera comportamientos variados en parámetros de densidad, transportabilidad, desarrollo de resistencia y durabilidad.

Aditivos Químicos para optimización de CPF: Master Builders Solutions (MBS) inició en la década de los 90's el empleo de aditivos químicos para modificar las propiedades del relleno cementado y reducir sus costos a través de la reducción del consumo de cemento y otras mejoras operativas en plantas de producción. Aunque inicialmente la incorporación de aditivos químicos a las plantas de producción de relleno cementado no fue viable por el bajo costo del cemento, con el transcurrir del tiempo esta propuesta se ha tornado viable con el incremento continuo de los costos de cemento y la innovación continua de tecnología de polímeros para la producción de aditivos químicos cada vez más eficientes.

En la actualidad, MBS está en capacidad de ofertar soluciones químicas a la medida de una planta de producción de CPF específica, teniendo en cuenta las particularidades

de los materiales y proceso de operación propios de cada mina que se describieron anteriormente. Actualmente, existen diversos tipos de aditivos que se diseñan para cumplir diferentes funciones tales como modificar la reología, acelerar o retardar el desarrollo de resistencia, otorgar propiedades de modificación de viscosidad, anti-deslave, etc. En el caso específico de CPF, la acción preponderante para optimizar una operación de este tipo es la modificación de la reología.

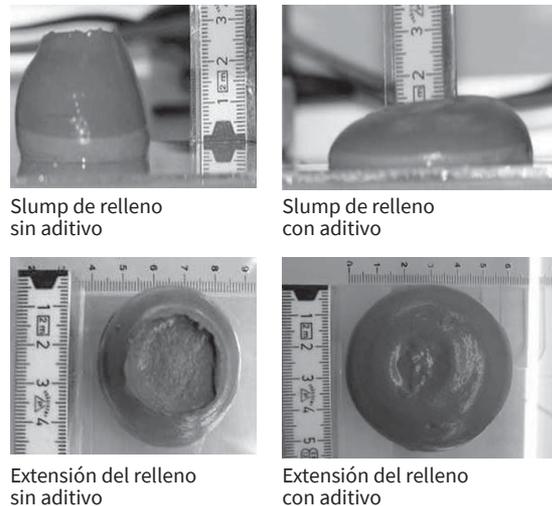
Un aditivo modificador de reología consigue el efecto de facilitar el transporte del CPF, es decir torna la mezcla más fluida. También se puede afirmar que un aditivo modificador de reología consigue el mismo resultado final que añadir agua adicional a la mezcla de CPF para facilitar su transporte a través de tubería. Sin embargo, la diferencia importante radica en que la resistencia de un CPF no se ve disminuida cuando dicha mezcla se torna más fluida con la adición un aditivo modificador de reología. En la siguiente imagen se ilustra el efecto que tiene un aditivo modificador de reología en la fluidez de una mezcla de CPF.

Por otra parte, la mejora en la facilidad de transporte de la mezcla de CPF que ocurre con la inclusión de aditivo modificador de reología genera la posibilidad de reducir la cantidad de agua necesaria para alcanzar un nivel determinado de fluidez requerido de relleno para descargarlo exitosamente en el tajo a rellenar. Este hecho implica que la resistencia que alcanzará el relleno con reducción de agua e inclusión de aditivo modificador de reología será más alta que la mezcla inicial que tenía la misma fluidez sin inclusión de aditivo y con mayor cantidad de agua.

El exceso de resistencia (generado por la reducción de agua e inclusión de aditivo) que no es requerido puede ser eliminado reduciendo la dosis de cemento en el relleno

para retornar al nivel de resistencia inicial que era el requerido en el tajo a rellenar. El hecho de reducir cemento en la mezcla del relleno genera una disminución de costos en la operación rutinaria de la planta de relleno.

En resumen, la adición de un aditivo modificador de reología a un CPF permite incrementar la cantidad de sólidos por unidad volumétrica de relleno, al reducir la cantidad requerida inicial de agua para alcanzar un nivel de transportabilidad objetivo. Asimismo, para mantener la resistencia requerida y reducir costos de producción de relleno es posible disminuir la cantidad de cemento inicialmente requerida en la mezcla.



Ilust 21: Diferentes rellenos Martic, Z., et al (2011) *Admixtures in backfill applications for cost and performance benefits*, Paste 2011 - R.J. Jewell and A.B. Fourie (eds).

Un menor uso de agua para operaciones de CPF que se desarrollan en zonas áridas es una ventaja importante debido a la escasez y alto valor de este recurso en esa realidad. Asimismo, la reducción del consumo de cemento en una operación de CPF siempre constituye una ventaja económica y ambiental.

El incremento de sólidos y disminución de dosis de cemento por unidad volumétrica de relleno implica un mayor uso de relaves por unidad volumétrica de relleno. Esto último tiene una repercusión ambiental positiva, ya que reduce la cantidad de relaves que

requerirán ser depositados en superficie e implica un requerimiento de menor área en superficie para ser usada en deposición de relaves durante la explotación de la mina.

En general, la experiencia propia indica que, con la incorporación de un aditivo modificador de reología eficiente, es posible reducir la cantidad de cemento presente en una unidad volumétrica de CPF en hasta 25% y también es posible incrementar la cantidad de relave presente en una unidad volumétrica de CPF en hasta 5%, manteniendo o mejorando las propiedades de transportabilidad y resistencia del CPF.

Finalmente, debido a la posibilidad de facilitar el transporte del relleno, los aditivos modificadores de reología también dan la posibilidad de incrementar la velocidad del llenado de tajos subterráneos, incrementar la velocidad de ganancia de resistencia del relleno para reingresar en menor tiempo a las labores subterráneas (reducir el ciclo de minado) y reducir costos de mantenimiento en equipos de bombeo y tuberías asociados con rellenos difíciles de transportar.

Es claro que la incorporación de un aditivo químico a una operación de CPF implica una inversión adicional a los costos previamente definidos. Sin embargo, es importante también valorar la totalidad de las oportunidades de mejora en términos de reducción de costos (cemento, agua y mantenimiento de equipos), reducción de tiempos (potencial reducción de ciclo de minado) y reducción de impacto ambiental (mayor consumo de relaves y menor consumo de agua) que genera la incorporación de un aditivo químico a una operación de CPF. Una valoración minuciosa de todas las variables expuestas permitirá tomar una mejor decisión respecto a la incorporación de tecnología de aditivos químicos a una operación de CPF.

Conclusiones

La incorporación de aditivos químicos a una operación de CPF es una alternativa viable para manejar de manera más sustentable esta actividad. Según lo expuesto en los anteriores acápite, se ha evidenciado que es posible generar ahorro económico, mejoras operativas, reducción de plazos de minado y beneficios ambientales en la operación de CPF a partir de una propuesta ingenieril eficiente para la incorporación de un aditivo químico en la producción continua de una planta de CPF que esté acorde a la realidad de una operación en particular.

Referencias

Weatherwax, T., et al (2010) Role of Admixtures in the Optimization of Paste Backfill Systems.

Martic, Z., et al (2011) Admixtures in backfill applications for cost and performance benefits, Paste 2011 - R.J. Jewell and A.B. Fourie (eds).

Muros de corte impermeables mezcladas en el lugar para encerrar las zonas contaminadas y estabilizar las presas de relaves

BAUER Fundaciones America Latina S.A, Hans Schwarzweller, Regional Director

04.12.2019 - Workshop "Cierre de minas y remediación de pasivos ambientales"

Debido a la creciente concienciación, en lo que respecta a la seguridad de las presas y a las preocupaciones medioambientales, relacionadas con la filtración de fluidos contaminados de las presas de relaves, las soluciones a medida y rentables para mejorar las presas existentes son cada vez más importantes.

Al mezclar los estratos de suelo existentes de diques o presas in situ con agentes aglutinantes, generalmente lechada de cemento y bentonita, utilizando diferentes técnicas, se pueden lograr mejoras de una manera

rápida y económica con muy poco o ningún desperdicio.

El artículo describirá dos soluciones técnicas diferentes: Mixed-in-place (MIP) por medio de barrenos y Cutting-Soil-Mixing (CSM) y ofrece ejemplos de proyectos ejecutados.

El método MIP (Mixed-in-Place) es ideal en suelos no cohesivos y a profundidades de hasta 24 m aproximadamente. En el método MIP, el suelo circundante se rompe con un taladro simple o triple, se mezcla y los poros se rellenan con la suspensión de aglutinante. Las áreas tratadas individualmente se combinan para formar paredes por el método del paso atrás. En este caso, es el tamaño de los barrenos lo que dicta en última instancia las dimensiones de la pared de corte recién formada.

El método de corte-mezcla de suelos (CSM) combina las características de la técnica de corte de zanjas con paredes de diafragma y el método MIP, además de ofrecer algunas ventajas adicionales: el uso de cortadores modificados de alto rendimiento significa que la mezcla de suelos es posible incluso a mayores profundidades y en suelos densamente compactos. El método también permite alcanzar espesores de pared aún mayores y niveles más altos de refuerzo si es necesario. Por consiguiente, además de las aplicaciones descritas para el método MIP, el método CSM es adecuado en particular para reforzar presas y diques altos. Se analizan las principales ventajas y limitaciones de ambos métodos y se abordan cuestiones de control de calidad. En resumen, las soluciones de mezcla de suelos son muy atractivas en términos económicos y ecológicos y pueden adaptarse a un gran número de situaciones de sitios diferentes.

Introducción

Las tecnologías de control de la filtración, como los muros de contención, se utilizan ampliamente en la ingeniería civil, en la

construcción de presas y diques, para barreras temporales y permanentes de aguas subterráneas. En los últimos 40 años se han desarrollado métodos de construcción y equipo para muros de contención innovadores, con lo que se ha incrementado la aplicación de técnicas de mezcla de suelos para muros de contención en una gran variedad de obras de construcción con limitaciones y condiciones del subsuelo muy diferentes, tanto para proyectos civiles como mineros. Los muros de contención se utilizan también para encerrar las zonas contaminadas o para dirigir las aguas subterráneas contaminadas a una instalación central de tratamiento de aguas.

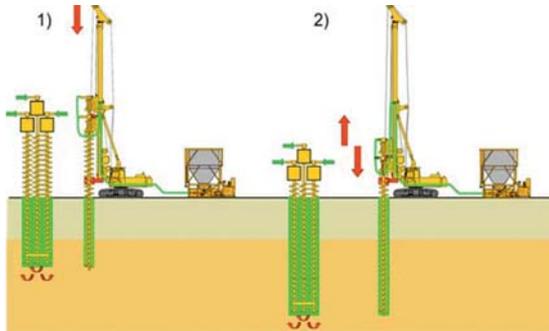
Metodología

Para minimizar o incluso evitar la eliminación de material excavado durante la construcción de muros de contención y para disminuir la cantidad de lodo que se utiliza, los sistemas de mezcla activa de suelos son hoy en día una tecnología de vanguardia. Los mejores resultados en calidad y rendimiento pueden lograrse en formaciones de suelo uniformes. La aplicación está limitada en suelos heterogéneos con cantos rodados, suelos muy compactados y formaciones rocosas. El sistema Cutter-Soil-Mix (CSM) es tecnológicamente el sistema más avanzado, que utiliza una técnica modificada de cortador de zanjas para construir una pared de corte. Los Sistemas de Mezcla de Suelos con Barrena Profunda también se utilizan con frecuencia, pero se enfrentan a varias limitaciones en comparación con el CSM. Para cada proyecto, es necesario desarrollar un aglutinante específico teniendo en cuenta las condiciones del suelo in situ y las características requeridas del muro de contención.

Mixed-in-place (MIP)

El término 'Mixed-In-Place' describe el proceso de mezclar el suelo in-situ con el aglutinante. Durante este proceso, los poros dentro de la estructura del suelo se llenan con la mezcla aglu-

tinante. El resultado de este proceso es un cuerpo de suelo reforzado cuya forma se define por la geometría de los barrenos (ilustración 22).



Ilust. 22: Mixed-in-Place (MIP) construction sequence

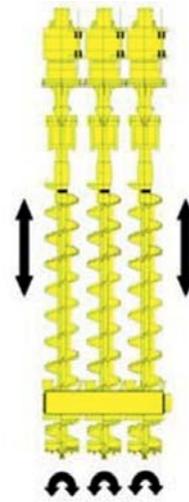
La construcción de una zanja MIP se lleva a cabo mediante la perforación de un triple barreno de vuelo continuo a la profundidad requerida (ilustración 23).

Durante la perforación y la retirada de los barrenos, la estructura del suelo se rompe, se mezcla completamente y se introduce una pasta aglutinante a través de los tallos huecos de los barrenos. Para lograr una completa homogeneización del suelo durante la mezcla, el operario de la plataforma puede variar la dirección de rotación de cada uno de los barrenos y al mismo tiempo subir o bajar los barrenos montados en el trineo (ilustración 24). La construcción de los paneles del MIP se realiza en bocados (ilustración 25) adoptando la llamada secuencia de construcción 'back-step'. De esta manera se asegura una pared

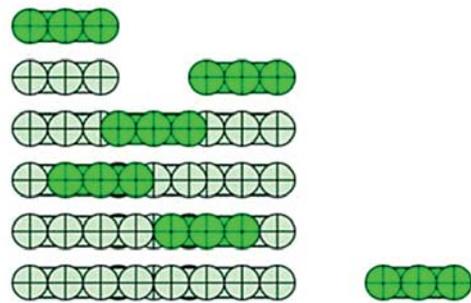


Ilust. 23: Equipos Mixed - In - Place

continua sin juntas. Si es necesario, se puede instalar un refuerzo específico para el proyecto bajándolo en el muro recién mezclado.



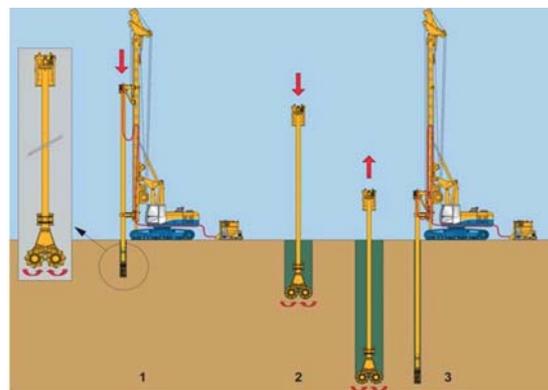
Ilust. 24: Movimientos del mezclado



Ilust. 25: 'Back-step' Secuencia de construcción

Cutter Soil Mixing (CSM)

Las dos ruedas de corte CSM de rotación inversa penetran en el suelo a un ritmo continuo. Las ruedas de corte rompen la matriz del suelo y, al mismo tiempo, se bombea un fluido a las boquillas situadas entre las ruedas de corte, donde se mezcla a fondo con el suelo suelto.



Ilust. 26: Cutter Soil Mixing (CSM) secuencias de construcción

La adición de un chorro de aire comprimido puede mejorar el proceso de rotura y mezcla durante el movimiento descendente de la cortadora. Las ruedas de corte giratorias empujan las partículas de tierra a través de placas de cizallamiento montadas verticalmente, mezclando así completamente los materiales.

La velocidad de penetración del cortador y el volumen de fluido bombeado son ajustados por el operador para crear una masa de suelo homogénea y plástica, que permite una fácil penetración y extracción de la máquina (ilustración 26).

Una vez alcanzada la profundidad de diseño, se extrae lentamente el cortador de mezcla de suelo (ilustración 27) mientras se añade continuamente lechada de cemento o cemento-bentonita. La velocidad de mezcla y extracción en combinación con el volumen de lechada de cemento requerido se planifica y controla cuidadosamente. La homogeneización de la mezcla de tierra licuada se asegura mediante la rotación de las ruedas de corte. Se forma una pared continua en una serie de paneles primarios y secundarios superpuestos. El recorte en paneles frescos adyacentes se denomina «fresh-in fresh method», pero también es posible el «hard-in-hard method», en el que el panel se corta en paneles primarios ya endurecidos. También es posible la instalación de refuerzos en paneles frescos.

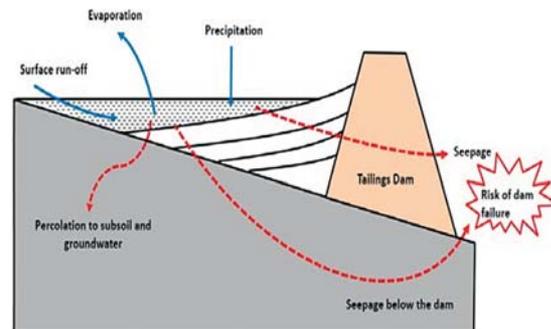


Ilust. 27: Guiado Kelly CSM y cortador lateral tandem suspendido por cuerda en MT 75

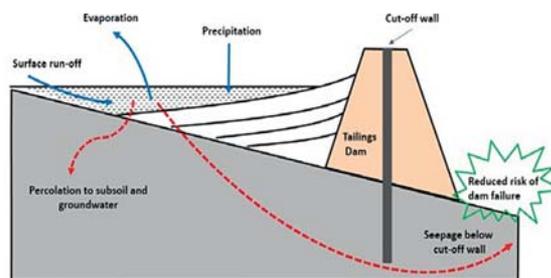
Control de calidad

Se llevará a cabo un extenso programa de pruebas de acuerdo con un Plan de Gestión

de Calidad para supervisar y controlar todo el proceso de producción y para comprobar el producto final. Esto incluye todos los pasos del proceso completo, como los preparativos preliminares, la preparación del lugar, la entrega de materiales, la producción de la mezcla, el almacenamiento y el transporte, y la mezcla in situ, asegurando así la calidad de cada uno de los paneles y la continuidad de la pared prevista. En general, se toman muestras de cada entrega de cemento y bentonita y las pruebas de la densidad de la lechada, el tiempo de pantano y la temperatura se hacen de la manera habitual directamente después de la mezcla. Además, el volumen de la lechada se mide con un medidor de flujo y se registra con dispositivos electrónicos (B-Tronic). Se toman muestras de la lechada durante cada turno para controlar el proceso de curación de esta. La homogeneización de los materiales mezclados in situ debe verificarse tomando muestras directamente de la pared inmediatamente después de que se haya completado el proceso de mezcla. El producto final puede verificarse mediante la toma de muestras de núcleo convencional.



Ilust. 28: Presa de relaves existente con problemas de filtración



Ilust. 29: Rehabilitación de la presa existente mediante la instalación de un muro de contención

Resultados y discusión

Las paredes de corte del MIP o CSM tienen una función estructural limitada. Para mejorar la estabilidad de las presas o diques, los elementos individuales de mezcla de suelo pueden ser reforzados con elementos de acero. Además, se pueden instalar otros elementos de mezcla de suelo ortogonales al muro de contención. El número y la longitud de esos elementos estabilizadores dependen de las necesidades del proyecto y del suelo predominante. Con las técnicas descritas se puede lograr una permeabilidad del suelo inferior a 1×10^{-8} m/s reduciendo al mínimo las filtraciones y mejorando la estabilidad general de la presa a largo plazo. En comparación con otras soluciones de muros de contención, las técnicas de mezcla de suelos son soluciones económicas y rápidas, con un volumen limitado de material transportado a y desde el sitio.

No se coloca hormigón, ya que el suelo in situ y el lodo aglutinante se utilizan como material de construcción y se genera un escaso desperdicio de perforación. Otros sistemas de barrera existentes, por ejemplo, los construidos con métodos de lechada convencionales, a menudo no cumplen el grado de eficiencia y durabilidad y otras especificaciones de rendimiento durante la vida de la estructura, tal como lo exige el diseño. Ambas técnicas de mezcla de suelos utilizan un equipo relativamente ligero en comparación con las técnicas convencionales de excavación y sustituyen a técnicas como las cucharas y las cortadoras.

Dependiendo de la profundidad de la pared de corte instalada, el nivel de la capa freática aguas abajo puede ser influenciado. Además, la reducción de la filtración de los líquidos de residuos eventualmente contaminados mejorará la calidad del agua subterránea en las zonas que se encuentran aguas abajo de la presa.

Estudio de casos

1. Muro de mezcla de corte y de aceite en el Fuerte McMurray, Alberta, Canadá

El proyecto se rigió por dos factores principales: el horario y la temperatura. Se había pedido al contratista especializado en ingeniería de cimentaciones que ejecutara un muro de contención de aproximadamente 900 m de largo y hasta 13 m de profundidad en el almacén de arena del suroeste (SWSS) en el emplazamiento de Syncrude. El criterio principal fue la ejecución durante condiciones invernales severas, ya que la región de Fort McMurray es conocida por sus condiciones de frío de noviembre a marzo. La construcción del muro en estas condiciones invernales creó muchos problemas singulares con el manejo de equipos y materiales que el contratista especialista en ingeniería de cimentaciones tuvo que resolver. Un muro común de suelo y bentonita no era posible debido a la congelación de la lechada en la zanja abierta. La congelación también impediría la mezcla del material excavado con la lechada y el polvo de bentonita para crear la mezcla homogénea de suelo y bentonita que se utiliza habitualmente. La solución para este proyecto fue un muro Cutter-Soil-Mixing (CSM).

El método CSM de Bauer permite que la lechada de bentonita-cemento-ligante sea inyectada directamente en el suelo en el lugar de la pared tratada. Sólo los primeros 0,5 m a 1 m de suelo congelado tuvieron que ser removidos para crear una pequeña zanja para contener cualquier suspensión desbordante. La solución del contratista especialista en ingeniería de cimentaciones para manejar el equipo de preparación de la mezcla fue instalar la planta de mezcla dentro de una gran carpa con calefacción. Para garantizar que el lechado no se congelara mientras se bombeaba desde la tienda a través de una estación de refuerzo calefactada a la máquina hasta 500 m de distancia, la línea de lechada tenía conexiones calefactadas y aislamiento que envolvían la línea. La mezcla del suelo

fue realizada por un BAUER RTG 19 con un accesorio de corte BCM 10.

Para acelerar el proceso de producción de la cortadora, la pre-perforación fue realizada por un equipo de perforación BG 18 y una barrena continua. Esto permitió al contratista tratar los suelos arenosos y terminar el proyecto a tiempo, permitiendo al cliente continuar las operaciones sin ningún impacto en la producción.



Ilust. 30: Equipo cortador de mezcla de suelos

2. Mixed-in-Place (MIP) Muro de Sonthofen, Alemania

Después de que las inundaciones de 1999 causaran grandes daños a lo largo del río Iller, en el sur de Alemania (ilustración 31), los terraplenes se sellaron con muros de contención verticales construidos por el método Mixed-in-Place de triple calibre con elementos de acero instalados como refuerzo. Durante las inundaciones de agosto de 2005, los terraplenes fueron sometidos a una dura prueba antes de lo previsto. El resultado: los terraplenes estabilizados y reforzados por el MIP resistieron las presiones laterales causadas por el altísimo nivel freático del río, tal como se había diseñado, incluso cuando se sobrepasaron.



Ilust. 31: Técnica de triple tornillo con Mixed-in-Place. El MIP-muro, al ser superado evita que el dique se colapse durante la inundación

Conclusión

El artículo demuestra que Mixed-in-Place (MIP) y Cutter Soil Mixing (CSM) son métodos adecuados para instalar muros de contención

dentro de las presas y diques existentes de una manera rápida y económica. El diseño puede adaptarse a un gran número de condiciones diferentes del sitio según los requisitos del proyecto. Si bien se han utilizado muros de contención ejecutados de manera convencional, similares a los muros de diafragma, para la rehabilitación de las presas de relaves, los autores no tienen conocimiento de la ejecución de muros de contención mixtos en este campo. Teniendo en cuenta los beneficios mencionados en este artículo, las técnicas aquí mencionadas podrían resultar de interés para una serie de proyectos de rehabilitación de relaves en el futuro.

Referencias

Arnold, M., Beckhaus, K., Wiedenmann, U. (2011), 'Cut-off wall construction using Cutter Soil Mixing: a case study', *Geotechnik* 34 (2011), Heft 1.

Banzhaf, P., Colmorgen, B. (2011) 'Reliable seepage control by plastic concrete cut-off walls', *USSD 21st Century Dam Design – Advances and adaptations*, 31st Annual USSD conference, San Diego, CA, USA.

Bauer Maschinen GmbH (2016) 'CSM Cutter Soil Mixing, Process and Equipment', Schrobhausen, Germany.

Bauer Maschinen GmbH (2016) 'Mixed-In-Place', Schrobhausen, Germany.

Banzhaf, P. (2016) 'Dam Safety for new and aging dams – seepage control using advanced construction techniques – tailor-made to meet the individual project and owner's needs', Schrobhausen, Germany.

Stefan, S. (2016) 'Cut-off Wall Technologies in Mining', *Proceedings IMWA 2016*, Freiberg, Germany.

SUNfarming Food & Energy - More than a Solar Project - Solución integral para mineras: Producción de energía renovable y alimentos en una misma área de terreno

SUNfarming GmbH, SÜDESCO ENERGY

3.11.2020 – Charla online en el marco del programa de webinar de AGROMIN

SUNfarming GmbH es una de las 10 principales empresas de desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos en Alemania. Fundada en 2004, nuestra empresa es miembro del grupo ALENSYS (Alternative Energiesysteme AG) y de la Asociación Federal de Movilidad Regenerativa (conocida como BRM). Hasta la fecha, se ha realizado, en Alemania y en todo el mundo, más de 600 MWp / 1300 ha de sistemas solares fotovoltaicos. Está especializado en el control, desarrollo, construcción y operación de inversiones a largo plazo en plantas solares fotovoltaicas (PV) de alta calidad.

SUNfarming ha desarrollado una combinación de plantas fotovoltaicas de alta calidad y producción de alimentos. La solución SUNfarming Food & Energy consta de sistemas fotovoltaicos de campo libre modificados especialmente para que sea posible la producción de hortalizas, frutas, avícola, piscícola, apícola o flores de ornamento. La producción se define según las condiciones locales donde se implemente.

El modelo sostenible integrado “5 en 1” de SUNfarming Food & Energy: La energía, los alimentos, la creación de empleo, la educación y la gestión del agua son los elementos clave integrados en la solución SF Food & Energy. El modelo es aplicable especialmente en áreas subdesarrolladas o de refugiados con el fin de contribuir activamente a la mejora sostenible del nivel de vida.

1. Producción de energía

La energía sostenible producida por los sistemas fotovoltaicos se puede utilizar para

alimentar los componentes de los sistemas SF Food & Energy, así como para suministrar energía a las comunidades locales.

2. La producción de alimentos

Las verduras, frutas, hierbas medicinales y huevos se producen en entornos donde las plantas y los animales están protegidos de las condiciones extremas de viento, lluvia, granizo o sol. Las ventas se realizan con el control de calidad SF a minoristas y tiendas SF.



Ilust. 32: SUNfarming Food & Energy - Sudafrica/
©SUNfarming GmbH

3. Creación de empleo

Se pueden crear hasta 1000 nuevos puestos de trabajo directos e indirectos, entre las comunidades locales en 10 años por cada 1MW/ 2ha instalado. Los empleados trabajan en turnos para cultivar, mantener y cosechar los productos.

4. Educación

El desarrollo de habilidades y la capacitación son esenciales para proyectos con impactos sociales positivos. El objetivo es transferir tecnología y fomentar la investigación basada en las condiciones y necesidades locales específicas.

5. Gestión del agua

El riego por goteo es hasta un 90% más eficiente en comparación con los sistemas de riego tradicionales. Se logra un cultivo exitoso con un consumo mínimo de agua en áreas donde la agricultura sería apenas posible.

Las características técnicas para un sistema Food & Energy de 1 MWp:

- Área requerida: -1,4 ha a 2 ha
- Área de cultivo: aprox. 1.2 ha, de los cuales alrededor de 0.7 ha entre las filas de los módulos y aproximadamente 0.5 ha debajo de los módulos.
- Ejemplo de número de personas requeridas para la operación y mantenimiento del sistema FV: 1-2 personas
- Energía producida por el sistema FV (datos simulados para la región de Anta/Huaraz, Perú) aproximadamente 2.052.393 kWh/año
- Ejemplo de la producción anual de horticultura en esta área:

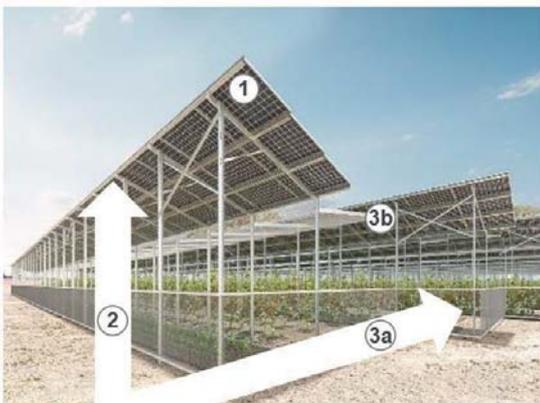
Depende del tipo de cultivo y las condiciones locales. Por ejemplo, tomates: 33 toneladas/año, lechugas: 575 toneladas/año.

- o Ejemplo de consumo de agua en esta área
- o entre 3-5 litros/m²/d
- o aprox. 40-60 m³/d
- o dependiendo de la temporada y el tipo de cultivo
- Ejemplo de número de personas necesarias para la operación y mantenimiento de los sistemas de agricultura
 - o 8-12 personas, dependiendo de la temporada y del tipo de cultivo

La distancia de fila a fila se incrementa, los paneles de encapsulado de vidrio, las estructuras elevadas y las mallas permiten la horticultura o producción de otros productos entre y debajo de los paneles. Resultado: aumento de la producción local de alimentos.

Beneficios para las mineras con el concepto Food & Energy:

- Producción de energía renovable para suplir parte de la necesidad eléctrica de la compañía minera o de las poblaciones cercanas
- Producción de alimentos frescos para los comedores de los trabajadores de las minas
- Plataforma para el desarrollo de proyectos de responsabilidad social para las poblaciones cercanas a las minas
- Oportunidades de puestos de trabajo bajo los paneles solares
- Oportunidades de investigación y desarrollo en conjunto con instituciones locales e internacionales



1 El uso de módulos **glass-glass**, la luz del sol puede alcanzar cultivos, haciendo que la horticultura sea posible

2 Las **estructuras elevadas hasta 4 metros**, hace posible trabajar debajo de los paneles

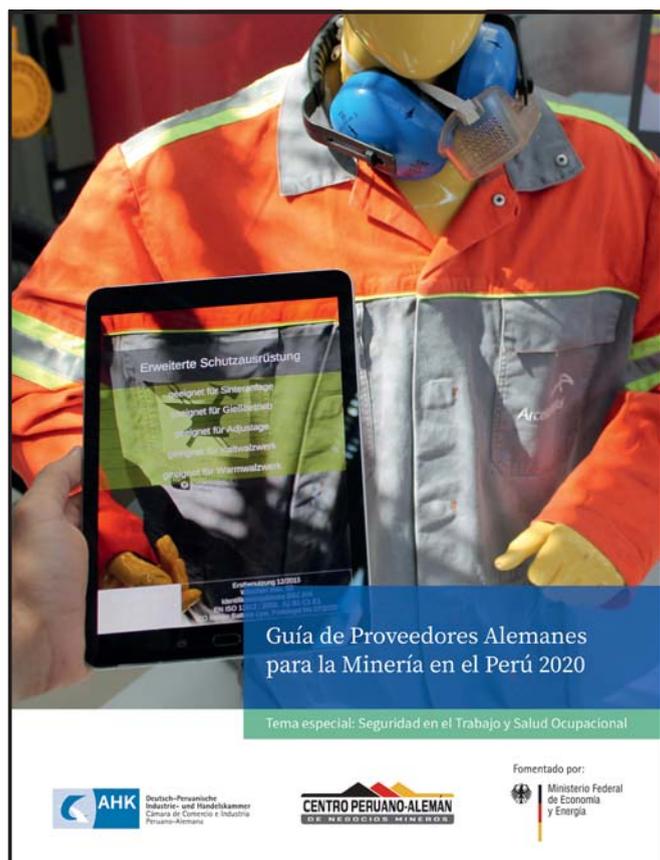
3 Se **incrementa las distancias entre hileras hasta 4-5 metros** además incorporando una malla especial, la bio-horticultura se hace posible

Ilust. 33: Sistema SUNfarming Food & Energy/ ©SUNfarming GmbH

Guía de Proveedores Alemanes para la Minería en Perú 2020

Tema Especial: Seguridad Laboral y Salud Ocupacional

Explore esta nueva edición en la plataforma online



Acceso a la versión online:



<http://guiamineraalemana.com/>

