SERNAGEOMIN
Ministerio de Minería
Gobierno de Chile

Proyecto apoyado por CORFO

FCH FUNDACIÓN CHILE

Catastro de Medidas y Tecnologías **para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero**

2015

Catastro de Medidas y Tecnologías para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero

Fundación Chile, 2015
Av. Parque Antonio Rabat Sur 6165, Vitacura
Web: www.fch.cl
Santiago – Chile

El presente manual ha sido elaborado por Fundación Chile para Servicio Nacional de Geología y Mineria (Sernageomin)

Diseño y diagramación por Isidora Escobar Arellano. **www.zaina.cl**

Proyecto apoyado por CORFO

Desarrollado por FCH FUNDACIÓN CHILE

Publicación sin fines comerciales. Reservados todos los derechos. Queda autorizada su reproducción y distribución con previa autorización y citando a la fuente.

Parte de la información de este documento, ha sido extraída de medios especializados o páginas relacionadas a la materia, con información pública disponibles en internet.

Catastro de Medidas y Tecnologías
para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero

2015

ÍNDICE

1 Introducción **6**

2 Objetivos y alcance **6**

3 Algunos conceptos **7**

4 Fichas de estrategias y medidas de prevención y control del drenaje minero **8**

5 Fichas de tecnologías de tratamiento de drenaje minero **56**

5.1 Fichas de tratamiento pasivo 57

5.2 Fichas de tratamiento activo 80

6 Referencias bibliográficas **124**

7 Equipo de trabajo **133**

1. Introducción

De acuerdo a lo descrito en la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras, el aseguramiento de la estabilidad química de una faena incluye a todas aquellas medidas de gestión cuyos objetivos van dirigidos a la prevención de los procesos de generación de drenaje minero, así como también al control y/o tratamiento del mismo.

Cualquiera sea el plan de acción a seguir involucrará medidas y/o tecnologías de prevención, control y/o tratamiento de diversos niveles de complejidad, los que están en permanente proceso de desarrollo, y su aplicación tanto a nivel de pruebas de laboratorio como a nivel de pruebas piloto en terreno, requiere de una participación multidisciplinaria de expertos.

La adecuada selección de una medida o tecnología está determinada por los objetivos trazados y su grado de cumplimiento podrá ser evaluado a través de un monitoreo continuo. De este modo, el monitoreo también se considera una etapa que asegura la estabilidad química. El monitoreo es, por ende, una etapa que influye directamente en la toma de decisiones en la gestión integral del drenaje minero.

La experiencia de Chile respecto de la evaluación y desarrollo de una estrategia de gestión para el aseguramiento de la estabilidad química es reciente y por lo tanto limitada. Concretamente es en el año 2012, con la entrada en vigencia de la Ley 20.551 que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, que nuestro país aborda el cierre de las faenas mineras incorporando la estabilidad química.

Junto con la Guía Metodológica se ha elaborado un Catastro con fichas de información sobre medidas y tecnologías enfocadas a la prevención y el control, así como al tratamiento del drenaje minero. Se incluyen, además de los objetivos y una breve descripción, aspectos relacionados a su nivel de desarrollo, eficiencia, ventajas y desventajas de su aplicación, entre otros. Resultando una herramienta complementaria de información que permitirá abordar el tema de la gestión del drenaje minero de forma integral y responsable.

2. Objetivos y alcances

El presente Catastro corresponde a un documento que recopila información acerca de las medidas y tecnologías existentes y emergentes aplicadas a procesos de prevención, control y tratamiento del drenaje minero y su objetivo es servir como fuente de información para la gestión de la estabilidad química de las instalaciones mineras, de manera de asegurar esta condición al momento del cierre.

3. Algunos conceptos

Para la comprensión de este Catastro se requiere conocer algunos conceptos claves. Así, a continuación se definen los conceptos de *drenaje minero, fuente potencialmente generadora de drenaje minero, factores ambientales, medida o tecnología convencional, no convencional o emergente.*

• **Drenaje minero:** efluente generado producto de la interacción entre las fuentes potencialmente generadoras y los factores ambientales.

• **Fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero:** todas aquellas instalaciones mineras constituidas por materiales que, tras un proceso físico y/o químico de carácter antrópico, quedan expuestos a los factores ambientales como superficies con capacidad de reacción. Si, tras un proceso de caracterización y evaluación, se comprueba la capacidad de generación de drenaje minero, estas instalaciones pasan a ser fuentes generadoras.

Se incluyen los residuos mineros masivos (botaderos, depósitos de lixiviación y depósitos de relaves), minas a rajo abierto y subterráneas.

• **Factores ambientales:** aquellos que son necesarios para el proceso de generación de drenaje minero. Estos factores son principalmente el agua y el oxígeno.

• **Medida o tecnología convencional:** aquella que se considera mundialmente conocida y ampliamente instalada (C).

• **Medida o tecnología no convencional:** aquella que se considera innovadora con algunas implementaciones existentes en el mundo (NC).

• **Medida o tecnología emergente:** aquella que se encuentra en un desarrollo a nivel piloto (E).

4. Fichas de estrategias y medidas de prevención y control del drenaje minero

A continuación se presenta información de aquellas *medidas de prevención y control* consideradas relevantes, las cuales se aplican en diferentes instalaciones mineras consideradas fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero. Para cada uno de los métodos se presenta su objetivo, aplicación, aspectos críticos, ventajas y desventajas, esquemas visuales y eficiencia, entre otros. Esta información ha sido compilada en forma de Ficha, cuyo ejemplo de contenido se presenta en la siguiente Figura. A continuación, en la Tabla 1 se presenta el listado de las *medidas de prevención y control* incluidas en el Catastro.

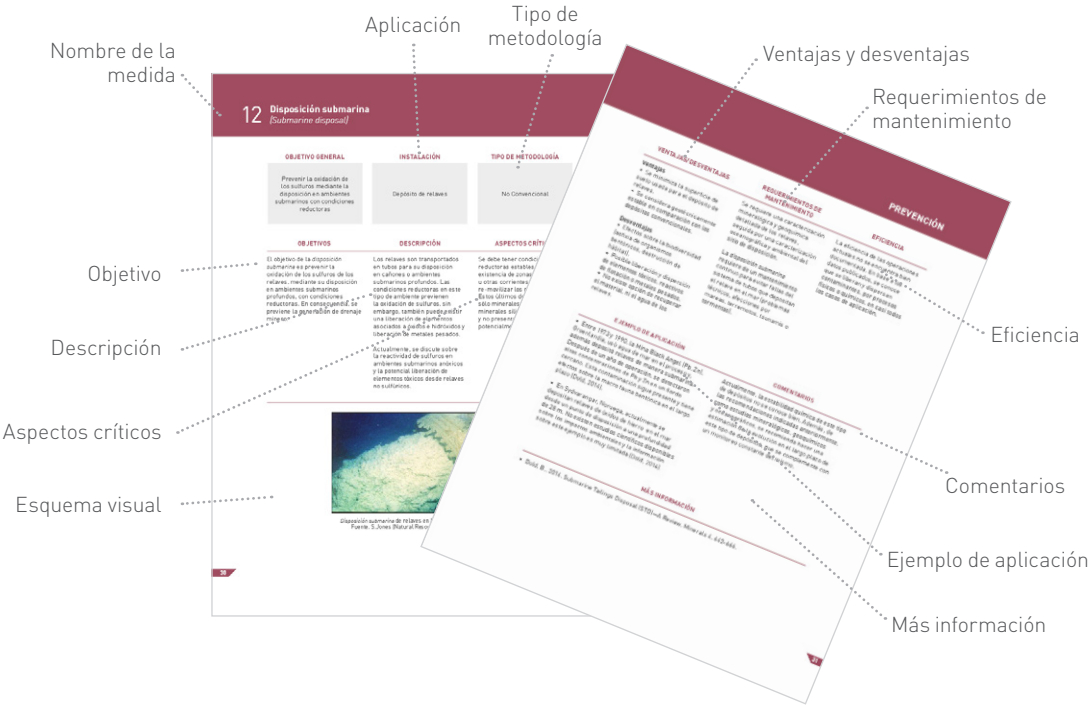


Figura 1. Contenido de fichas de información para las estrategias y medidas de prevención y control seleccionadas.

Tabla 1. Listado de la fichas de las estrategias y medidas de prevención y control.

NÚMERO	ESTRATEGIA Y MEDIDA DE PREVENCIÓN Y/O CONTROL	PÁGINA
1	Minería secundaria	10
2	Planificación de la explotación/Minería selectiva	12
3	Manejo selectivo	14
4	Mezcla de materiales	16
5	Enmiendas alcalinas	18
6	Microencapsulación/Pasivación	20
7	Prevención/Control microbiológico	22
8	Relaves espesados	24
9	Relaves filtrados	26
10	Relaves en pasta	28
11	Desulfuración	30
12	Disposición submarina	32
13	Drenaje de relaves	34
14	Control del nivel de agua	36
15	Desvío cursos de agua	38
16	Sellos	40
17	Liners	42
18	Cubiertas de evaporación/Evapotranspiración	44
19	Cubiertas repelentes de agua	46
20	Cubiertas de agua	48
21	Cubiertas de materia orgánica	50
22	Cubiertas electroquímicas	52
23	Atenuación natural	54

1 Minería secundaria
(Secondary mining)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Control del material con capacidad de generar drenaje minero mediante la explotación de mena remanente o el beneficio de aquellos materiales con potencial económico	Botaderos Depósitos de relaves Depósitos de lixiviación Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Convencional

OBJETIVOS

Desde el punto de vista de la estabilidad química la *minería secundaria* tiene por objeto el control del material con capacidad de reacción ya sea mediante la explotación de mena en rajos y minas subterráneas; o mediante la remoción del material en botaderos, depósitos de relaves o depósitos de lixiviación, disminuyendo directamente la cantidad de material disponible con capacidad para generar drenaje minero. En la realidad, esta medida también tiene un objetivo económico, ya que en cualquiera de las instalaciones se busca obtener un beneficio económico de aquellos materiales con potencial en el mercado.

DESCRIPCIÓN

Esta medida de control consiste en la explotación de la mena remanente de las minas de rajo abierto o subterráneas. Como por ejemplo, la explotación de pilares de minas subterráneas abandonadas, mediante la técnica "daylighting".

Por otro lado, la *minería secundaria* también está enfocada en la recuperación de los materiales con valor económico desde los distintos depósitos de residuos mineros masivos (botaderos, depósitos de relaves o ripios de lixiviación) para su reprocesamiento.

ASPECTOS CRÍTICOS

El aspecto crítico más relevante es asegurar que la perturbación de minas cerradas o el reproceso de los residuos mineros masivos, no derive en la liberación de nuevos metales o la movilización de nuevos materiales con capacidad de reacción que, en su interacción con los factores ambientales, pueda significar un riesgo para la salud de las personas y/o el medio ambiente.

Re-explotación en Hard Cash Mine (Montana, EE.UU.).
Fuente. Montana Headwaters, Abandoned Mine Reclamation Project.
(www.future-west.org/projects/montana-headwaters-abandoned-mine-reclamation-project)
[Consulta: 16 mayo 2015]

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Desde un punto de vista ambiental, contribuye a la gestión de sitios cerrados y/o abandonados.
- Puede suponer un beneficio económico para la faena.

Desventajas
- En la mayoría de los casos se necesita probar un potencial económico.
- Puede incrementar la disponibilidad de material para generar drenaje minero o suponer la movilización o liberación de metales.
- Interferencias con otras medidas, por ejemplo, con la existencia de cubiertas.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

La re-explotación de minas cerradas/abandonadas debe ser realizada bajo condiciones operacionales seguras.

Es importante evaluar la potencial redistribución de los contaminantes al medio ambiente durante el reprocesamiento.

EFICIENCIA

La *minería secundaria* de una mina cerrada puede ser menos eficiente si se compara con la explotación de nuevos depósitos.

El reprocesamiento de los residuos mineros masivos, por ejemplo, un depósito de relaves, requiere de pruebas mineralógicas y metalúrgicas detalladas, para optimizar el proceso. Sin embargo, desde un punto de vista sustentable puede ser beneficioso.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

- En el Estado de Montana (EE.UU.) existe una coalición pública-privada llamada Montana Headwaters Abandoned Mine Reclamation Project encargada de la gestión de miles de minas abandonadas, priorizando la re-explotación de aquellas con mayor impacto en la calidad de las aguas. En la figura, un ejemplo de aplicación de re-explotación en Hard Cash Mine.

- Son varias las minas de carbón que fueron abandonadas en Pennsylvania (EE.UU.) antes de la promulgación en 1977 del SMCRA – Surface Mining Control and Reclamation Act. La re-explotación del carbón, de estas minas, sin duda constituye una buena medida de gestión de faenas abandonadas, extrayendo los pilares de manera eficiente *(minería secundaria)*, a pesar de tener menor valor energético que el explotado de manera tradicional en el pasado (Abandoned Mine Reclamation Clearing House.org).

COMENTARIOS

Esta medida puede llegar a tener muchos beneficios, por lo que tras un estudio de factibilidad adecuado es una técnica altamente recomendada.

MÁS INFORMACIÓN

- Faulkner, B.B. and Skousen, J.G., 1995.. Effects of land reclamation and passive treatment systems on improving water quality. Green Lands 25:34-40.
- Hawkins, J.W., 1994. Assessment of contaminant load changes caused by remining abandoned coal mines. p. 20-29. In: International Land Reclamation and Mine Drainage Conference, 24-29 April 1994, USDI, Bureau of Mines SP 06A-94, Pittsburgh, PA.
- PADEP, 1998. Pennsylvania's Comprehensive Plan for Abandoned Mine Reclamation, Bureau of Abandoned Mine Reclamation, PADEP, June, 1998.
- Skousen, J.G., Hedin, R. and Faulkner, B.B., 1997. Water quality changes and costs of remining in Pennsylvania and West Virginia. p. 64-73. In: 1997 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, 10-15 May 1997, Austin, TX.

2 Planificación de la explotación/Minería selectiva
(Mine planning/Selective mining)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Manejo del material con capacidad de reacción y con capacidad de neutralización, planificando su explotación	Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Convencional

OBJETIVOS

El objetivo principal de esta medida es *planificar la explotación* de rajos y minas subterráneas, integrando un Plan de Gestión de estas instalaciones en relación al drenaje minero, desde las fases tempranas de exploración, y continuando a lo largo de todo el ciclo de vida de la faena hasta su cierre final.

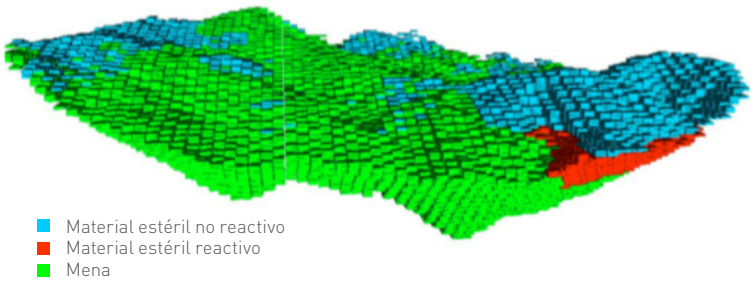
DESCRIPCIÓN

El enfoque integral de la gestión del drenaje minero en la *planificación de una explotación*, involucra el trabajo conjunto de geólogos, planificadores mineros y profesionales del área de sustentabilidad, para asegurar las opciones de gestión más compatibles con el Plan Minero.

Las prácticas comúnmente usadas en este sentido incluyen, por ejemplo, la explotación selectiva del material, la planificación de la explotación de los sectores más reactivos, la encapsulación de materiales considerados como generadores de drenaje minero, la planificación del depósito del material, la aislación del fondo del rajo con barreras o la prevención de su interacción con agua subterránea.

ASPECTOS CRÍTICOS

Se requiere un programa detallado de pruebas geoquímicas en la fase de planificación, incluyendo ensayos cinéticos, para apoyar en el proceso de creación de los modelos de bloques y/o otros tipos de modelos, que representen las propiedades de la roca o material con respeto a su potencialidad para generar drenaje minero.



Visualización de varios tipos de roca en un rajo abierto (Modelo de bloques).
Fuente. Modificado de Topal *et al.*, 2009.

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Mejor cuantificación del potencial de generación de drenaje minero a lo largo del ciclo de vida de una faena minera. • Gestión enfocada en la reducción de los impactos ambientales. • Optimiza el uso de material estéril disponible para la construcción de cubiertas. **Desventajas** • Puede suponer mayores costos iniciales, por los análisis adicionales en la etapa de exploración y mayor tiempo invertido en la planificación de la explotación.	Necesidad de que exista un compromiso de todo el equipo de operación, planificadores y profesionales del área de sustentabilidad. Esta medida se debe integrar completamente en el modelo minero económico a lo largo de todo el ciclo de vida de una faena minera.	Su eficiencia ha sido probada en algunos casos de estudio (Ver ejemplo de aplicación).

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
• Pearce (2014) presentó la evaluación y el diseño de la "co-disposición" del material con potencial para producir drenaje minero ácido tras su explotación, trabajando en conjunto con geólogos y planificadores, y consiguiendo un enfoque integral de la gestión del drenaje minero desde las etapas más tempranas. Este enfoque resultó ser exitoso y compatible con la planificación de la faena minera. • En la mina Bingham Canyon (EE.UU.) se clasificó las rocas en base a los valores del potencial neto de neutralización, como medida de prevención (minería selectiva) (Borden, 2003).	Esta medida es altamente recomendable para la gestión de la estabilidad química en el largo plazo, la cual debe ir de la mano con las fases de operación y explotación del mineral, gestión que debiera pasar a formar parte del Plan Minero de cualquier faena minera.

MÁS INFORMACIÓN

• Borden, R.K.,2003. Environmental geochemistry of the Bingham Canyon porphyry copper deposit, Utah. Environmental Geology 43(7):752–758.
• Pearce, S.R., 2014. Beyond the PAF Cell, In H. Miller and L. Preuss (eds) Proceedings of 8th Australian workshop on acid and metalliferous drainage, 29 April-2 May 2014, Adelaide, South Australia, Published by JKTech.
• Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R. and Hellier, W., 1998. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. Published by National Mined Land Reclamation Centre at West Virginia University, 140 pp.
• Topal, E., Williams, D., and Zhang, N., 2009. Developmnet and validation of a waste rock dumping optimisation model. In Securing the future mining, metals and the environment in a sustainable society, Proceedings of 8th ICARD International Conference on Acid Rock Drainage Sweden 23-26 June 2009, Online pages 1-11.

3 Manejo selectivo
(Selective handling)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Manejo del material aprovechando sus propiedades para prevenir la generación del drenaje minero	Botaderos Depósitos de relaves Depósitos de lixiviación	Emergente

OBJETIVOS

El *manejo selectivo* del material es una medida de gestión de los distintos tipos de materiales en base a su capacidad de generar acidez o su potencial de neutralización, desde que se explotan en los rajos o minas subterráneas hasta su depósito en botaderos, relaves o ripios de lixiviación, para prevenir la generación de drenaje minero.

Asimismo, el *manejo selectivo* busca maximizar el uso de las rocas con capacidad de neutralización en una faena minera.

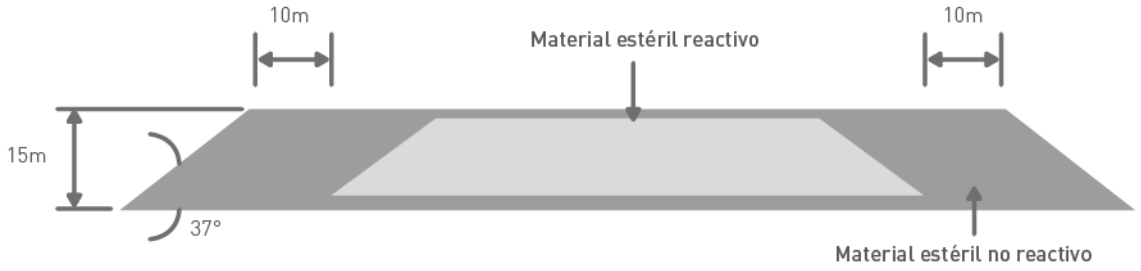
DESCRIPCIÓN

La rocas extraídas de una operación minera con características similares según la litología, mineralogía y alteración, se pueden agrupar en unidades discretas, también conocidas como unidades geoambientales.

Esta medida forma parte de la toma de decisiones sobre la disposición o ubicación de los materiales en una instalación (botaderos, depósitos de relaves y ripios de lixiviación). Este manejo puede suponer por ejemplo la mezcla de materiales o la encapsulación de aquellos considerados como generadores de acidez, de tal manera que al momento de cierre de la faenas, la instalación sea considerada estable químicamente.

ASPECTOS CRÍTICOS

Es necesario hacer una caracterización geoquímica completa del material, que será clave para que los resultados del *manejo selectivo* sean exitosos.



Depósito selectivo (encapsulación) de rocas potencialmente generadoras de ácido (material estéril reactivo) y no generadoras de ácido en un botadero (Material estéril no reactivo).
Fuente. Modificado de Williams *et al*., 2006.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- El *manejo selectivo* de material puede reducir los costos de tratamientos futuros.
- Reduce sustancialmente los costos asociados al monitoreo del material generador de drenaje minero.

Desventajas
- El *manejo selectivo* requiere de una planificación cuidadosa sobre el lugar donde se va a depositar cada tipo de material.
- Es necesaria la atención adicional por los operadores de maquinaria encargados del movimiento de materiales.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

Esta medida requiere una matriz precisa de clasificación del material y de su destino o disposición final, que sea actualizada constantemente y de fácil entendimiento por todos los profesionales involucrados.

Se debe coordinar el trabajo de geólogos, profesionales del área de sustentabilidad, planificadores corto, mediano y largo plazo, y conductores de camiones, entre otros.

EFICIENCIA

Esta medida puede llegar a ser muy eficiente, especialmente si la caracterización y clasificación geoquímica de las unidades discretas es adecuada y fiable. De tal modo que se considera más costo-eficiente en comparación con otras medidas de prevención y control.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Pearce (2014) mostró la factibilidad técnica del *manejo selectivo* y la co-disposición de material no generador de ácido (NAF) y material con potencial de generar ácido (PAF) para una faena minera en Australia Occidental. La investigación incluyó una caracterización geoquímica detallada de los materiales NAG potencialmente aptos para ser usados en la co-disposición en el botadero.

COMENTARIOS

El *manejo selectivo* del material de forma proactiva, basado en una caracterización fiable de las propiedades generadoras de ácido o de la capacidad de neutralización, es una medida muy recomendada para la gestión de la estabilidad química y del drenaje minero en el largo plazo.

MÁS INFORMACIÓN

- Arcos, D., Von Igel, W., Flores, L.G. and Acuña, A., 2011. Geo-environmental units (GEUs) in waste dumps from Collahuasi, Enviromine 211, 2nd International Seminar on the Environmental Issues in the Mining Industry, 23-25 November 2011, Chile.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D., and Moran, C., 2014. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches, Journal of Cleaner Production, Journal of Cleaner Production 84, 411-420.
- Pearce, S.R., 2014. Beyond the PAF Cell. In H. Miller and L. Preuss (eds) Proceedings of 8th Australian workshop on acid and metalliferous drainage, 29 April-2 May 2014, Adelaide, South Australia. Published by JKTech.
- Topal, E., Williams, D., and Zhang, N., 2009. Development and validation of a waste rock dumping optimisation model. In Securing the future mining, metals and the environment in a sustainable society. Proceedings of 8th ICARD International Conference on Acid Rock Drainage Sweden 23-26 June 2009. Online pages 1-11.
- Williams, D.J., Stolberg, D.J., and Currey, N.A., 2006. Long-term performance of Kidston's store/release cover system over potentially acid forming waste rock dumps. Paper presented at the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis MO. R.I. Barnhisel (ed.) Published by the American Society of Mining and Reclamation (ASMR), 3134 Montavesta Road, Lexington, KY 40502, P. 2385-2396.

4 Mezcla de materiales
(Blending and Layering (Material mixing))

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Maximizar el proceso de neutralización y mejorar las propiedades geotécnicas de la mezcla	Botaderos Depósitos de relaves	Emergente

OBJETIVOS

El principal objetivo es que los botaderos y depósitos de relaves construidos con esta técnica sean considerados como instalaciones no generadoras de drenaje minero, mediante la *mezcla de materiales* clasificados como generadores de acidez y aquellos considerados como consumidores de acidez (material alcalino).

DESCRIPCIÓN

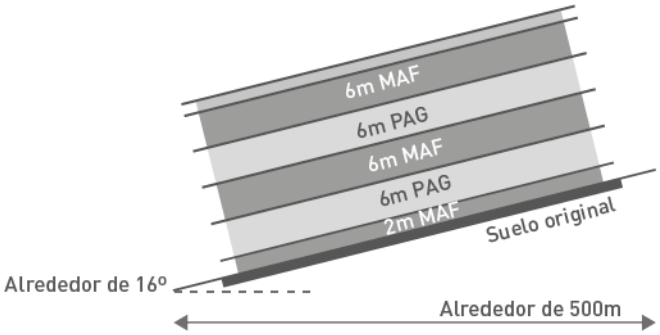
La *mezcla de material* (por mezcla o bandeado) persigue el consumo total de la acidez en el interior de la instalación, así como la precipitación de los iones disueltos, producto de la oxidación de los sulfuros, que en concentraciones elevadas pueden ser dañinos y constituir un riesgo para la salud de las personas y/o el medio ambiente.

Una variante de esta medida es añadir materiales adicionales, como por ejemplo, fosfatos (como el apatito). Este mineral reacciona con los estériles piríticos para precipitar en forma de hierro (III) como fosfato férrico, y de este modo reducir el potencial de oxidación de los sulfuros en estos residuos, limitando la generación de drenaje minero.

ASPECTOS CRÍTICOS

El aspecto crítico más importante es asegurar una mezcla adecuada entre los materiales alcalinos y los considerados como productores de acidez.

Se ha comprobado que la disposición de material de sobrecarga directamente después de la excavación es más eficiente.



Esquema del diseño bandeado en una sección de un botadero en Mina Samatosum (Canadá). Donde el material MAF son rocas máficas piroclásticas consumidoras de ácido, y PAG es el material con potencial para producir ácido (Potential Acid Generating).
Fuente. Modificado de MEND, 1998.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Gestión de materiales de distinta naturaleza que se encuentran en una faena minera.
- Reducción de la tasa de generación de acidez y lixiviación de metales por precipitación de los metales en el interior de la instalación.

Desventajas
- Son muchos los factores que condicionan el éxito de esta medida (grado y homogeneidad de la mezcla, naturaleza del contacto, tamaño de partículas, etc.).

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

El material estéril debe tener un potencial suficiente de neutralización para mantener las condiciones alcalinas. En caso contrario se hace necesario adicionar material consumidor de ácido como calizas.

El uso de capas o cubiertas de caliza es más eficiente en ambientes con alta precipitación.

A menor tamaño de partícula o granulometría, el efecto del material neutralizador aumenta.

EFICIENCIA

La eficiencia de esta medida es muy variable, ya que depende de muchos factores:

- Método de aplicación.
- Tamaño del material.
- Flujo hidráulico del agua y efluentes en el interior de la Fuente.
- Precipitación esperada.
- Etc.

La eficiencia está directamente relacionada con la realización previa de ensayos pilotos a distintas escalas.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

En la Mina Samatosum en Canadá, la roca estéril fue clasificada antes de la explotación como material potencial generador de ácido (PAG) o no generador de ácido (NAG) de acuerdo a la litología. Según los resultados de ensayos en columnas, el botadero fue construido siguiendo un diseño en capas alternantes de material PAG y material NAG (MEND, 1998).

COMENTARIOS

Esta medida supone el aprovechamiento del material alcalino presente en una faena minera, significando un gran aporte costo-eficiente en la gestión del drenaje minero.

MÁS INFORMACIÓN

- Andrina, J., Wilson, W., and Miller, S., 2009. Behavior of water flow and geochemical mixing in layered waste rock stockpiles: a meso-scale experiment. In: Proc. Securing the Future and 8th Internat. Conf. on Acid Rock Drainage, June 22–26, 2009, Skellefteå, Sweden.
- MEND, 1998. Blending and Layering Waste Rock to Delay, Mitigate or Prevent Acid Rock Drainage and Metal Leaching: A Case Study Review. MEND Project 2.37.1.
- Sahoo P.K., Kim, K., Equeenuddin, S.M., and Powell, M.A., 2013. Current approaches for mitigating acid mine drainage. RevEnvironContamToxicol 226, 1-32.

5 Enmiendas alcalinas
(Alkaline amendments)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Neutralización de acidez	Botaderos Depósitos de relaves Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Convencional

OBJETIVOS

El uso de *enmiendas alcalinas* tiene la finalidad de prevenir la generación de drenaje minero o de su control una vez generado, mediante la adición de material con capacidad de neutralizar la acidez generada e inhibir la precipitación de hidróxidos.

Asimismo, el incremento del pH también limita *per se* la oxidación del material sulfuroso.

DESCRIPCIÓN

Las *enmiendas alcalinas* pueden ser líquidas, en forma de solución, suspensión o lechada, o en forma sólida como material que se mezcla o se deposita en capas *(blending, layering),* junto a los residuos mineros masivos para controlar las reacciones químicas que producen drenaje minero ácido.

Los materiales alcalinos que se usan más comúnmente son: hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$), cal (CaO, $Ca(OH)_2$), y caliza ($CaCO_3$). También se utilizan subproductos industriales, como ceniza volante y lodo rojo producto de la refinación de la alúmina.

ASPECTOS CRÍTICOS

La aplicación de esta medida está relacionada con los resultados de los métodos predictivos, que evalúan la alcalinidad requerida para la neutralización de material pirítico.

Es frecuente que en el interior del depósito se generen flujos preferenciales por donde circula el agua con mayor facilidad, lo que supone un consumo más rápido de las enmiendas en estas zonas, pero además supone que gran cantidad de material alcalino quede aislado o que la neutralización sea ineficaz en superficie.

Adición de caliza a material estéril potencialmente generador de drenaje minero ácido en la Mina Mount Morgan, Australia.
Fuente. Fotografía gentileza de Mansour Edraki.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Existen numerosas experiencias en el mundo de su aplicación.
- Alta eficacia de neutralización.

Desventajas
- Caminos preferenciales de flujo, y problemas de pasivación de la enmienda.
- Mejor funcionamiento en aquellos climas donde la precipitación es abundante.
- Los costos de las *enmiendas* son muy variables pudiendo ser muy elevados.
- La disponibilidad de estos materiales no siempre es abundante.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

La limitación más importante en la adición de material alcalino es el grado de mezcla entre los materiales. Idealmente, los materiales alcalinos se deben mezclar completamente con el material generador de acidez para llegar a todos los sectores de oxidación, lo que supone un esfuerzo de mantenimiento importante.

EFICIENCIA

Generalmente, la aplicación de soluciones, lodos y lechadas en la superficie del depósito, o la disposición de capas, son menos eficientes que la mezcla directa durante la relocalización o el depósito directo del material. En algunas situaciones, la alcalinidad aplicada como recubrimiento puede ser más eficiente.

En general, la eficiencia es mayor cuanto mejor y más homogénea es la mezcla. Asimismo, la eficiencia también depende del clima y de la cantidad de precipitación.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Existen muchos ejemplos de adición de caliza o, en general, material neutralizador, a residuos mineros masivos. Por ejemplo, en la Mina Grasberg de Freeport- McMoran en Indonesia, se utiliza la caliza como enmienda alcalina para la neutralización de relaves, y se han realizado pruebas en botaderos (Rusdinar *et al.*, 2013).

COMENTARIOS

Esta medida es rentable siempre que los materiales productores de alcalinidad sean abundantes y disponibles a bajos costos. Se debe asegurar que los residuos mineros se mezclan completamente.

Esta técnica requiere de un monitoreo para asegurar la eficiencia del proceso de neutralización en el depósito en el largo plazo.

MÁS INFORMACIÓN

- Evangelou VP., and Zhang YL., 1995. A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. Crit Rev Environ Sci Technol 25:141–199.
- Rose, S., and Elliott, W.C., 2000. The effects of pH regulation upon the release of sulfate from ferric precipitates formed in acid mine drainage, Applied Geochemistry 15, 27-34.
- Rusdinar, Y., Edraki, M., Baumgartl, T., Mulligan, D. and Miller, S., 2013. Long term performance of hydrogeochemical riverine mine tailings deposition at Freeport Indonesia. Mine Water and the Environment, 32 1: 56-70. doi:10.1007/s10230-012-0212-6.
- Stimpfl, M., Carrigan, M.L., McLeary, M.B., and Taylor, J.R., 2009. Approaches to acid and metalliferous drainage management- implications of short-term trials for long-term remediation, In A.B. Fourie, M. Tibbett (eds) Mine Closure, Proceedings of the 4th International Conference on Mine Closure, 9-11 September 2009, Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 273-284.

6 Microencapsulación/Pasivación
(Microencapsulation/Passivation)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Inhibir la oxidación de sulfuros	Botaderos Minas a rajo abierto Minas subterráneas	No convencional

OBJETIVOS

El objetivo de la *microencapsulación o pasivación*, es cubrir la superficie de los sulfuros, creando un revestimiento inerte, que inhiba la oxidación de estos minerales, limitando la disponibilidad de oxígeno y de hierro férrico en su superficie.

DESCRIPCIÓN

Para la aplicación de esta medida se adicionan productos químicos u orgánicos que crean una cubierta químicamente inerte y protectora sobre la superficie de los sulfuros. Esta medida, considerada relativamente nueva, inhibe la oxidación de sulfuros por un período extendido, limitando su reacción con el oxígeno y hierro férrico.

Revestimientos inorgánicos:
Sal de fosfato de hidrógeno de potasio potasio (KH_2PO_4), sílice (SiO_2), permanganato de potasio ($KMnO_4$).
Revestimientos orgánicos:
Ácidos húmicos, lípidos, Polietileno-poliamida, Alcoxisilanos, 8 – Hidroquinalina, Ácidos grasos, Ácido oxálico, Na_2 – BDET, CME.

ASPECTOS CRÍTICOS

Es frecuente la necesidad de generar una oxidación superficial inicial usando peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

La variabilidad de revestimientos inorgánicos y orgánicos es amplia, y cada tipo presenta sus ventajas e inconvenientes. Por ejemplo, las cubiertas de fosfato pueden favorecer el crecimiento microbiano y la eutroficación del agua que entra en contacto con la instalación, son estables a niveles de pH>4 (Evangelou, 1995b), y se requiere un monitoreo continuo para mantener el pH en el nivel deseado.

Otro aspecto crítico en este tipo de medidas, es mantener esta condición en el tiempo.

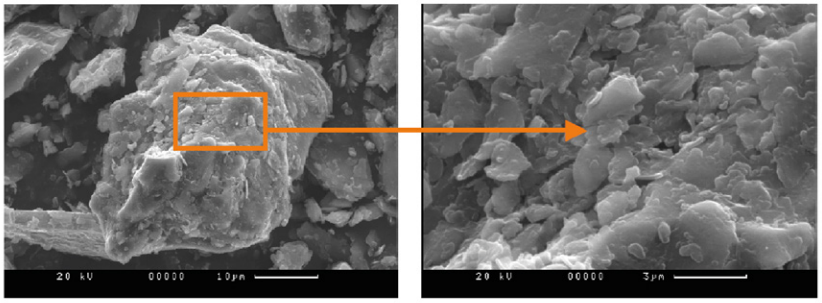


Imagen de SEM - Scanning Electron Microscope mostrando la *microencapsulación* en la pirita.
Fuente. Miller *et al.*, 2009.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Es un método de prevención y control directo sobre los sulfuros.

Desventajas
- Pueden existir problemas con la distribución eficiente, con el mantenimiento de la cubierta o capa en períodos prolongados de tiempo, o con su respuesta a condiciones cambiantes.
- No siempre son inocuas ambientalmente.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

La *encapsulación* se puede alcanzar tanto por la adición de químicos como por la creación y mantenimiento de condiciones favorables para la formación y estabilidad de las capas superficiales oxidadas.

Considerar la necesidad de una oxidación superficial inicial usando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) , ya mencionada anteriormente.

EFICIENCIA

Hasta el momento, la eficiencia de esta medida ha sido probada en columnas a pequeña escala, que pueden ser útiles en alguna fase del desarrollo de botaderos o depósitos de relaves.

Sin embargo, su eficiencia se puede ver afectada por problemas con la distribución eficiente y el mantenimiento de la *encapsulación* por un tiempo extendido y bajo condiciones cambiantes.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Mauric y Lottermoser (2011) hicieron pruebas de *microencapsulación* directamente en terreno, en rocas estériles, en la Mina Century (Pb-Zn), Australia. Los resultados demostraron un éxito limitado en el largo plazo.

- Evangelou (2001) utilizó un revestimiento con fosfatos en residuos mineros de carbón en terreno en el largo plazo, obteniendo resultados positivos durante las primeras 15 semanas. Posteriormente la oxidación aumentó.

COMENTARIOS

Actualmente, esta medida de prevención y control del drenaje minero requiere de más pruebas en terreno para probar su eficacia.

Este método puede ser especialmente útil en los relaves en tubo *(in-pipe)*.

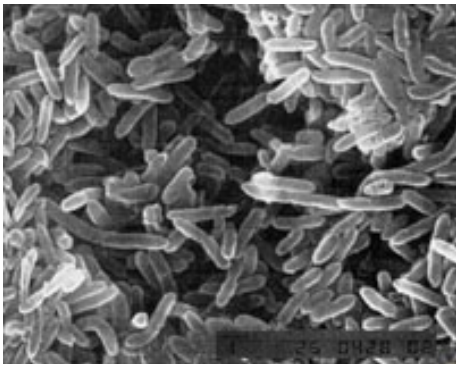
MÁS INFORMACIÓN

- Evangelou VP., 1995b. Potential microencapsulation of pyrite by artificial inducement of ferric phosphate coatings. J Environ Qual 24:535–542.
- Evangelou VP., 2001. Pyrite microencapsulation technologies: principles and potential field application. Ecol Eng 17:165–178.
- Harris, D.L., and Lottermoser, B.G., 2006. Phosphate stabilization of polymineralic mine wastes. Mineralogical Magazine, 70 (1). pp. 1-13.
- Mauric, A. and Lottermoser, B.G., 2011. Phosphate amendment of metalliferous waste rocks, Century Pb–Zn mine, Australia: laboratory and field trials. Applied Geochemistry, 26 (1). pp. 45-56.

7 Prevención/Control microbiológico
(Prevention/Control at microbial level)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Detener o reducir la tasa de oxidación del material sulfuroso mediante el control de la actividad microbiana	Botaderos Depósitos de relaves (Depósitos de lixiviación) Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Emergente

OBJETIVOS	DESCRIPCIÓN	ASPECTOS CRÍTICOS
Prevenir y/o controlar la generación de drenaje minero, inhibiendo la acción de las bacterias involucradas en el proceso de oxidación de la pirita.	Mediante esta medida, se inhiben las bacterias oxidantes de hierro y azufre, cuya presencia aumenta significativamente la tasa de oxidación de la pirita, mediante el uso de bactericidas que alteran la capa de grasa que protege a las bacterias (Sahoo *et al.*, 2013), modificando el contacto que éstas tienen con la superficie de los minerales, o directamente a través del control de las bacterias autótrofas oxidantes de hierro, que compiten por el oxígeno con las bacterias heterótrofas (Jenkins, 2006). Los bactericidas más comunes son: tensioactivos aniónicos (dodecil sulfato sódico, lauril éter sulfato sódico o sulfonato de aquilbenceno lineal), ácidos orgánicos y conservantes de alimentos.	La inhibición bacteriana no puede considerarse como una medida permanente, ya que los bactericidas se descomponen con el paso del tiempo, por lo que debe considerarse la repetición de su aplicación. Existen variedades comerciales de lenta liberación. Es frecuente su uso con otras medidas de prevención/control.



Thiobacillus ferroxidans, bacterias que participan en la oxidación de los sulfuros.
Fuente. Codelco Educa.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Se pueden aplicar en estado líquido, lo cual facilita su aplicación.
- Se considera como una medida de menor costo, en comparación con otras medidas de prevención o control.
- Se utilizan en el control inmediato una vez probado que se genera drenaje minero ácido.

Desventajas
- Esta técnica no se considera como solución a largo plazo.
- Pueden ser tóxicos para organismos acuáticos.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

Los avances en la investigación sobre los requerimientos de esta medida son limitados, y muchas veces las condiciones de laboratorio no son aplicables en situaciones reales.

EFICIENCIA

Su eficiencia es mayor en sulfuros no oxidados o "frescos", por lo que pueden ser aplicados como aerosoles en las correas transportadoras de residuos de carbón o vertidos desde camiones directamente en la instalación.

Esta medida funciona mejor al utilizarla en combinación con otros métodos de control.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

En la Mina Confidential, Idaho (EE.UU.), se realizaron ensayos en columnas así como en terreno para evaluar la eficacia de la adición de bactericidas a la roca estéril. Dado que los resultados de los ensayos en columna indicaron que la aplicación de bactericidas podía ser eficiente en inhibir la generación de drenaje minero, se inició un ensayo en terreno, en el cual el bactericida fue aplicado a la roca estéril en forma líquida. Durante 15 meses de monitoreo, el drenaje del sitio tratado presentó un pH de 5,6, así como un 93 % menos de acidez y un 70% menos sulfato que el sitio de control (Parisi, 1994).

COMENTARIOS

Existen en el mercado variedades comerciales, como pellets, cuya liberación se prolonga en el tiempo, lo que es una ventaja y una solución a la lixiviación o degradación que estos compuestos sufren en el interior de la instalación.

Los inhibidores considerados más fiables son: los tensioactivos aniónicos, como el dodecilsulfato sódico ($C_{12}H_{25}NaO_4S$), el lauril éter sulfato sódico (SLES) o el sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS).

MÁS INFORMACIÓN

- Jenkins, J.D., 2006. Role of Flow and Organic Carbon on Acid Mine Drainage Remediation in Waste Rock, PhD Thesis, University of Colorado, 213 pages.
- Parisi, D., Horneman, J., and Rastogi, V., 1994. Use of bactericides to control acid mine drainage from surface operations. In: Proceedings of the international land reclamation and mine drainage conference, U.S. Bureau of Mines SP 06B-94, Pittsburgh, PA, pp 319–325.
- Sahoo P.K., Kim, K., Equeenuddin, S.M., and Powell, M.A., 2013. Current approaches for mitigating acid mine drainage. Rev Environ ContamToxicol 226, 1-32.

8 Relaves espesados
(Thickened tailings)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Disminuir el contenido en agua en los relaves, para prevenir la generación de drenaje minero y obtener mejoras en el proceso	Depósitos de relaves	Convencional

OBJETIVOS	DESCRIPCIÓN	ASPECTOS CRÍTICOS
El principal objetivo de esta medida es la prevención de la generación de drenaje minero, a través de la disminución de la cantidad de agua disponible y de la difusión del oxígeno, y la mejora en la gestión, a todos los niveles, de los depósitos de relaves.	Los relaves se someten a una sedimentación previa, en espesadores, para eliminar la cantidad de agua y, como resultado, generar una mezcla densa y viscosa de sólidos (relave) y agua, considerada de alta densidad y con la particularidad de que no se segrega. Es frecuente el uso de floculantes que ayudan en la deposición y aglomeración de los sólidos (relaves).	En los *relaves espesados* el control de los parámetros reológicos es clave, en particular, el límite elástico de la mezcla. La deshidratación debe ser tal, que este tipo de relaves, puedan ser transportados a través de tubos sin que se produzca una segregación de la mezcla.

Decreto Supremo N° 248. Artículo 6º, letra l.

Relaves espesados: depósito de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminándole una parte importante del agua que contienen. El depósito de relaves espesados deberá ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado y contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente.

Depósito de *relaves espesados* en Mina Sunrise Dam, Australia.
Fuente. Australian Government, 2007.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Disminuye la permeabilidad del sistema, la cantidad de agua disponible y la difusión de oxígeno.
- Minimiza la huella y los riesgos de falla del depósito, y el número de presas o muros de contención.
- Sus características son apropiadas para el relleno de minas.

Desventajas
- Un alto contenido en arcillas puede generar problemas en el proceso de sedimentación.
- Se requiere gestión del agua de lluvia.
- Se requiere maquinaria específica.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

En este tipo de relaves, los componentes para la preparación y el transporte deben ser integrados junto a los de disposición.

EFICIENCIA

La eficiencia está determinada por el sistema de bombeo y el desempeño de los espesadores, que se mejora mediante la adición de floculantes.

Puede existir una compensación en el proceso, entre la energía necesaria y la recuperación de agua (compensaciones/soluciones intermedias de agua y energía).

Aunque los costos son elevados en comparación con los relaves convencionales, se consideran rentables a largo plazo.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

En la Mina Sunrise Dam en Australia Occidental, se cambió la gestión de relaves de un depósito convencional a un nuevo depósito de relaves espesados. La forma del depósito de los relaves espesados es un cono de bajo perfil, con una altura de 15 m en el año 2005. La producción anual de relaves es 3,6 Mt (Australian Government, 2007).

COMENTARIOS

Este tipo de depósito se considera adecuado en zonas áridas, zonas frías, zonas de alta sismicidad, o en faenas donde topográficamente no sea posible la instalación de presas o tranques de relaves.

MÁS INFORMACIÓN

- Al, T.A., and Blowes, D.W., 1999. The hydrogeology of a tailings impoundment formed by central discharge of thickened tailings: implications for tailings management, Journal of Contaminant Hydrology 38.
- Australian Government, 2007. Department of Industry Touris and Resources. Tailings Management. Leading Practice Sustainable Development Program for the Minng Industry. 88 p.
- Franks, D.M., Boger, D.V., Cote, C.M., and Mulligan, D.R., 2011. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes.Resour. Policy 36, 114-122.
- Mudd, G., and Boger, D.V., 2013. The ever growing case for paste and thickened tailings towards more sustainable mine waste management. Aust. Inst. Min. Metall. Bull. 2, 56-59.
- Rashidinejad, F., and Naraghi, S., 2011, Tailings disposal options study for Sangan Iron Mine Project - Iran. In Proceedings of the fifteenth International Conference on Tailings and Mine Waste, held in Vancouver, BC, November 6-9, pp 757-770.
- Schoenbrunn, F., and Laros, T., 2002. Design Futures and Types of Sedimentation Equipment. In: A.L., Mular, D.N., Halbe, and D.J., Barratt, ed. Proceedings of the Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control. Vol.2, USA: SME, 1331-1341.

9 Relaves filtrados
(Filtered tailings)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Disminuir el contenido en agua en los relaves, para prevenir la generación de drenaje minero y obtener mejoras en el proceso	Depósitos de relaves	Convencional

OBJETIVOS	DESCRIPCIÓN	ASPECTOS CRÍTICOS
Al igual que en los relaves espesados, el principal objetivo de los *relaves filtrados* es la prevención de la generación de drenaje minero, a través de la disminución de la cantidad de agua disponible, alcanzando un contenido en humedad menor al 20%, y limitando la capacidad de difusión del oxígeno. Asimismo, tiene por objeto la mejora en la gestión, a todos los niveles, de los depósitos de relaves.	Los relaves se someten a procesos de filtración, mediante el uso de filtros de presión y tecnología de alta capacidad de vacío, antes de su depósito final como relaves no saturados o con un contenido en humedad menor al 20%, que se conoce como "torta seca".	Se debe considerar que para que el relave tenga la humedad necesaria para la correcta aplicación de este tipo de tecnología, la mayor cantidad de poros deben estar llenos de agua. Sin embargo, esta cantidad no debe ser excesiva para evitar posibles problemas de compactación que dificulten el proceso. La mineralogía, el tamaño de grano y la naturaleza de los relaves son aspectos críticos que se deben considerar a la hora de filtrar.

Decreto Supremo N° 248. Artículo 6º, letra m.

Relaves filtrados: depósitos de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de filtración, mediante equipos especiales de filtros, donde se asegure que la humedad sea menor a un 20%. Deberá asegurarse que el relave así depositado no fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado.

Apilamiento de *relaves filtrados*.
Fuente. Jon Engels – www.tailings.info

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Recuperación más eficiente de agua. • Almacenamiento en pilas de los relaves, constituyendo un menor riesgo ya que no requiere de presas de contención. **Desventajas** • Alcanzar el grado óptimo de saturación para el proceso de filtrado. • Costo de transporte de la "torta seca". • Se requiere maquinaria específica.	La filtración de relaves se realiza por presión o por vacío. La configuración más común en este tipo de plantas se compone de tambores/cilindros, platos apilados horizontal o verticalmente, y correas horizontales de transporte, que implica requerimientos de mantenimiento de la infraestructura. La filtración por presión se puede realizar para un rango amplio de material. La filtración por vacío generalmente se usa en operaciones a gran escala.	Los rendimientos más altos se obtienen mediante el uso de filtros hiperbáricos.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
En Greens Creek, Alaska, se construyó el primer depósito de relaves filtrados en el mundo. El sistema no necesita una laguna de aguas claras, reduciendo la huella ambiental en más de 50%. Fue diseñado junto con la desviación de aguas superficiales y subterráneas, y cuenta con drenes para promover bajos niveles de agua. Un punto importante en este sitio fue preservar la naturaleza, sin afectar a la población de osos presentes en el sector (Louis Berger, 2015).	Este tipo de depósito se considera adecuado en zonas áridas, frías, en zonas de alta sismicidad, o en faenas donde topográficamente no sea posible la instalación de presas o tranques de relaves.

MÁS INFORMACIÓN

• Davies, M.P., Lighthall, P.C., Rice, S., and Martin, T.E., 2002. Design of Tailings Dams and Impoundments, Keynote Address at Tailings and Mine Waste Practices, SME, AGM, Phoenix, 2002. (En línea). http://www.infomine.com/library/publications/docs/Davies2002b.pdf. Accessed 2/02/2015

• Davies, M., 2011. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals, Proceedings Tailings and Mine Waste 2011 Vancouver, BC, November 6 to 9, 2011.

• Raberger, R., and Krammer, G., 2009. How to meet the challenge of tailings filtration, ENVIROMINE 2009, 1st International Seminar on International Issues in the Mining Industry, 30 September-2 October 2009, Santiago, Chile.

• Louis Berger, 2015. Greens Creek Mine Tailings Storage Facility. Alaska, US. (En línea). http://www.louisberger.com/our-work/project/greens-creek-mine-tailings-storage-facility-alaska-us [Consulta: 22 mayo 2015]

10 Relaves en pasta
(Paste tailings)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Disminuir el contenido en agua en los relaves, para prevenir la generación de drenaje minero y obtener mejoras en el proceso	Depósitos de relaves	Convencional

OBJETIVOS

Al igual que el resto de relaves deshidratados (relaves espesados y relaves filtrados), los objetivos de los *relaves en pasta* son prevenir la formación de drenaje minero, y mejorar las condiciones de gestión del depósito de este tipo de residuos.

De manera específica, se busca generar una mezcla con tales propiedades que no se segregue ni durante su transporte ni una vez depositada en el relave estrictamente hablando.

DESCRIPCIÓN

Este tipo de depósitos se consideran como una situación intermedia entre los relaves espesados y los relaves filtrados.

Se genera una pasta de sólidos (relaves) y agua, muy similar a la pulpa de alta densidad , difícilmente segregable con un contenido de agua entre un 10 y un 25%, y una concentración en peso de partículas finas (<20 µm) mayor al 15%.

ASPECTOS CRÍTICOS

Las propias características de la pasta, en relación al contenido en agua y concentración de partículas finas, son aspectos críticos en este tipo de relaves. Pero también se deben considerar los parámetros reológicos, como el límite elástico que alcanza la mezcla.

Por último, tanto el bombeo como el transporte pueden ser problemáticos.

Decreto Supremo N° 248. Artículo 6º, letra k.

Relaves en pasta: depósito de relaves que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado, corresponde a una mezcla de relaves sólidos y agua, entre un 10 y 25% de agua, que contiene partículas finas menores a 20 µm, en una concentración en peso superior al 15%, muy similar a una pulpa de alta densidad. Su depositación se efectúa de forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación, poseyendo consistencia coloidal.

Relave en pasta.
Fuente. Putzmeister.

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Permite recuperar agua y reactantes del proceso. • Se minimiza la huella del depósito. • Sus características hacen que sean aptos para el relleno de minas, o la co-disposición con el material estéril de los botaderos. Sin embargo, esto está condicionado por la normativa chilena actual que no permite disponer ningún tipo de material en un botadero (DS 132). **Desventajas** • Se requiere la gestión de agua de lluvia. • Se requiere maquinaria específica.	Al igual que los relaves espesados, en los *relaves en pasta*, los componentes para la preparación y el transporte deben ser integrados junto a los de disposición.	La eficiencia depende del sistema de bombeo. Puede existir una compensación en el proceso, entre la energía necesaria y la recuperación de agua (compensaciones/soluciones intermedias de agua y energía).

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
En la Mina de Oro Bulyanhulu en Tanzania, se implementó un sistema de *relaves en pasta*. De los relaves, un 25% se usa para rellenar la mina subterránea, y un 75% se deposita en la superficie. El objetivo más importante en este caso fue la recuperación del agua, ya que la faena minera está ubicada en una zona árida (Theriault *et al.*, 2003).	Los *relaves en pasta* juegan un doble papel en la prevención y control de la generación de drenaje minero, ya que no sólo contribuye a tal hecho por sí misma sino que participa en otra medidas como en la co-disposición de botaderos y relaves, reduciendo de este modo los impactos ambientales. Sin embargo, esto está condicionado por la normativa chilena actual que no permite disponer ningún tipo de material en un botadero (DS 132).

MÁS INFORMACIÓN

• Driussi, C., and Jansz, J., 2006. Technological options for waste minimization in the mining industry. J. Clean. Prod. 14, 682-688.
• Fourie, A.B., 2009. Preventing catastrophic failures and mitigating environmental impacts of tailings storage facilities. Proced.Earth.Planet. Sci. 1, 1067-1071.
• Mudd, G., and Boger, D.V., April 2013. The ever growing case for paste and thickened tailings - Towards more sustainable mine waste management. Aust. Inst. Min. Metall. Bull. 2, 56-59.
• Rashidinejad, F., and Naraghi, S., 2011. Tailings disposal options study for Sangan Iron Mine Project - Iran. In Proceedings of the fifteenth International Conference on Tailings and Mine Waste, held in Vancouver, BC. November 6-9, pp 757-770.
• Verburg, B.M., 2001. Use of paste technology for tailings disposal: potential environmental benefits and requirements for geochemical characterization. In: Proceedings of the International Mine Water Association Symposium, 2001.
• Theriault, J.A., Frostiak, J., and Welch, D., 2003. Surface disposal of past tailings at the Bulyanhulu Gold Mine, Tanzania.

11 Desulfuración
(Desulfurization)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Minimizar el contenido total de material sulfuroso (pirita) de los relaves	Depósitos de relaves	No Convencional

OBJETIVOS

El objetivo de la *desulfuración* o despiritización es reducir el volumen de material con capacidad de producir drenaje minero, en un depósito de relaves. Se clasifica como una medida de prevención en sentido estricto.

DESCRIPCIÓN

Esta medida consiste en la separación selectiva, mediante flotación, de los sulfuros del relave, generando como resultado una pulpa rica en sulfuros que puede ser usada en otra industrias, como por ejemplo, para la producción de ácido sulfúrico. Y por otro lado, la fracción que queda del relave con una baja concentración de sulfuros, y que sea probado como no generador de drenaje minero, puede ser usado para el relleno de la mina o para la rehabilitación de la faena.

Este proceso es una alternativa para aquellas operaciones que puedan incorporar un sistema de flotación al final de su proceso, previo al depósito final del relave.

ASPECTOS CRÍTICOS

El contenido de sulfuros es un aspecto crítico para el operador minero.

Los costos están directamente relacionados con el grado o la proporción de recuperación de sulfuros.

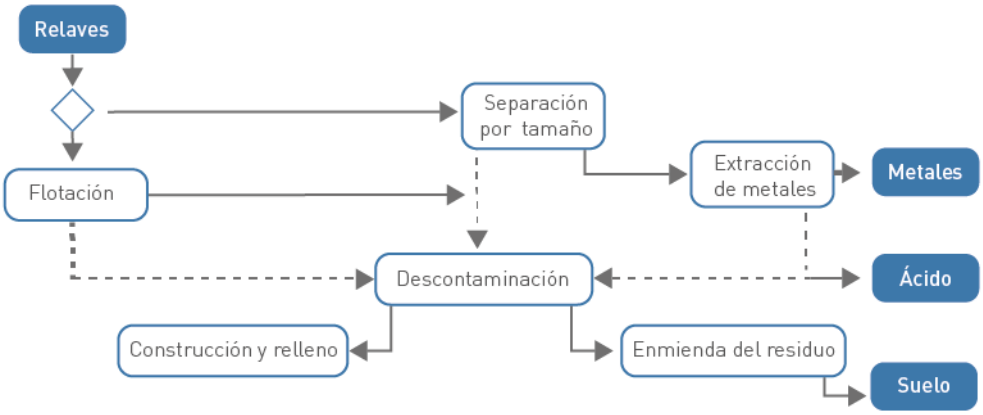


Diagrama de flujo de la *desulfuración* de un depósito de relaves, con separación de metales, ácido y residuo.
Fuente. Modificado de Struthers *et al.*, 1997.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- La pulpa rica en sulfuro se deposita en lugares localizados que permite su control y monitoreo.
- El relave con bajo contenido en sulfuros puede ser utilizado como cubierta para otras instalaciones o puede co-disponerse junto a botaderos. Sin embargo, esto está condicionado por la normativa chilena actual que no permite disponer ningún tipo de material en un botadero (DS 132).

Desventajas
- Al ser una pulpa ya tratada, puede haber problemas en la flotación selectiva.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

El desafío del desarrollo de esta tecnología implica resolver y controlar las interferencias que pueden surgir durante el proceso de flotación, cuyo rendimiento puede verse afectado por las sustancias químicas e iones provenientes de la planta de tratamiento del mineral.

EFICIENCIA

Su eficiencia ha sido demostrada en pocas publicaciones, pero es una de las propuestas más prometedoras en los últimos años para limitar la producción de drenaje minero en los depósitos de relaves.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Existen muy pocos ejemplos de esta medida de prevención. Hesketh *et al.* (2010) mostraron la factibilidad técnica de la eliminación de pirita usando circuitos de flotación de cobre estándares, por lo cual los relaves de un pórfido de cobre fueron desulfurados a través de la manipulación de la dosis del colector para reducir la fracción generadora de ácido a un 9% de los relaves totales, y el contenido de azufre de los relaves neutros a 0,2%.

COMENTARIOS

Es interesante su uso como cubiertas, ya que el bajo contenido en sulfuros del relave, ejerce un control sobre el flujo de oxígeno hacia el interior de la instalación.

Es común referirse a esta medida como "despiritización".

MÁS INFORMACIÓN

- Hesketh, A.H., Broadhurst, J.L., and Harrison, S.T.L., 2010. Mitigating generation of acid mine drainage from copper sulphide tailings impoundments in perpetuity: a case study for an integrated management strategy. Miner. Eng. 23, 225-229.
- OK Tedi Mining, 2009. Annual Environmental Report. Available online.
- Struthers, S., Brumle, J., and Taylor, G., 1997. An Integrated System for Recycling Base Metal Tailings. Paper presented at the 1997 Annual Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation Austin, Texas, May 11-16, pp. 579-592.

12 Disposición submarina
(Submarine disposal)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Prevenir la oxidación de los sulfuros mediante la disposición en ambientes submarinos con condiciones reductoras	Depósitos de relaves	No Convencional

OBJETIVOS

El objetivo de la *disposición submarina* es prevenir la oxidación de los sulfuros de los relaves, mediante su disposición en ambientes submarinos profundos, con condiciones reductoras. En consecuencia, se previene la generación de drenaje minero.

DESCRIPCIÓN

Los relaves son transportados en tubos para su disposición en cañones o ambientes submarinos profundos. Las condiciones reductoras en este tipo de ambiente previenen la oxidación de sulfuros, sin embargo, también puede existir una liberación de elementos asociados a óxidos e hidróxidos y liberación de metales pesados.

Actualmente, se discute sobre la reactividad de sulfuros en ambientes submarinos anóxicos y la potencial liberación de elementos tóxicos desde relaves no sulfúricos.

ASPECTOS CRÍTICOS

Se debe tener condiciones reductoras estables, sin la existencia de zonas de surgencia u otras corrientes que puedan re-movilizar los relaves.
Estos últimos deben contener sólo minerales sulfurados y minerales silicatados insolubles, y no presentar elementos traza potencialmente contaminantes.

Disposición submarina de relaves en Misina Mine, Islas Filipinas.
Fuente. S.Jones (Natural Resources Services PTY LTD)

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Se minimiza la superficie de suelo usada para el depósito de relaves. • Se considera geotécnicamente estable en comparación con los depósitos convencionales. **Desventajas** • Efectos sobre la biodiversidad (asfixia de organismos bentónicos, destrucción de hábitat). • Posible liberación y dispersión de elementos tóxicos, reactivos de flotación o metales pesados. • No existe opción de recuperar el material, ni el agua de los relaves.	Se requiere una caracterización mineralógica y geoquímica detallada de los relaves, seguida por una caracterización oceanográfica y ambiental del sitio de disposición. La *disposición submarina* requiere de un mantenimiento continuo para evitar fallas del sistema de tubos que depositan el relave en el mar (problemas técnicos, afecciones por mareas, terremotos, tsunamis o tormentas).	La eficiencia de las operaciones actuales no se encuentra bien documentada. En base a los datos publicados, se conoce que se liberan y dispersan contaminantes, por procesos físicos o químicos, en casi todos los casos de aplicación.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
• Entre 1973 y 1990, la Mina Black Angel (Pb, Zn), Groenlandia, usó agua de mar en el proceso y, además depositó relaves de manera submarina. Después de un año de operación, se detectaron altas concentraciones de Pb y Zn en un fiordo cercano. Esta contaminación sigue presente y tiene efectos sobre la macro fauna bentónica en el largo plazo (Dold, 2014). • En Sydvarangar, Noruega, actualmente se depositan relaves de óxidos de hierro en el mar desde un punto de disposición a una profundidad de 28 m. No existen estudios científicos disponibles sobre los impactos ambientales y la información sobre este ejemplo es muy limitada (Dold, 2014).	Actualmente, la estabilidad química de este tipo de depósitos no se conoce bien. Además, de las recomendaciones indicadas anteriormente, como estudios mineralógicos, geoquímicos y oceanográficos, se recomienda hacer una estimación de la evolución en el largo plazo de este tipo de depósitos, que se complemente con un monitoreo constante del mismo.

MÁS INFORMACIÓN

• Dold, B., 2014. Submarine Tailings Disposal (STD)—A Review, Minerals 4, 642-666.

13 Drenaje de relaves
(Drained tailings)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Reducir el contenido total de agua en depósitos de relaves, limitando la generación de drenaje minero	Depósitos de relaves	No Convencional

OBJETIVOS

El objetivo del *drenaje de relaves* es la reducción del contenido total de agua en la masa de un depósito de relaves, a través del drenaje del agua contenida en los poros, previniendo la formación de drenaje minero o controlando el drenaje una vez generado.

DESCRIPCIÓN

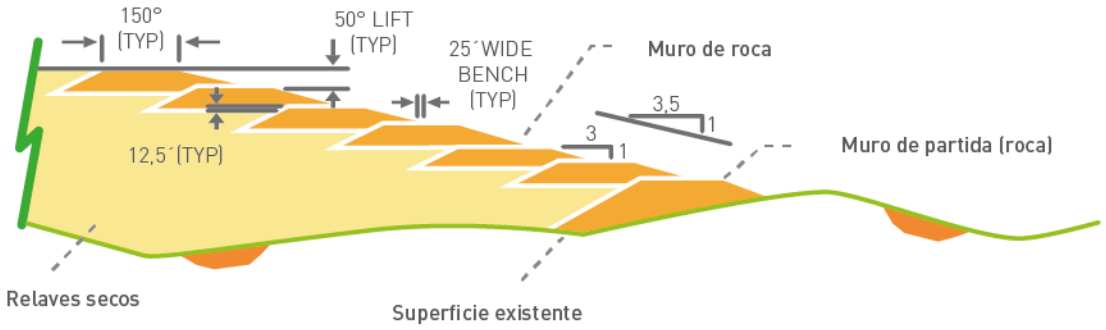
Este método incluye un muro poroso como muro de partida, y un sistema de drenes basales conectados a dicho muro. Este sistema transfiere el agua contenida en los poros del relave.

En consecuencia, al drenar el agua no existe una laguna de aguas claras en la superficie de este tipo de depósitos.

ASPECTOS CRÍTICOS

Tanto las características granulométricas del material como la permeabilidad del depósito, junto con un buen sistema de drenaje son esenciales para su éxito.

Este método se puede aplicar en relaves granulares de alta permeabilidad, y permite la acumulación del material en pilas de alturas significativas (hasta 195 m en un proyecto desarrollado en Brasil (Pimenta de Ávila, 2011).



Sistema de *drenaje del relave* en el sur de Tucson, Arizona (Rosemont Copper Filter-Press Dry-Stack).
Fuente. Modificado de http://technology.infomine.com/reviews/FilterPressedTailings/welcome.asp?view=full (En línea) [Consulta: julio 2015]

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • El muro no saturado presenta una mejor estabilidad, y en un mismo volumen se almacena mayor cantidad de relave en comparación con los depósitos convencionales. • Se considera que el potencial de peligro, en caso de una falla en el muro o licuefacción de la instalación, es menor. • Se considera que tanto las condiciones como los costos asociados a su rehabilitación o cierre, son menores. **Desventajas** • No se recomienda su aplicación en relaves de granulometría fina. • Requiere gestión de las infiltraciones.	Es preciso realizar una caracterización geotécnica detallada previa a su aplicación, tanto a nivel de laboratorio como en pruebas piloto en terreno. Durante todo el proceso, se deben monitorear las condiciones de drenaje, por ejemplo, a través del control de la presión de poro, ensayos de compactación o evaluación de la susceptibilidad de licuefacción.	Este método es eficiente siempre que el sistema de drenaje sea el adecuado, aún así su eficiencia se ve condicionada por las infiltraciones de agua en la superficie de la instalación, que puede oxidar los sulfuros y, como consecuencia, generar drenaje minero. Este hecho se acentúa especialmente en climas estacionales, con períodos secos de larga duración seguidos de eventos lluviosos.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
En Mina Germano, Brasil se utiliza esta medida, con un muro de partida poroso y un sistema de drenes basales conectados al muro. Los relaves presentan una granulometría de limo y arena fina y la altura del depósito alcanza los 195 m (Pimenta de Ávila, 2011).	Este método es interesante ya que reduce los riesgos asociados a las fallas en los muros de los relaves convencionales, además de contribuir a la recuperación de agua. En este método se puede llevar en paralelo una rehabilitación progresiva de la instalación (Pimenta de Ávila, 2011).

MÁS INFORMACIÓN

• Pimenta de Ávila, 2011. The Drained Stacking of Granular Tailings: A Disposal Method for a Low Degree of Saturation of the Tailings Mass. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011 Vancouver, BC, November 6 to 9, 2011.
• http://technology.infomine.com/reviews/FilterPressedTailings/welcome.asp?view=full (En línea) [Consulta: julio 2015].

14 Control del nivel de agua
(Dewatering)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Disminuir el nivel de agua de manera de limitar el contacto entre el agua y los materiales con potencial de generación de acidez	Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Convencional

OBJETIVOS

Si bien el principal objetivo es el acceso seguro y económico al recurso minero, mediante el *control del nivel de agua subterránea* de un sitio en construcción, cajón hidráulico o túnel (a través del bombeo), es posible considerar esta técnica para limitar el contacto directo entre el agua y los materiales con capacidad de generación de drenaje minero, bombeando el agua antes de que entre en contacto con la potencial fuente generadora, como medida de prevención.

DESCRIPCIÓN

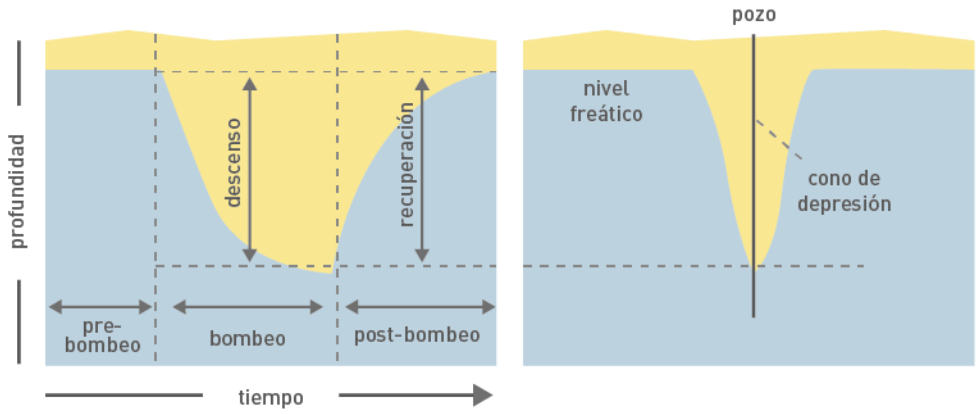
Se logra la disminución del nivel de agua subterránea mediante el bombeo continuo, generándose como consecuencia un cono de depresión en el sistema.

Sin embargo, esta medida también puede contribuir a la generación de drenaje minero ya que, como consecuencia de la disminución del nivel de agua, el material con capacidad de reacción queda expuesto a la atmósfera, pudiendo entrar en contacto con agua de lluvia, infiltraciones o flujos locales de agua, además de con el agua del sistema una vez que ésta recupere su nivel.

ASPECTOS CRÍTICOS

La disminución del nivel de agua sólo se puede mantener si el bombeo es continuo, dado que en los acuíferos bombeados, el cono de depresión funciona como descarga regional permanente de flujo de agua.

En la zona no saturada, durante la disminución del nivel de agua, pueden ocurrir procesos de oxidación. De igual modo que se puede producir en la zona capilar, una vez que el nivel de agua aumenta lentamente recuperando su nivel (en el cierre).



La Figura muestra la disminución del nivel de agua, recuperación y cono de depresión.
Fuente. Modificado de www.gg.uwyo.edu
(En línea) [Consulta: mayo 2015]

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • El agua extraída puede ser usada en el proceso minero. **Desventajas** • Puede afectar a sistemas de agua superficiales, pudiendo repercutir sobre ecosistemas cercanos. • Posible impacto de los acuíferos en el largo plazo, por la disminución de presión de agua de poro. • Al aumentar el nivel de agua y entrar en contacto con aquellos materiales con capacidad de reacción, que quedaron expuestos tras la disminución del nivel de agua, se puede generar drenaje minero en el largo plazo.	Control del nivel de agua en operación y de la calidad del material que queda expuesto en el proceso. Al momento de cierre, una vez que el bombeo ha cesado, monitoreo continuo de las características hidroquímicas del agua.	Si el control es constante, esta medida se puede considerar eficiente durante la operación.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
Esta medida es usada comúnmente en minas a rajo abierto y subterráneas en regiones con niveles freáticos del agua subterránea pocos profundas, por lo que existen muchos ejemplos a nivel mundial.	Se requiere un buen entendimiento de la hidrogeología y la geología presentes para minimizar los efectos negativos de la *disminución del nivel de agua*. Eso permite una evaluación más estratégica de las consecuencias producto de la inundación, como consecuencia de la reconstrucción del nivel freático a las condiciones previas al comienzo de la actividad minera.

MÁS INFORMACIÓN

• INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide). http://www.gardguide.com/

• Acid Drainage Technology Initiative (ADTI), 1998. Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage. J. Skousen, A. Rose, G., Geidel, J., Foreman, R., Evans, W. Hellier, and members of the Avoidance and Remediation Working Group, National Land Reclamation Centre, West Virginia University, Morgantown, WV.

• http://www.gg.uwyo.edu/content/laboratory/groundwater/depression/drawdown.asp?callNumber=34981&SubCallNumber=0&color=6692CC&unit=copper (En línea) [Consulta: mayo 2015].

15 Desvío cursos de agua
(Diversion/Streamflow regulation)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Prevención de la generación de drenaje minero en instalaciones mineras, mediante la desviación de los cursos de agua	Botaderos Depósitos de relaves Depósitos de lixiviación Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Convencional

OBJETIVOS

La *desviación de los cursos de agua* tiene el objetivo de gestionar el agua superficial, limitando su contacto con el material con capacidad de reacción de las instalaciones mineras (residuos mineros masivos, rajo abierto y mina subterránea), y por tanto previniendo la generación de drenaje minero.

DESCRIPCIÓN

En el diseño de la *desviación de cursos de agua*, no sólo se deben considerar los componentes ingenieriles e hidráulicos propios de la infraestructura u obra destinada para tal fin, sino que también se deben estudiar y evaluar los componentes geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos del recurso hídrico. Así, los recursos hídricos son un componente clave desde un punto de vista ambiental y social, con un rol importante para el sistema de drenaje de una cuenca y su biodiversidad, pero también como componente cultural y recreacional para la comunidad.

En el diseño se debe diferenciar entre una desviación permanente y una temporal.

ASPECTOS CRÍTICOS

Los aspectos críticos en este tipo de medida son muy diversos, van desde la integración en el paisaje, hasta el mantenimiento de la medida en el largo plazo, pasando por la preservación de las características hidrológicas y ecológicas de los cursos desviados.

Es importante que las características sean comparables a otros cursos de agua locales, manteniendo la calidad del agua, así como su función de transporte de sedimento y estabilidad de la erosión, entre otros.

Desviación del río McArthur próximo a una mina de Xstrata en Northern Territory (Australia) en 2011.
Fuente. ABC Australian News.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Opción eficiente en la prevención de la contaminación de recursos hídricos.
- Asegura el mantenimiento de la calidad y cantidad de cursos de agua necesarios para comunidades aguas abajo de una faena minera.

Desventajas
- El número de componentes críticos es elevado, pudiendo ser muy complejos.
- Necesidad de desarrollar estrategias en el largo plazo para confirmar un resultado sustentable.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

Es importante el monitoreo constante tanto del estado de la infraestructura como de todas las condiciones ecológicas, así como la validación de la idoneidad de la medida y su ubicación.

EFICIENCIA

La eficiencia de la medida se puede evaluar en función de los impactos generados por la faena, y sobre todo en la preservación de los aspectos ambientales en comparación con la línea de base del entorno.

La eficiencia de una faena desde un punto de vista económico se puede ver afectada por la existencia de cursos de agua que atraviesen sus instalaciones. De tal modo que en la planificación de la ubicación de las instalaciones se debe contemplar este aspecto.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Como se ve en la fotografía de la ficha, el estero Back Creek en Queensland (Australia) ha sido desviado, ya que fluye a través de las reservas de carbón Commodore. Se construyó un canal de desviación con un aliviadero para los eventos intensos de lluvia, y se imitaron las propiedades naturales del estero, valorando tantos aspectos ecológicos (velocidad de flujo, transporte de sedimento y conexiones hidráulicas con el agua subterránea, entre otros), así como la estabilidad geotécnica de la desviación propuesta (Grady and Bethune, 2003).

COMENTARIOS

Debido a la gran cantidad de aspectos que se deben considerar, el desarrollo de esta medida debe ser tomada con cautela, por lo que es importante incluir a profesionales de diferentes especialidades para asegurar su correcta implementación y gestión.

MÁS INFORMACIÓN

- Grady, J., and Bethune, P., 2003. Permanent creek diversion through spoil - Back Creek, Queensland. AUSIMM Water in Mining Conference Proceedings 2003, 14-16 + 18-24.

16 Sellos *(Seals)*

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Aislar el material con potencialidad para generar drenaje minero y minimizar la infiltración de agua y gases	Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Convencional

OBJETIVOS

El objetivo de los *sellos* es separar el material de rajos y minas subterráneas, de los factores ambientales que participan en el proceso generador de drenaje minero, especialmente limitando el intercambio de agua y gases, de manera que se previene la reacción del material y la formación del efluente.

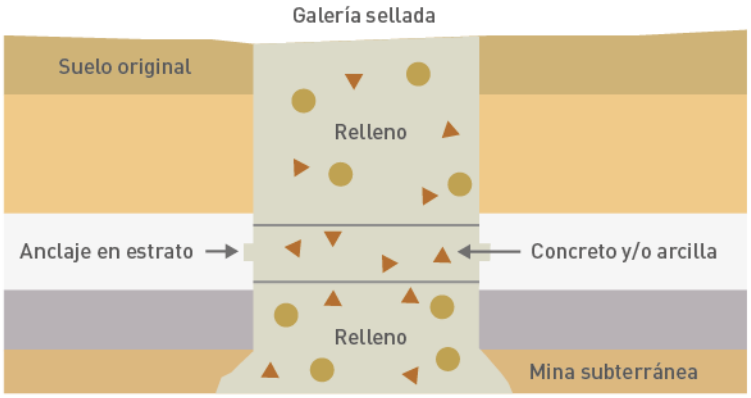
DESCRIPCIÓN

Los *sellos* se construyen usando geotextiles, materiales de relleno, como el cemento, o materiales naturales, como por ejemplo los sustratos con abundantes arcillas o sustratos enriquecidos que pueden formar un *sello* mecánicamente flexible e hidrológicamente funcional.

ASPECTOS CRÍTICOS

El uso de materiales naturales tiene el riesgo de alteración de sus propiedades con el paso del tiempo debido a procesos de intercambio iónico o envejecimiento. Por ejemplo, los *sellos* enriquecidos con bentonita, cuyo catión mayor es el sodio, pueden sufrir intercambio iónico con el agua de lluvia enriquecida en calcio, reduciendo el potencial de expansión de la bentonita en el tiempo, e incrementando la posibilidad de formación de caminos preferenciales de flujo.

En general, los valores de permisividad de gases o agua pueden aumentar en el tiempo significativamente.



Corte transversal de un *sello* típico.
Fuente. Modificado de U. S. EPA, 1975.

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Es un sistema muy eficiente para aislar el material con capacidad de reacción. **Desventajas** • Pueden sufrir envejecimiento y deterioro en el tiempo y requerir un mantenimiento o incluso su reemplazo, pudiendo significar un problema, sobretodo en minas cerradas o en situaciones geológicas donde existe una pérdida de estabilidad o movimientos por falta de consolidación.	Los *sellos* necesitan ser monitoreados regularmente. Si bien pueden ser muy eficientes, no se puede garantizar la integridad y, por tanto, el cumplimiento de los objetivos deseados en el tiempo.	Se consideran como una medida de prevención muy eficiente, especialmente en túneles subterráneos.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
En West Virginia, EE.UU., se usó un sello de cemento para asegurar un túnel en una mina de carbón abandonada. Después de la instalación del cemento, se aplicó un sellante resistente al agua para proteger el cemento del deterioro por la acción de las precipitaciones.	Los *sellos* se usan comúnmente en minas subterráneas abandonadas para asegurar geotécnicamente sus instalaciones. Si el acceso al área de instalación no es seguro, se pueden colocar de manera remota.

MÁS INFORMACIÓN

• Koski, J.A., 2004. Sealing abandoned mine shafts with concrete. PUBLICATION #J941015, Copyright © 1994, The Aberdeen Group.

• U. S. EPA, 1975. Inactive and Abandoned Underground Mines. Water Pollution Prevention and Control. Prepared for Office of Water and Hazardous Materials. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C. 20460. June 1975.

17 Liners
(Liners)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Aislar el material con potencialidad para generar drenaje minero y minimizar la infiltración de agua y gases	Botaderos Depósitos de relaves Depósitos de lixiviación	Convencional

OBJETIVOS

El objetivo general de un *liner* es la separación física (y química) del material potencialmente generador de drenaje minero con el medio, de tal manera que se previene la generación de efluentes que pueden suponer un impacto para el medioambiente y/o las personas.

DESCRIPCIÓN

El propósito de un *liner* es separar los materiales, de manera permanente, de todos los tipos de flujos, es decir, flujo de masa de gases y agua, pero también flujos difusivos.

Los *liners* pueden estar hechos de varios tipos de materiales. Comúnmente, son materiales sintéticos como HDPE (High Density Polyethylene) o LDPE (Low Density Polyethylene), que pueden ser de distintos espesores. A veces, se integran sustratos naturales para mejorar sus capacidades.

ASPECTOS CRÍTICOS

Durante su uso, la integridad del *liner* debe ser garantizada por el fabricante.

Las uniones entre diferentes geotextiles, normalmente es mediante soldadura, lo que significa un riesgo relativamente alto de ocurrencia de fallas puntuales. Cuando se usan geotextiles para cubrir materiales que aún se encuentran en el proceso de compactación, o cuando se instalan en pendientes, se pueden acumular estreses por tensiones, que pueden llegar a romper el *liner*.

Liners (geotextil) en un depósito de relaves.
Fuente. Jon Engels – www.tailings.info

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Se consideran como un sistema muy eficiente para separar los materiales. • Aunque se considera como una medida de prevención de generación de drenaje minero, los *liners* también contribuyen al control de la migración del mismo. **Desventajas** • Debido a que sus costos de implementación son elevados no siempre se consideran como una primera opción, especialmente donde es necesario separar áreas grandes.	Su durabilidad, y por tanto su funcionalidad garantizada puede disminuir o puede verse afectada con el paso del tiempo. Se hace necesario un monitoreo periódico de su estado, para su mantenimiento y control de su eficacia.	Se consideran una medida altamente eficaz para prevenir la generación de drenaje minero. Los factores externos, la consolidación del material, las fuerzas de tensión o la propia química del efluente pueden alterar el liner, y por tanto su eficacia.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
El tranque de relaves de la Boddington Mine, en Australia occidental, cuenta con un *liner* de HDPE, con una superficie de 750.000 m^2. La construcción empezó en octubre 2006, y se terminó en junio 2007, e incluyó la extracción de roca, y la remodelación del paisaje previa a la instalación del *liner*. (http://www.abc.net.au/news/2014-10-07/gold-mine-tailings-dam/5794040)	Se recomienda realizar un análisis costo-eficiencia-beneficio entre las diferentes opciones de *liners*, considerando las características sitio-específicas de las instalación donde se van a colocar. Dependiendo de cada tipo de depósito se debe realizar el estudio respectivo para poder aplicar esta medida, además de considerar los requisitos incluidos en el DS N°248.

MÁS INFORMACIÓN

• Acid Drainage Technology Initiative (ADTI), 1998. Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage. J. Skousen, A. Rose, G., Geidel, J., Foreman, R., Evans, W. Hellier, and members of the Avoidance and Remediation Working Group, National Land Reclamation Centre, West Virginia University, Morgantown, WV.
• MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2004. Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings. MEND report 2.21.4, volume 1.Natural Resources Canada, pp 86.
• Gonzales, C., Baumgartl, T., Edraki, M., and Soliman, A., 2014. Mine Wastes as Cover Materials in a Water-shedding Soil Cover in North-west Queensland. In:. Life-of-Mine 2014 Conference, Brisbane, QLD, 16-18 July 2014, pp. 261–270.

18 Cubierta de evaporación/evapotranspiración
(Evaporation/evapotranspiration cover)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Minimizar, evitar o derivar el flujo de agua/oxígeno mediante cubiertas de material natural	Botaderos Depósitos de relaves Depósitos de lixiviación	Convencional

OBJETIVOS

Los objetivos generales de las *cubiertas* ingenieriles son controlar el flujo de agua, minimizando o evitando su infiltración y, limitando la difusión de oxígeno al material con potencial de generación de drenaje minero, ambos factores responsables de la oxidación de minerales sulfurados.

Las *cubiertas* también pueden constituir un medio para el crecimiento de vegetación y servir como componente funcional en el desarrollo de accidentes geográficos y funciones ecosistémicas.

DESCRIPCIÓN

Las *cubiertas de evaporación*, también conocidas como "store and release cover", almacenan el agua de precipitación en una capa horizontal de material estéril, sin capacidad de generación de drenaje minero, sobre los botaderos, relaves o pilas.

La humedad del suelo en la *cubierta* se reduce por evaporación, previniendo el drenaje profundo del agua a materiales potencialmente generadores de drenaje minero. Asimismo, la vegetación puede contribuir a la pérdida de agua de la cubierta por evapotranspiración.

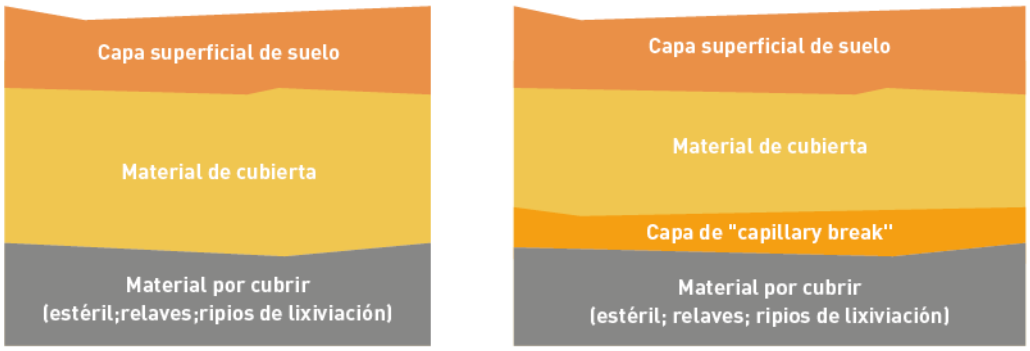
Las *cubiertas de evaporación* más costo-eficientes suelen ser aquéllas que se construyen con sustratos locales.

ASPECTOS CRÍTICOS

La capacidad de almacenamiento de agua de una *cubierta de evaporación* depende de las características texturales del material usado en la construcción.

Mientras más gruesa es la granulometría, más baja será la capacidad de almacenamiento de agua.

Si la capacidad de almacenamiento de agua se sobrepasa, como consecuencia de lluvias intensas, o si se crean flujos preferenciales, se puede producir un drenaje profundo. Se requiere un análisis climático crítico y detallado para evaluar estadísticamente la probabilidad de grandes cantidades o altas intensidades de lluvias, para calcular el riesgo de falla.



Esquema de diferentes diseños de *cubiertas de evaporación*.
Fuente. Elaboración Propia.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Las *cubiertas de evaporación* pueden ser soluciones costo-eficientes, al ser construidas con material local.

Desventajas
- Su desempeño depende en gran parte de la disponibilidad de sustratos adecuados.
- Las propiedades hidráulicas de una cubierta pueden cambiar en el tiempo por procesos de meteorización y formación de suelos que generan caminos preferenciales de flujo.
- La vegetación puede crear poros continuos.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

El diseño de la *cubierta* debe estar adaptado a las condiciones climáticas locales (precipitación, capacidad de evaporación, etc.).

EFICIENCIA

La *cubierta de evaporación* es un tipo de cubierta altamente eficiente. Una vez construida, los costos de mantenimiento pueden ser bajos. Cuando se integra en el diseño del paisaje, puede ser un componente importante en la gestión hídrica y en la estabilización del accidente geográfico.

La *cubierta de evaporación* es principalmente aplicable a ambientes áridos y semiáridos con una distribución de precipitación anual relativamente uniforme.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

En la mina Kidston (oro) en Australia Occidental, dos pilotos de *cubierta de evaporación* fueron desarrollados. Durante tres años de monitoreo, se demostró la aplicabilidad de este tipo de cubiertas para el sitio donde la evaporación potencial excede la precipitación anual promedio. Durante el monitoreo no se detectó humedad en los lisímetros instalados para medir la infiltración de agua a los residuos mineros debajo de la cubierta (MEND, 2004).

COMENTARIOS

Antes de la construcción de *cubiertas de evaporación*, es altamente recomendable usar pruebas piloto para evaluar el diseño óptimo durante un periodo de monitoreo del balance de agua.

El diseño de los pilotos puede estar basado en una modelación hidrológica, usando información clave del clima y de las propiedades del material.

MÁS INFORMACIÓN

- MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2004. Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings. MEND report 2.21.4, volume 1.Natural Resources Canada, pp 86.
- MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2007. Macro-scale cover design and performance monitoring manual. MEND report 2.21.5. Natural Resources Canada, pp 108.

19 Cubiertas repelentes de agua
(Water shedding cover)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Minimizar, evitar o derivar el flujo de agua/oxígeno mediante cubiertas de material natural	Botaderos Depósitos de relaves Depósitos de lixiviación	Convencional

OBJETIVOS

Los objetivos generales de las *cubiertas* son controlar el flujo de agua, minimizando o evitando su infiltración y, limitando la difusión de oxígeno al material con potencial de generación de drenaje minero, ambos factores responsables de la oxidación de minerales sulfurados.

Las *cubiertas* también pueden constituir un medio para el crecimiento de vegetación y servir como componente funcional en el desarrollo de accidentes geográficos y funciones ecosistémicas.

DESCRIPCIÓN

Los ambientes con condiciones climáticas caracterizados por grandes cantidades de precipitación y/o altas frecuencias de eventos de lluvias estacionales requieren de una barrera repelente adicional para prevenir un drenaje profundo de agua.

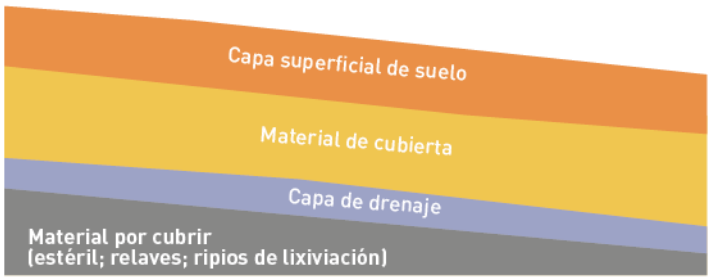
Bajo estas condiciones, una *cubierta* horizontal, resultaría en un drenaje profundo en el tiempo, por lo que en este caso se debe diseñar una *cubierta repelente de agua*, que mediante una barrera hidráulica repelente de sustratos abundantes en arcilla u otros materiales de textura fina, ralentiza el flujo del agua. Asimismo, el diseño de este tipo de cubiertas incluye cierta pendiente o inclinación, para favorecer el drenaje lateral y recuperar el agua, de manera de poder eliminar el exceso en un tiempo corto después de un evento de lluvia.

ASPECTOS CRÍTICOS

Para la construcción de la barrera hidráulica repelente y de la cubierta en general, se debe asegurar la disponibilidad de materiales.

Por otro lado, la expansión y contracción (eventos de secado y mojado) pueden derivar en la formación de fracturas o canales preferenciales de flujo, y finalmente la falla de la *cubierta*. Este aspecto se debe considerar en la modelación hidrológica del diseño de la *cubierta*.

En el caso que se requiera de una capa de drenaje por encima de la barrera hidráulica, debe haber disponibilidad de material de grano grueso, que incluso puede ser producto del proceso minero.



Esquema del diseño de una *cubierta repelente de agua*.
Fuente. Elaboración Propia.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Reducen el tiempo de residencia del agua en el sistema, minimizando el riesgo de infiltración profunda del agua.
- Puede ser un componente importante en la gestión hídrica y en la estabilización del accidente geográfico.

Desventajas
- En comparación con las cubiertas de evaporación son soluciones consideradas menos costo-eficientes, que requieren de una planificación avanzada y de la disponibilidad de materiales adecuados en el momento de la construcción.
- Estas *cubiertas* deben ser construidas en pendientes o cierta inclinación.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

La barrera hidráulica repelente de agua en el diseño de este tipo de *cubierta* puede ser superficial o subsuperficial. En este último caso, será necesaria una capa de drenaje para desviar el exceso de agua en profundidad.

Se debe establecer un período de monitoreo.

EFICIENCIA

Se consideran como un tipo de *cubierta* altamente eficiente, cuyos costos de mantenimiento debieran ser bajos, una vez construida.

El desempeño de estas *cubiertas* puede verse afectado por la formación de fracturas debido a procesos de expansión y contracción del material.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Las *cubiertas repelentes de agua* son aplicables en muchas regiones de Chile y condiciones climáticas diferentes.

- Gonzales *et al.* (2014b) investigaron la aplicabilidad en el uso de roca estéril y relaves como materiales para una *cubierta* de este tipo en Queensland, Australia. Los resultados de ensayos de laboratorio y mediciones *in situ* indicaron que la roca estéril se saturó durante eventos de precipitación. Sin embargo, usar los relaves como barrera hidráulica aumentó el drenaje lateral, previniendo la ocurrencia de un drenaje profundo.

COMENTARIOS

Antes de la construcción de una *cubierta repelente de agua*, es altamente recomendable usar pruebas piloto para evaluar un diseño óptimo, basado en la modelación hidrológica que incluya información clave del clima y balance de agua, así como de las propiedades del material.

MÁS INFORMACIÓN

- MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2004. Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings. MEND report 2.21.4, volume 1.Natural Resources Canada, pp 86.
- Gonzales, C., Baumgartl, T., Edraki, M., and Soliman, A., 2014. Mine Wastes as Cover Materials in a Water-shedding Soil Cover in North-west Queensland. In:. Life-of-Mine 2014 Conference, Brisbane, QLD, 16-18 July 2014, pp. 261–270.
- Gonzales, C., Baumgartl, T., Scheuermann, A. and Soliman, A., 2014b. Soil moisture profile of a water-shedding cover design in central Queensland. Chapter 189 in : Unsaturated Soils: Research and Applications N . Khalili , A . R . Russell , and A . Khoshghalb (Eds): 1403-1408.

20 Cubiertas de agua
(Water covers)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Minimizar, evitar o derivar el flujo de agua/oxígeno mediante cubiertas de agua	Depósitos de relaves Minas a rajo abierto	No convencional

OBJETIVOS

Los objetivos generales de las *cubiertas* son controlar el flujo de agua, minimizando o evitando su infiltración y, limitando la difusión de oxígeno al material con potencial de generación de drenaje minero, ambos factores responsables de la oxidación de minerales sulfurados.

Con el uso de las *cubiertas de agua*, es posible prevenir la ocurrencia de reacciones químicas productoras de drenaje minero.

DESCRIPCIÓN

El propósito de las *cubiertas de agua* es sumergir los materiales estériles que, en caso contrario, reaccionarían químicamente cuando se encuentran en contacto con la atmósfera/oxígeno, pudiendo desencadenar el proceso de generación de drenaje minero.

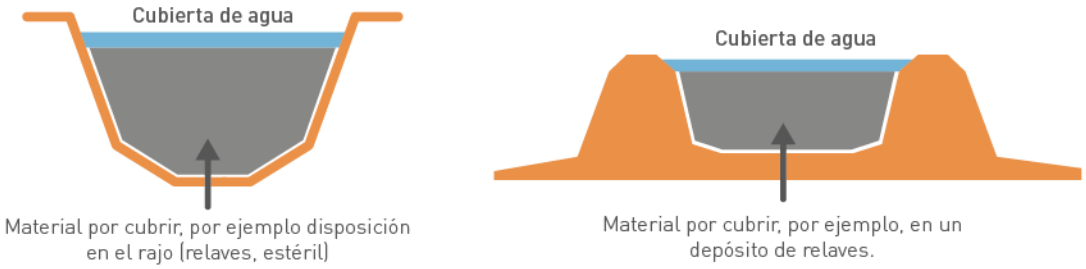
Al ser muy baja la tasa de difusión de oxígeno a través del agua, se previene las reacciones de oxidación y se limita el riesgo de movilización de contaminantes.

ASPECTOS CRÍTICOS

Las *cubiertas de agua* requieren mantener un estado continuo (infinito) de saturación. Por esta razón, deben ser construidas y mantenidas para asegurar esta condición. Una falla de mantenimiento o colapsos por eventos climáticos extremos ponen en alto riesgo el desempeño sustentable a largo plazo.

Estas *cubiertas* deben mantener un cierto nivel de agua (se sugiere al menos 2 m).

La acción de viento sobre el agua puede tener un efecto en la distribución de los relaves sumergidos.



Esquema de diseño de *cubiertas de agua*.
Fuente. Elaboración Propia

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Método eficiente para soluciones inmediatas, y para evitar las reacciones de oxidación de material procesado o estéril a corto plazo. **Desventajas** • El riesgo de falla es relativamente alto comparado a otros sistemas de cubiertas, especialmente para contenciones superficiales. • Dado que la capa de agua debe mantenerse en el tiempo, los costos asociados pueden ser relativamente altos. • Asegurar el mantenimiento en el post-cierre puede ser complicado.	Las *cubiertas de agua* requieren una instalación de contención, o pueden ser instaladas en depresiones/rajos producidos por la actividad minera. Requieren de una fuente segura de agua. Requiere el establecimiento de procedimientos de QA/QC.	Se considera que la *cubierta de agua* puede ser un tipo de cubierta altamente eficiente. Una vez construida, requiere un control continuo de su integridad técnica y mecánica, y una supervisión y mantenimiento regular. .

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
En Louvicourt, Quebec (Canadá), los relaves fueron depositados directamente bajo una *cubierta de agua* en un depósito artificial de una superficie de 1,5 x 10^6 m^2. Se trató el agua de salida del embalse cuando se consideró necesario. Si bien se planificó evaluar la posible aplicación de arena o material orgánico para el cierre, la *cubierta de agua* fue tan eficiente que nunca fue necesario realizar esta evaluación adicional (MEND, 2007).	Las *cubiertas de agua* pueden ser aplicables a estructuras autosuficientes que funcionan como sumidero natural para agua (por ejemplo, rajos).

MÁS INFORMACIÓN

• McGuire, G., 2003. Managing Mine Closure Risks in Developing Communities — A Case Study, Kelian Equatorial Mining, Indonesia. Mining Risk Management Conference, Sydney, 9-12 Sept. 2003.
• MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 1998b. Design Guide for the Subaqueous Disposal of Reactive Tailings in Constructed Impoundments. Report 2.11.9, CANMET.
• MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2007. Assessing the Long Term Performance of a Shallow Water Cover to Limit Oxidation of Reactive Tailings at Louvicourt Mine MEND Report 2.12.2.

21 Cubiertas de materia orgánica
(Organic matter cover)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Minimizar, evitar o derivar el flujo de agua/oxígeno mediante cubiertas de materia orgánica	Botaderos Depósitos de relaves	No convencional

OBJETIVOS

Los objetivos generales de las *cubiertas* son controlar el flujo de agua, minimizando o evitando su infiltración y, limitando la difusión de oxígeno en la instalación. La ocurrencia de estos factores es la causa principal de la generación de drenaje minero, pero un control sobre el agua supone también en un control sobre el medio de transporte de los contaminantes generados.

La *cubiertas orgánicas* además de cumplir con el objetivo anterior, favorecen la reducción de los sulfatos (catalizada por la existencia de bacterias sulfatoreductoras), así como la precipitación de metales en forma de oxi-hidróxidos.

DESCRIPCIÓN

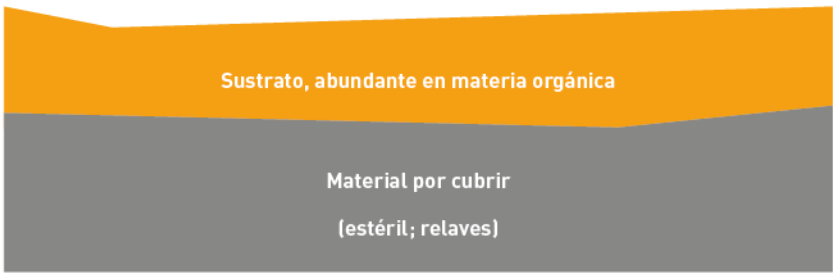
En la superficie de la instalación se dispone la materia orgánica (aserrín, lodos residuales, entre otros) en forma de capas. Esta *cubierta*, se oxida generando condiciones anaeróbicas, y como resultado se obtienen rangos de pH neutros-alcalinos, alta capacidad de intercambio iónico y una baja permeabilidad, creando una barrera química y física.

En ausencia de oxígeno, el riesgo de la oxidación del material sulfuroso subyacente se minimiza.

ASPECTOS CRÍTICOS

El funcionamiento de la *cubierta orgánica* depende de la disponibilidad de materia orgánica y su descomposición.

Con el paso del tiempo, la materia orgánica se consume y la reactividad de este tipo de *cubierta* se reducirá.



Esquema de una *cubierta de materia orgánica*.
Fuente. Elaboración Propia.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- La materia orgánica favorece el crecimiento de plantas y la presencia de bacterias/microorganismos.
- Se pueden construir con recursos renovables.

Desventajas
- Requieren de una gestión continua, controlando la disponibilidad de materia orgánica.
- No se garantiza la exclusión completa de oxígeno, pudiéndose dar bajas tasas de oxidación.

REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

Es necesario el monitoreo de la cantidad de materia orgánica en la *cubierta*, que periódicamente se deberá rellenar con nueva materia orgánica.

Se requiere el establecimiento de procedimientos de QA/QC.

EFICIENCIA

Una *cubierta orgánica* solamente será eficiente si la materia orgánica es fácilmente descomponible, y bajo condiciones climáticas que favorezcan este proceso (climas húmedos).

Cuando la materia orgánica se consume por completo, y no se realiza un mantenimiento de la misma, ésta dejará de funcionar.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

La mina East Sullivan, Canadá, en operación entre 1949 y 1966. Después de su cierre, se depositaron desechos orgánicos encima de los relaves desde 1984. Debido a la diferencia de calidades observadas entre los efluentes generados en relaves con materia orgánica y aquellos sin materia orgánica, se evaluó la posibilidad de utilizar materia orgánica para el control de los efluentes, y se realizaron distintos ensayos en terreno. Los resultados obtenidos fueron prometedores, de tal manera que se decidió el uso de *cubiertas orgánicas*. En el año 2004 un total de 136 ha. fueron cubiertas, lo que representa el 85% (MEND, 2004).

COMENTARIOS

Se recomienda el uso de ensayos pilotos para evaluar un diseño óptimo, incluyendo un período de monitoreo.

Este tipo de *cubiertas* permite el desarrollo de vegetación, que le da estabilidad física a la instalación, minimiza su erosión y genera un impacto positivo en el paisaje del entorno, formando parte de los accidentes geográficos y participando de las funciones ecosistémicas. Se recomienda el uso de plantas que tengan una baja tasa de acumulación de metales, ya que estos pueden pasar a la cadena trófica a través de su ingesta por animales.

Estas *cubiertas* también se conocen como "trampas de oxígeno".

MÁS INFORMACIÓN

- Germain, D., and Tassé, N., 2000. A novel treatment for acid mine drainage, using a wood-waste cover preventing sulfide oxidation. Fifth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 21-24 May 2000, Denver, Colorado.
- Germain, D., Tassé, N., and Cyr, J., 2003. Rehabilitation of Mine Tailings by Simultaneous Prevention of Oxidation and Treatment of Acid Effluents Using a Wood-Waste Cover. 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australia, 12-18 July 2003.
- Wong, M.H., 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. Chemosphere 50,775–780.

22 Cubiertas electroquímicas
(Electrochemical covers)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Controlar el movimiento de potenciales contaminantes	Botaderos Depósitos de relaves Depósitos de lixiviación	No convencional

OBJETIVOS

Los objetivos generales de las *cubiertas* son controlar el flujo de agua, minimizando o evitando su infiltración y, limitar la difusión de oxígeno en la instalación. La ocurrencia de estos factores es la causa principal de la generación de drenaje minero.

La *cubierta electroquímica* trata de influir y dirigir el movimiento de contaminantes al movilizarlos hacia un electrodo, donde se concentran.

DESCRIPCIÓN

El principio de una *cubierta electroquímica* es la instalación de un elemento galvánico con un cátodo (por ejemplo, una malla de acero) y un ánodo (por ejemplo, magnesio), como un electrolito para la conductancia (en este caso, la mezcla de suelo en la *cubierta*).

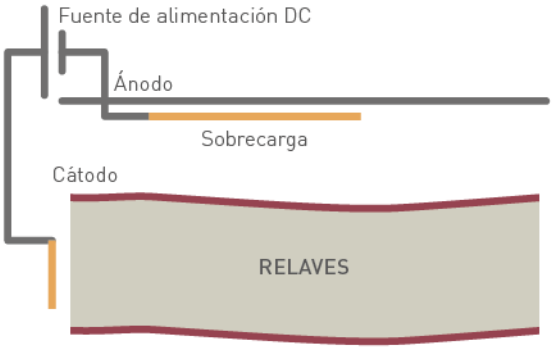
La intención de la *cubierta electroquímica* es prevenir la oxidación de minerales sulfurosos, mediante la inhibición de la difusión de oxígeno hacia los residuos mineros.

El proceso electroquímico fundamental es la trasferencia de electrones desde el ánodo al cátodo, a través de un circuito externo debido a la presencia del par galvánico.

ASPECTOS CRÍTICOS

La tecnología se considera como no convencional y sólo existe experiencia limitada en terreno a mediana escala.

Periódicamente, es necesario reemplazar el material alrededor de los electrodos donde se acumulan los contaminantes.



Cubierta electroquímica.
Fuente. Modificado de Brousseau *et al.*, 2000.

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Es una medida innovadora de prevención y control del drenaje minero. • Es un sistema inocuo al medio. **Desventajas** • Requieren de una fuente continua de energía, además de monitoreo. • Su efectividad no está probada.	Estas *cubiertas* requieren de una fuente continua de energía, y de un mantenimiento y un monitoreo continuo. Se requiere el establecimiento de procedimientos de QA/QC.	En principio se consideran menos eficientes que otros tipos de cubiertas, ya que no se conoce el porcentaje de remoción de los contaminantes. Se consideran como una mejora adicional de las cubiertas de suelo, permitiendo la reducción de su espesor. Se considera que tiene mayor eficacia en ambientes altamente contaminados.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
En un piloto en terreno realizado por U.S. EPA, no se pudo observar una mejora en la calidad del lixiviado respecto de la concentración de sulfatos o el pH durante los dos años que duró el ensayo. Sin embargo, es posible que la duración de ensayo no fue suficiente para observar los impactos sobre la calidad del efluente (U. S. EPA, 2004).	Todavía no se conoce el riesgo de la movilización de los contaminantes que no se ven afectados por el campo electroquímico. Sin embargo, se estima en hasta un 98% la remoción de hierro a escala de laboratorio.

MÁS INFORMACIÓN

• Brousseau, J.H.R., Seed, L.P., Lin, M.Y., Shelp, G.S., and Fyfe, J.D. Electrochemical Prevention of Acid Mine Drainage.
• Chartrand, M.M.G., 2003. Electrochemical remediation of acid mine drainage. Journal of Applied Electrochemistry 33, 259–264. doi:10.1023/A:1024139304342.
• Sahoo P.K., Kim, K., Equeenuddin, S.M., and Powell, M.A., 2013. Current approaches for mitigating acid mine drainage. RevEnvironContamToxicol 226, 1-32.
• U. S. EPA, 2008. Mine Waste Technology Program Electrochemical Tailings Cover. EPA/600/R-08/095 July 2008. National Service Center for Environmental Publications (NSCEP).

23 Atenuación natural
(Encouragement of natural attenuation)

OBJETIVO GENERAL	INSTALACIÓN	TIPO DE METODOLOGÍA
Limitar la reactividad de minerales, minimizar la difusión de oxígeno y la infiltración de agua	Botaderos Depósitos de relaves Minas a rajo abierto Minas subterráneas	Emergente

OBJETIVOS

Las capas cementadas o "hardpan", funcionan como una barrera hidráulica para el agua y los gases de poro, y restringen el movimiento de metales disueltos a través de los botaderos, depósitos de relaves, rajos y minas subterráneas.

DESCRIPCIÓN

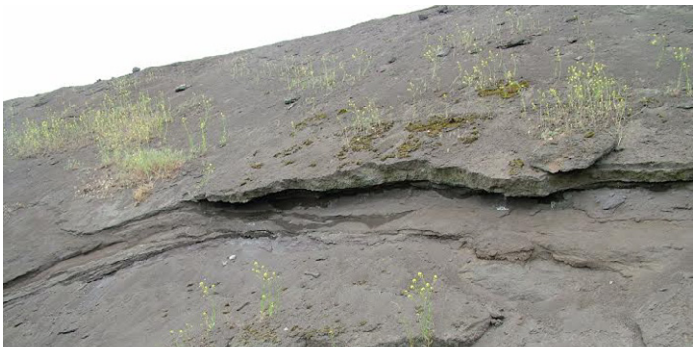
Los metales liberados en el proceso de generación de drenaje minero pueden ser atenuados por adsorción o co-precipitación con minerales secundarios, como los óxidos y oxi-hidróxidos de hierro.

Varios estudios han descrito la precipitación preferencial en capas de "hardpan" que inhiben el flujo de oxígeno y generan zonas de baja porosidad y permeabilidad, restringiendo el movimiento de metales disueltos. Por tanto, estas capas cementadas funcionan también como una zona de acumulación reteniendo los elementos potencialmente contaminantes.

ASPECTOS CRÍTICOS

Es un proceso cuya velocidad es variable, ya que estas capas se producen de manera natural durante la oxidación de los sulfuros.

Depende de variables tales como la capacidad de desorción, la solubilidad de fases, la estabilidad bajo condiciones cambiantes de pH o la porosidad del material, entre otros.



Hardpan o cementación en un botadero de escorias (Alemania).
Fuente. Fotografía gentileza de Andrea Kassahun.

VENTAJAS/DESVENTAJAS	REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	EFICIENCIA
Ventajas • Pueden reducir las tasas de oxidación de sulfuros significativamente, mediante la atenuación de los elementos potencialmente contaminantes, liberados durante la oxidación de sulfuros. • Sirven de barrera hidráulica, y son zonas de precipitación preferencial. **Desventajas** • Puede ser un proceso lento, en comparación con el ciclo de vida de una faena minera. Así, es posible que no sea eficiente si no se acelera artificialmente.	No requiere mantenimiento, ya que se produce de manera natural.	Como el proceso de atenuación ocurre por procesos naturales, este método no es tan eficiente en comparación con los métodos activos de prevención y control de drenaje minero, en caso de que no se generen artificialmente las condiciones adecuadas para acelerar el proceso formador.

EJEMPLO DE APLICACIÓN	COMENTARIOS
En el distrito minero de Freiberg, Alemania, Graupner *et al.* (2007) estudiaron la secuencia de capas cementadas en relaves con bajos contenidos en carbonatos y sulfuros. Los principales efectos de las capas cementadas en este caso fueron la atenuación natural temporal de componentes tóxicos, la restricción del movimiento de la oxidación en profundidad, y la reducción de los efectos de erosión por agua y viento en la superficie de los relaves.	Se considera que esta técnica puede ser útil, especialmente para el arsénico y otros oxi-aniones.

MÁS INFORMACIÓN

• Graupner, T., Kassahun, A., Rammlmaier, D., Meima, J.A., Kock, D., Furche, M., Fiege, A., Schippers, A., and Melcher, F., 2007. Formation of sequences of cemented layers and hardpans within sulfide-bearing mine tailings (mine district Freiberg, Germany). Applied Geochemistry 22 (11), 2486–2508.
• Meima, J.A., Graupner, T., and Rammlmair, D., 2012. Modelling the effect of stratification on cemented layer formation in sulfide-bearing mine tailings, Applied Geochemistry 27, 124–137.

5. Fichas de tecnologías de tratamiento del drenaje minero

A continuación se presenta información de aquellas *Tecnologías de Tratamiento* consideradas relevantes, las cuales son aplicadas directamente sobre el efluente o drenaje generado. Estas tecnologías se clasifican en dos grupos, las de *Tratamiento Pasivo*, que se caracterizan por no requerir el uso de insumos químicos y energía para funcionar, y las tecnologías de *Tratamiento Activo*, las que sí requieren de instalaciones, energía externa, insumos y mano de obra para operar. Para cada una de las tecnologías se señala su objetivo, descripción, condiciones operacionales, ventajas y desventajas, esquemas visuales y eficiencia, entre otros. Esta información ha sido compilada en forma de Ficha, cuyo ejemplo de contenido se presenta en la siguiente Figura.

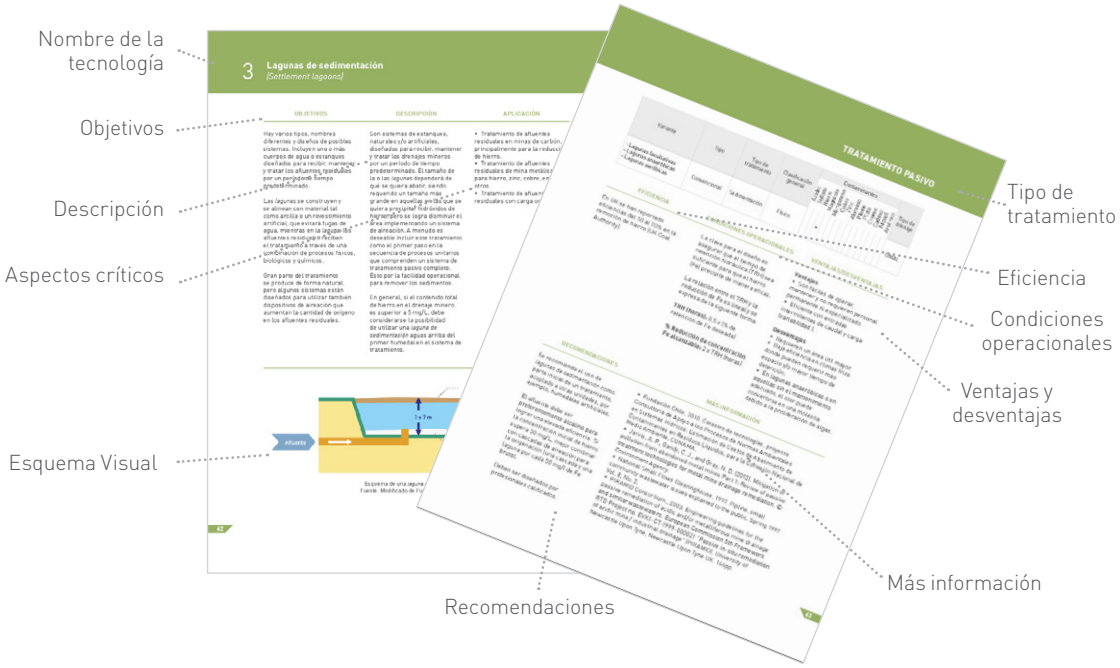


Figura 2. Contenido de fichas de información para las tecnologías de tratamiento seleccionadas.

5.1 Fichas de tratamientos pasivos

A continuación en la Tabla 2 se presentan los 11 tratamientos pasivos que son detallados posteriormente en Fichas.

Las consideraciones que se han tenido en la clasificación de cada tratamiento son las siguientes:

- **Tipo de tecnología en relación a su consideración en el mercado:** convencional, no convencional o emergente.
- **Tipo de tratamiento pasivo:** tratamiento biológico, sedimentación, precipitación química o reducción biológica.
- **Fundamento de la tecnología:** proceso biológico, físico, fisicoquímico o químico.
- **Levantamiento de los contaminantes abatidos más relevantes:** acidez, sulfato, hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), aluminio (Al), plomo (Pb), plata (Ag), cromo (Cr), cadmio (Cd), níquel (Ni) y arsénico (As).
- **Tipo de drenaje minero (DM) a tratar:** ácido (DMA), neutro (DMN) o alcalino (DMAL).

Tabla 2. Listado de la fichas de tratamiento pasivo.

NÚMERO	TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO PASIVO	PÁGINA
1	Humedal aeróbico	58
2	Humedal anaeróbico	60
3	Lagunas de sedimentación	62
4	Extracción pasiva de sulfatos	64
5	Drenes de caliza	66
6	Sistemas reductores y productores de alcalinidad	68
7	Barreras reactivas permeables	70
8	Pozos de desviación de piedra caliza	72
9	Lecho de escoria lixiviante	74
10	Cubiertas productoras de alcalinidad	76
11	Reactores SCOOFI	78

1 Humedal aeróbico
(Aerobic wetland)

OBJETIVOS

Los *humedales aeróbicos* pretenden reproducir los fenómenos y procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, turberas, entre otros) creando el ambiente propicio para el desarrollo de ciertas plantas (Tipha, Equisetum, carrizo, juncos, etc.), comunidades de organismos (algas, protozoos y bacterias) y musgos (Sphagnum), los cuales participan en la depuración de efluentes contaminados.

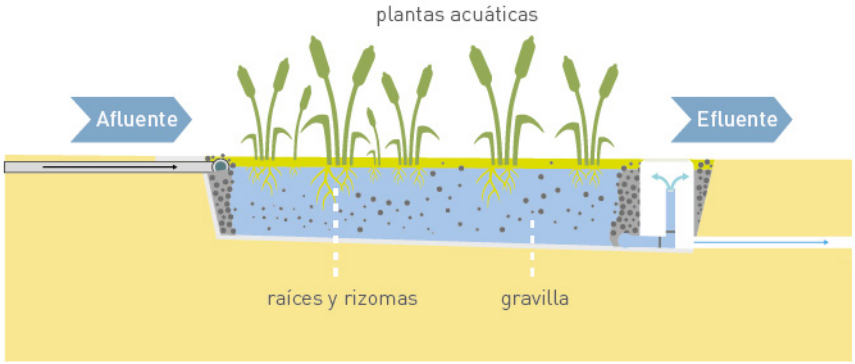
El empleo de plantas acuáticas favorece la oxigenación del afluente a través de las raíces y rizomas.

DESCRIPCIÓN

Un *humedal aerobio* suele consistir en una o varias celdas conectadas entre sí. Cada celda tiene una capa de substrato formado por sedimentos relativamente impermeables (suelo, arcilla o desechos de mina), y una cubierta de vegetación que tiene el rol de oxigenar a través de sus raíces, lo que propicia el desarrollo de colonias de bacterias catalizadoras en las reacciones de oxidación de los metales presentes. El efluente a tratar circula entre las celdas a favor de la gravedad, por lo que no se requiere bombeo. El diseño de las celdas puede ser tipo cascadas, lechos serpenteantes y balsas de grandes superficies de baja profundidad.

ASPECTOS CRÍTICOS

Los *humedales aerobios* se emplean para el tratamiento de afluentes que representen una alcalinidad neta que sea capaz de neutralizar la acidez generada en la hidrólisis de los metales.



Esquema de un *humedal aerobio*.
Fuente. Modificado de Tilley *et al*., 2014.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
-Humedal de flujo vertical -Reducción de acidez utilizando microorganismos (ARUM)	Convencional	Tratamiento biológico	Biológico	•		•												DMA

EFICIENCIA

La eficiencia depende de las características específicas de cada sistema. Sin embargo, para evaluarla se utilizan diferentes métodos para expresar el rendimiento de los humedales. Una de éstas es calcular la reducción porcentual del contaminante a la salida del humedal en relación a la concentración de entrada. Utilizando una carga hidráulica de 5 cm/día y un tiempo de retención superior a 24 horas para una carga de hierro de 2-10 g/m^2/día, se obtiene una "eficiencia de tratamiento" del 90%, valor que disminuye a poco menos de la mitad porcentual cuando la carga de hierro aumenta hasta 20 - 40 g/m^2/día.

CONDICIONES OPERACIONALES

Tiempo de residencia: 8 a 24 h.
Profundidad: < 45 cm.
Número de piscinas: Múltiples.
Tiempo de retención: 0,25 - 75 días.
Sustratos: Hongos, compost, turba, aserrín, estiércol y fertilizante.
El tipo de plantas se selecciona en función de las concentraciones y variedad de metales presentes en el afluente.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Sistemas relativamente económicos de construir y operar.
- Fáciles de mantener.
- Tolerancia relativa a los cambios de cargas hidráulicas y biológicas.
- Proporciona beneficios ecológicos.
- Es reconocido por agentes reguladores y grupos ambientales como alternativa de tratamiento de efluentes contaminados.

Desventajas
- Requieren grandes superficies de terreno.
- Existen criterios imprecisos de diseño y operación.
- Presentan alteraciones en su funcionamiento en los cambios de estación, afectando la flora microbiana presente en el humedal.
- Puede generar problemas de olor y mosquitos.

RECOMENDACIONES

El diseño de un sistema de humedales requiere de la comprensión de la química del afluente, la técnica que se aplicará y de la experiencia recopilada para el éxito de la operación. Además, se debe tener en cuenta que este tipo de sistemas requiere de un flujo continuo de afluente y es susceptibles a cambios grandes en las condiciones ambientales.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulfate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- INAP – The International Network for Acid Prevention (INAP), 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- Johnson, D. B., and Hallberg, K. B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the total environment, 338(1), 3-14.

2 Humedal anaeróbico
(Anaerobic wetland)

OBJETIVOS

Los *sistemas anaerobios* se basan principalmente en reacciones químicas y microbianas de reducción cuya finalidad es la precipitación de los metales presentes en afluentes, además de neutralizar la acidez que ellas poseen.

El tratamiento del agua en *humedales anaerobios* de flujo horizontal, tratan drenaje minero ácido a través del uso de un sustrato de carbono, moviéndose el agua de forma horizontal.

Los *humedales anaerobios* de flujo vertical generan su efecto por el movimiento vertical del afluente a través de un sustrato de carbono para posteriormente pasar a un lecho de piedra caliza donde finalmente se neutralizan por su aporte de alcalinidad.

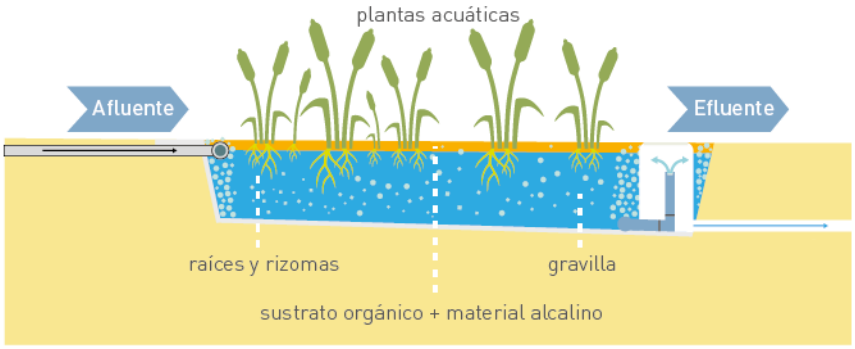
DESCRIPCIÓN

Los *humedales anaerobios* son sistemas que buscan favorecer las condiciones anóxicas requeridas para eliminar el oxígeno disuelto, reducir el Fe^{+2} a Fe^{+3} y generar alcalinidad mediante procesos químicos o con intervención de microorganismos.

Estos sistemas operan en permanente inundación, fluyendo parte del agua horizontalmente a través del sustrato orgánico. En este se desarrollan bacterias anaerobias sulfo-reductoras (Desulfovibrio y Desulfomaculum principalmente), capaces de realizar sus procesos metabólicos utilizando la materia orgánica del sustrato y el sulfato disuelto en el agua intersticial como fuente de energía. Esta reducción bacteriana del sulfato genera ácido sulfhídrico o azufre elemental y alcalinidad, reduciendo también la acidez mineral potencial debida al hierro y otros metales al precipitar como sulfuros, además del efecto de la disolución de la caliza al reaccionar con la acidez que también aporta alcalinidad al sistema.

ASPECTOS CRÍTICOS

Dado que los *humedales anaerobios* producen alcalinidad, su uso se puede extender a drenajes mineros ácidos con acidez neta, bajo pH, alta concentración de hierro y alta concentración de oxígeno disuelto (> 2 mg/L).



Esquema de un *humedal anaerobio*.
Fuente. Modificado de Tilley *et al.*, 2014

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Tratamiento biológico	Biológico		•	•												DMA

EFICIENCIA

Entre los principales parámetros a tener en cuenta en el diseño y eficiencia de un *humedal anaerobio*, está la composición del sustrato.

En minas de carbón de EE.UU, los drenajes sometidos a la acción de estos sistemas presentan eficiencias del 80% de remoción de hierro, 20% de manganeso y 70% de acidez cuando se utilizó paja, estiércol y compost en la construcción de la capa de sustrato del humedal.

CONDICIONES OPERACIONALES

Profundidad: > 30 cm.
Espesor sustrato orgánico: 30 - 60 cm.
Sustrato (material orgánico): 70 - 90 % de estiércol, compost, turba, heno, aserrín, etc.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Operan a energía baja o nula, y por ende bajo costo.
- Baja generación de residuos secundarios, control de la erosión del suelo e infiltración de contaminantes.
- Permite la remediación de sitios contaminados.
- Permite la restauración y recuperación de suelos al finalizar su funcionamiento.

Desventajas

- La cinética de reducción del sulfato disminuye durante los meses fríos, provocada por el menor rendimiento del sistema en periodos invernales.
- La actividad de las bacterias sulfato reductoras es sensible a cambios de pH, inhibiéndose a pH inferior a 5, pudiendo llegar a desaparecer su presencia al entrar al sistema un caudal muy ácido.

RECOMENDACIONES

El diseño de un sistema de humedales construidos para tratar drenaje minero ácido requiere de la comprensión de la química del drenaje, la técnica que se aplicará y de la experiencia recopilada para el éxito de la operación.

MÁS INFORMACIÓN

- INAP – The International Network for Acid Prevention (INAP), 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- López Pamo, E., Aduvire, O., and Barettino, D., 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21.
- MEND - Mine Environment Neutral Drainage, 2000. Mend manual volume 5 – Treatment Mend 5.4.2e.

3 Lagunas de sedimentación
(Settlement lagoons)

OBJETIVOS

Hay varios tipos, nombres diferentes y diseños de posibles sistemas. Incluyen uno o más cuerpos de agua o estanques diseñados para recibir, mantener y tratar los afluentes residuales por un período de tiempo predeterminado.

Las *lagunas* se construyen y se alinean con material tal como arcilla o un revestimiento artificial, que evitará fugas de agua, mientras en la *laguna*, los afluentes residuales reciben el tratamiento a través de una combinación de procesos físicos, biológicos y químicos.

Gran parte del tratamiento se produce de forma natural, pero algunos sistemas están diseñados para utilizar también dispositivos de aireación que aumentan la cantidad de oxígeno en los afluentes residuales.

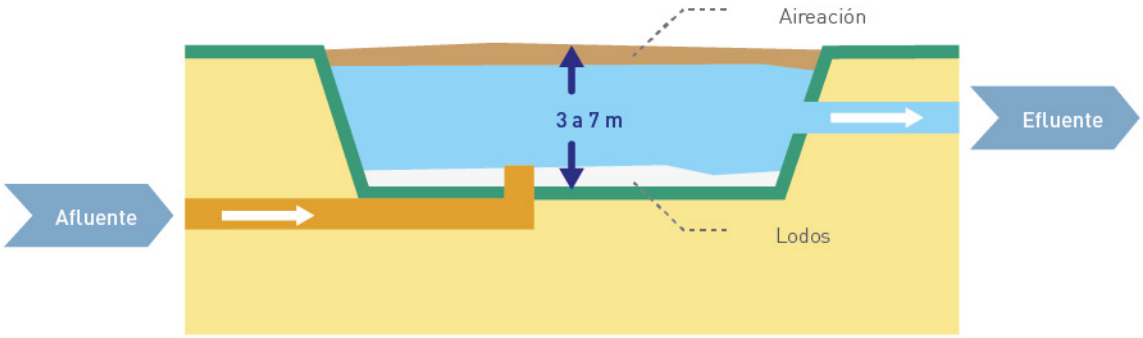
DESCRIPCIÓN

Son sistemas de estanques, naturales y/o artificiales, diseñados para recibir, mantener y tratar los drenajes mineros por un período de tiempo predeterminado. El tamaño de la o las *lagunas* dependerá de qué se quiera abatir, siendo requerido un tamaño más grande en aquellas en las que se quiera precipitar hidróxidos de hierro, pero se logra disminuir el área implementando un sistema de aireación. A menudo es deseable incluir este tratamiento como el primer paso en la secuencia de procesos unitarios que comprenden un sistema de tratamiento pasivo completo. Esto por la facilidad operacional para remover los sedimentos.

En general, si el contenido total de hierro en el drenaje minero es superior a 5 mg/L, debe considerarse la posibilidad de utilizar una *laguna de sedimentación* aguas arriba del primer humedal en el sistema de tratamiento.

APLICACIÓN

- Tratamiento de afluentes residuales en minas de carbón, principalmente para la reducción de hierro.
- Tratamiento de afluentes residuales de mina metálicas para hierro, zinc, cobre, entre otros.
- Tratamiento de afluentes residuales con carga orgánica.



Esquema de una *laguna de sedimentación*.
Fuente. Modificado de Fundación Chile, 2010.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- Lagunas facultativas - Lagunas anaeróbicas - Lagunas aeróbicas	Convencional	Sedimentación	Físico			•												DMAL

EFICIENCIA

En UK se han reportado eficiencias del 50 al 70% en la remoción de hierro (UK Coal Authority).

CONDICIONES OPERACIONALES

La clave para el diseño es asegurar que el tiempo de retención hidráulica (TRH) sea suficiente para que el hierro (Fe) precipite de manera eficaz.

La relación entre el TRH y la reducción de Fe es lineal y se expresa de la siguiente forma:

TRH (horas): 0,5 x (% de retención de Fe deseada)

% Reducción de concentración Fe alcanzable: 2 x TRH (horas)

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Son fáciles de operar, mantener y no requieren personal permanente ni especializado.
- Eficiente con entradas intermitentes de caudal y carga (variabilidad).

Desventajas

- Requieren un área útil mayor.
- Baja eficiencia en climas fríos donde pueden requerir más espacio y/o mayor tiempo de detención.
- En lagunas anaeróbicas o en aquellas sin el mantenimiento adecuado, el olor puede convertirse en una molestia debido a la proliferación de algas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de *lagunas de sedimentación* como parte inicial de un tratamiento, acoplado a otras unidades, por ejemplo, humedales artificiales.

El afluente debe ser idealmente alcalino para lograr una elevada eficiencia. Si la concentración inicial de hierro supera 50 mg/L, mejor combinar con cascadas de aireación para la oxigenación (una cascada y una laguna por cada 50 mg/l de Fe bruto).

Deben ser diseñados por profesionales calificados.

MÁS INFORMACIÓN

- Fundación Chile, 2010. Catastro de tecnologías, proyecto Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de Abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos, para la Comisión Nacional de Medio Ambiente, CONAMA.
- Jarvis, A. P., Gandy, C. J., and Gray, N. D. (2012). Mitigation of pollution from abandoned metal mines Part 1: Review of passive treatment technologies for metal mine drainage remediation. © Environment Agency.
- National Small Flows Clearinghouse, 1997. Pipline, small community wastewater issues explained to the public. Spring 1997 Vol. 8, No. 2.
- PIRAMID Consortium., 2003. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK. 166pp.

4 Extracción pasiva de sulfatos
(Passive sulphate removal)

OBJETIVOS

Tratamiento pasivo desarrollado específicamente para lograr tasas elevadas de reducción de sulfato, eliminándolo como azufre elemental.

La reducción de sulfato se basa en la generación de compuestos fácilmente biodegradables en el afluente para apoyar la función de las bacterias sulfato reductoras.

DESCRIPCIÓN

La *remoción pasiva de sulfatos* utiliza los mismos mecanismos aplicados en los humedales anaeróbicos, incorporando algunas características nuevas:

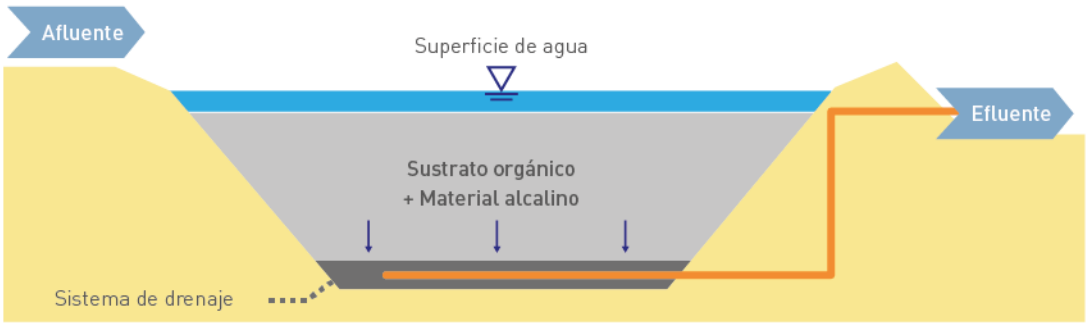
- El volumen del reactor de lecho, la selección de materiales de relleno y la secuencia en que éstos se utilizan se define específicamente para las características del afluente a tratar y con el objetivo de hidrolizar materiales lignocelulósicos. Esto asegura la generación continua de ácidos grasos volátiles necesarios para lograr la reducción del sulfato.

- En una segunda etapa de tratamiento los reactores (primarios y secundarios) oxidan el ácido sulfhídrico a azufre elemental, asegurando su estabilización.

APLICACIÓN

Los sistemas de *extracción pasiva de sulfatos* son una alternativa a los sistemas de neutralización típicos utilizados para tratar aguas subterráneas contaminadas. Se utilizan principalmente para la eliminación sostenible de sulfatos en condiciones ácidas, neutras y alcalinas, abordando al mismo tiempo la eliminación de metales y reducción de acidez.

Si bien la tecnología aún no se ha aplicado a gran escala ni en sitios de tratamiento permanente, posee características que la hacen prometedora para el manejo del sulfato en efluentes mineros.



Esquema de un birreactor para la *extracción pasiva de sulfatos*.
Fuente. Modificado de Gusek, 2002.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	No Convencional	Reducción biológica	Biológico		•													DMN DMAL

EFICIENCIA

Las investigaciones y pruebas realizadas con este tipo de reactores han determinado que son capaces de eliminar hasta 1000 mg/L de sulfatos mediante el proceso de bio-neutralización.

Estos sistemas también permiten la eliminación de hasta 90% de hierro y 20% de aluminio (capaces de acumular metales > 1 kg/m^3 de carbono).

CONDICIONES OPERACIONALES

En cada caso se debe determinar la cantidad adecuada de una fuente de carbono que apoyará a las bacterias en el largo plazo. El sistema hidráulico debe permitir condiciones reductoras y altos tiempos de residencia (>40 horas), pero evitando la obstrucción del sistema debido al sustrato. Se debe controlar la oxidación de HS^- de tal modo que no se produzca la oxidación directa a SO_4^{2-}.

Se requiere un ambiente anaeróbico y pH neutro para reducir eficazmente el sulfato. El potencial redox se debe mantener a -300 mV o inferior y la temperatura >15 °C.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Capaz de eliminar en gran medida sulfato, hierro, y otros metales.
- Se produce un lodo relativamente inocuo de fácil manejo.
- Permite el reuso de desechos orgánicos como fuente de carbono.
- El azufre elemental puede ser recuperado y valorizado económicamente.

Desventajas

- Requiere de I+D antes de ser implementado en una faena minera para su adaptación a condiciones locales.
- Se requiere pre-tratamiento de neutralización si los afluentes son ácidos.

RECOMENDACIONES

Al no existir un sistema implementado a gran escala de *extracción pasiva de sulfatos* se recomienda que el diseño de este tipo de tecnologías sea realizada por expertos y hacer una investigación previa de las condiciones para lograr un sistema de tratamiento apropiado para las condiciones del entorno.

MÁS INFORMACIÓN

- Gusek, J.J., 2002. Sulfate-reducing bioreactor design and operating issues: Is this the passive treatment technology for your mine drainage?
- INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.
- PIRAMID Consortium, 2003. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK. 166pp.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

5 Drenes de caliza
(Limestone drains)

OBJETIVOS

El objetivo de los *drenes anóxicos* de caliza (ALD - Anoxic limestone drains) y *drenes óxicos de caliza* (OLD – Open/Oxic limestone drains) es elevar pH y generar condiciones alcalinas de manera que se forme fácilmente un precipitado en unidades de tratamiento pasivo aeróbicos posteriores (por ejemplo, balsas de sedimentación, humedales aeróbicos). Para ello utilizan la disolución de calcita ($CaCO_3$) a través de la generación de bicarbonato.

Los metales disueltos pueden ser precipitados al pasar por este lecho cuando se encuentran en condiciones oxidantes aguas abajo del punto de drenaje.

DESCRIPCIÓN

Este sistema consiste en una zanja rellena con gravas de caliza u otro material calcáreo de un solo tamaño (50-75 mm) sellada a techo por una capa de tierra arcillosa y una geomembrana impermeable. La caliza debe tener un alto contenido en carbonato de calcio (> 80%).

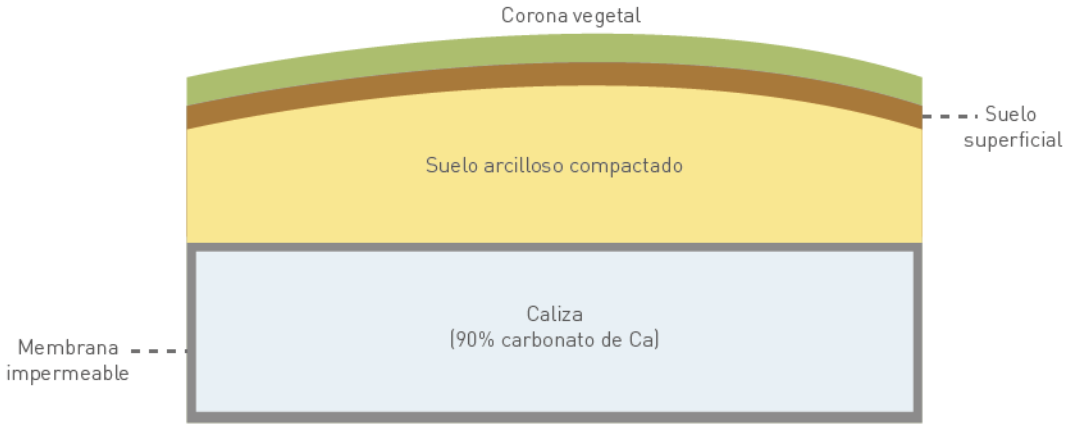
La zanja se instala a cierta profundidad (1 ó 2 m) para mantener unas condiciones anóxicas de modo que el hierro disuelto permanezca en su forma ferrosa evitando la formación de la forma férrica, que conduciría rápidamente a la obstrucción de los poros y canales.
El *OLDs* es similar en su diseño y construcción al *ALDs*. La diferencia radica en que no se favorece el estado anaeróbico del agua durante el proceso, por lo cual el tamaño de la caliza es generalmente mayor y la velocidad del agua en el canal también es mayor.

APLICACIÓN

La finalidad de estos sistemas es convertir afluentes con acidez neta en efluentes con un exceso de alcalinidad. La tecnología es ampliamente aplicada en varios rubros, siendo la minería uno de los principales.

En minas de carbón se prefiere el uso de piedra caliza por su bajo costo y accesibilidad a su compra, además de ser fácil y seguro de manejar.

Son también utilizados en proyectos de recuperación de minas abandonadas, donde se puede incurrir en gastos de instalación una única vez y no sea posible un mantenimiento regular.



Esquema de un sistema de tratamiento *ALD*.
Fuente. Modificado de ITRC Mining Waste Team, 2014.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- Drenaje anóxico de caliza (ALD) - Drenaje óxico de caliza (OLD)	Convencional	Precipitación química	Fisicoquímico	•														DMA

EFICIENCIA

Un *ALD* correctamente diseñado y construido debería ser capaz de aportar un mínimo de 150 mg/L de alcalinidad, siendo frecuentes los aportes entre ese valor mínimo y los 350 mg/L. Este rendimiento se obtiene con tiempos de retención a partir de 10-15 horas. La limitada solubilidad de la caliza condiciona el uso de este tipo de tratamientos a afluentes con una acidez neta inferior a 350 mg/L.

Los *OLDs* pueden llegar a reducir la acidez del 4 al 62% en comparación con una reducción del 2% de ácido en un canal de piedra arenisca.

CONDICIONES OPERACIONALES

Temperatura: 4 – 40 º C.
Retención hidráulica: 8 – 14 h.
Conc. de Fe^{+2} y Al^{+2}: <2 mg/L.
Oxígeno disuelto: <1 mg/L.
Presiones parciales de CO_2 en el interior: 0,022 – 0,268 atm.
Tamaño de caliza gradiente hidráulico alto: 10-20 mm.
Tamaño de caliza gradiente hidráulico bajo: 50-75 mm.
Contenido de $CaCO_3$: >80%.
Porosidad caliza: 38% - 50%.
Tiempo de retención: >3 h.
Tamaño caliza: 100 mm.
Concentraciones de Fe^{+3} y Al^{+3}: 10 - 20 mg/L.
Concentración de acidez: ⩽ 90 mg/L (como $CaCO_3$).
Velocidad lineal: > 0,1 m/min.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Bajo costo de operación y mantención, implementación simple.
- Disponible en las zonas mineras.
- Alta tolerancia a condiciones climáticas variables

Desventajas
- Velocidad de disolución lenta en comparación con los álcalis utilizados en el tratamiento químico.
- Formación de barro férrico.
- Rango limitado de las condiciones tratables, al generarse obstrucción del sistema si las concentraciones de hierro y aluminio están sobre los 2 mg/L (añadir tratamiento adicional).

RECOMENDACIONES

Después de este tratamiento se aconseja disponer estanques (p. ej., humedales) de acumulación para capturar el hierro por precipitación una vez en contacto con la atmósfera, que aumentarán la calidad del afluente tratado.

Se recomienda incluir una tubería de socavación (tubo perforado de gran diámetro a lo largo de la base del sistema) que se pueda abrir para permitir el lavado de hidróxidos metálicos sólidos retenidos.

MÁS INFORMACIÓN

- ITRC Mining Waste Team, 2014. Technology Overview as part of a Web-based Technical and Regulatory Guidance. Anoxic Limestone Drains (en línea). http://www.itrcweb.org/miningwaste-guidance/to_anoxic.htm [consulta: febrero 2015]
- Johnson, D. B., and Hallberg, K. B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the total environment, 338(1), 3-14.
- López Pamo, E., Aduvire, O., and Barettino, D., 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21.
- PIRAMID Consortium, 2003. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK. 166pp.

6 Sistemas reductores y productores de alcalinidad
(Reducing and producing alkalinity systems)

OBJETIVOS

Los *sistemas reductores y productores de alcalinidad* (RAPS) fueron diseñados como una tecnología de tratamiento de drenaje minero ácido que contienen elevadas concentraciones de oxígeno disuelto o de hierro férrico, como alternativa a los sistemas que utilizan piedra caliza en su neutralización.

Asimismo, esta tecnología fue pensada para dar solución a otros problemas tales como las extensas superficies que requieren los humedales anaeróbicos o la precipitación de hierro y aluminio en los sistemas de drenaje anóxico de caliza.

DESCRIPCIÓN

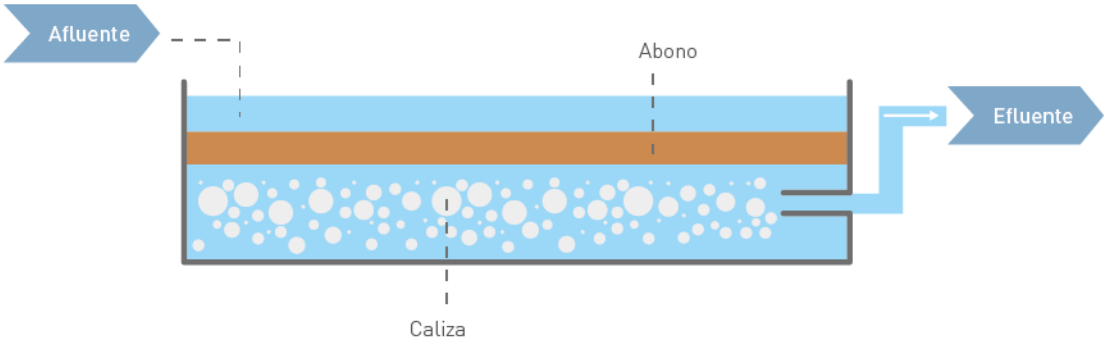
Esta tecnología integra un sistema similar a un humedal anaeróbico de flujo vertical, con un estanque donde se incorpora una capa orgánica y un sistema de drenaje anóxico de caliza. La capa orgánica genera la reducción de hierro y sulfato, además de la retención de especies metálicas, mientras que el sistema que incluye la caliza aporta alcalinidad al sistema.

Finalmente el tratamiento se completa adicionando una laguna de sedimentación y/o un humedal aeróbico, donde precipitan y se retienen los hidróxidos de hierro.

La alcalinidad proporcionada por la piedra caliza amortigua y mitiga los efectos del drenaje minero ácido al entrar en contacto con acuíferos aguas abajo de la generación del drenaje.

APLICACIÓN

Al igual que los drenajes abiertos de caliza, en ocasiones esta tecnología se ha desarrollado para mejorar la calidad de los drenajes provenientes de minas abandonadas.



Esquema de un sistema de tratamiento pasivo *RAPS*.
Fuente. Modificado de Younger, 2000a; PIRAMID Consortium, 2003.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- RAPS (Reducing and Alkalinity Producting Systems) - SAPS (Successive Alkalinity Producing Systems)	No Convencional	Tratamiento biológico / precipitación química	Biológico	•	•													DMA

EFICIENCIA

Potencial de neutralización: 35 - 400 mg/L de $CaCO_3$.
Tasa de adición de alcalinidad (por unidad de RAPS): 150 – 250 L/día .

La disolución de piedra caliza añade de 50 a 75 mg/L de alcalinidad como $CaCO_3$ al agua a tratar. Su eficiencia aumenta cuando se integran en serie más de una unidad para tratar afluente ácido.

Existen reportes avalando que se ha restablecido la pesca en sectores contaminados con drenaje minero ácido, donde se han instalado lechos de lixiviación alcalina conformados por piedra caliza.

CONDICIONES OPERACIONALES

Concentración de alimentación:
2-5 mg SO_4/L.

Concentración de salida:
1-2 mg SO_4/L.

Espesor capa de piedra caliza:
0,6 - 1,2 m.

Espesor material orgánico:
0,15 - 0,6 m.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Requieren menor espacio para su implementación (20% menos comparado con humedales).
- Fácil operación y mantenimiento.

Desventajas
- Desde una perspectiva de seguridad pública, la presencia de más de 0,5 m de la materia orgánica saturada representa un peligro de caída significativo al ser un sistema abierto.

RECOMENDACIONES

Seguido del tratamiento utilizar un sistema de reacción de hierro (p.ej., humedales) para realizar el tatamiento completo. Si el afluente a tratar contiene altas concentraciones de aluminio, será oportuno evaluar si este sistema es el apropiado con el fin de evitar taponamiento en la carga orgánica.

MÁS INFORMACIÓN

- INAP – The International Network for Acid Prevention (INAP), 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- López Pamo, E., Aduvire, O. and Barettino, D., 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21.
- PIRAMID Consortium, 2003. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK. 166pp.
- Younger, P.L., 2000a. Holistic remedial strategies for short- and long-term water pollution from abandoned mines. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section A), 109, A210-A218.

7 Barreras reactivas permeables
(Permeable reactive barriers)

OBJETIVOS

Las *barreras reactivas permeables (BRP)* son una tecnología de tratamiento continuo e *in situ* de infiltraciones y/o aguas de contacto, diseñadas para interceptar y remediar la pluma que contiene el o los parámetros a remover.

Los procesos involucrados en el tratamiento usando *BRP* corresponden a una mezcla entre procesos físicos, químicos o biológicos, dependiendo de las características del afluente a tratar y los niveles que se pretenden lograr.

DESCRIPCIÓN

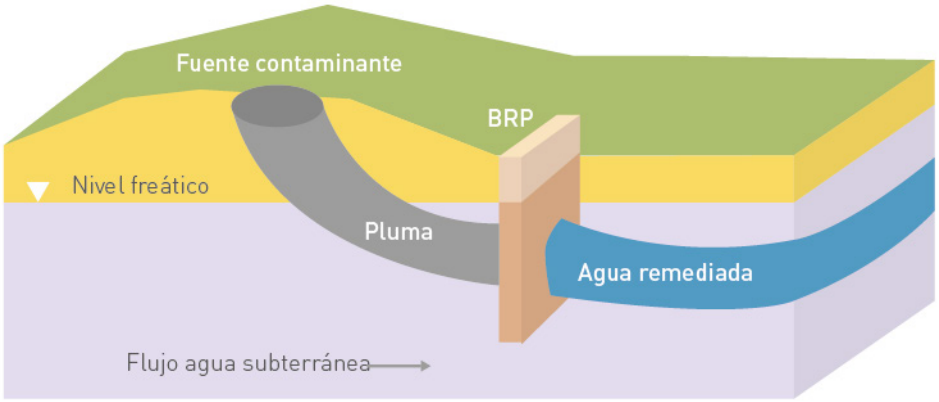
La *barrera permeable* se compone de una mezcla de materiales adsorbentes específicamente seleccionados para el tratamiento de un afluente en particular. La zona de tratamiento puede ser creada usando materiales reactivos directamente, como hierro, o indirectamente usando materiales diseñados para estimular procesos secundarios, como la adición de carbono y nutrientes como sustrato para aumentar la actividad microbiana.

El afluente o la infiltración es conducida a través de la *barrera permeable* provocándose la remoción *in situ*. El término barrera transmite el concepto de tratamiento para flujos subterráneos de aguas y no asegura el tratamiento de aguas subterráneas circundantes. No altera la hidrogeología de estos acuíferos cercanos a la *barrera*.

APLICACIÓN

Instaladas aguas abajo, cerca de los limites del sitio contaminado, las *BRP* están destinadas a proteger las propiedades de los receptores sobre los que confluya tales como agua superficiales o pozos y de esta manera también generar protección para aguas subterráneas que pudiesen recoger los contaminantes.

Por otro lado, las *BRP* instaladas cerca de los cuerpos receptores pretenden, por un lado, reducir el flujo másico de los contaminantes que pudiesen contaminar agua abajo, pero por otro lado, monitorear la atenuación natural de los contaminantes presentes en las aguas residuales o generadas por drenaje minero ácido.



Esquema de una *barrera reactiva permeable* (*BRP*).
Fuente. Modificado de U.S. EPA, 1998.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Tratamiento biológico / precipitación química	Biológico / fisicoquímico	•	•	•											•	DMA

EFICIENCIA

La evaluación de la longevidad a largo plazo de los sistemas de *BRP,* se ha examinado utilizando pruebas de columnas.

Estos estudios, en conjunto con las características específicas del sitio, prevén que las *BRP* duren de 10 a 30 años antes de presentar problemas de reactividad e hidráulicos, previo a necesitar mantenimiento. La vida útil es dependiente de la carga y tipo de parámetro a remover.

CONDICIONES OPERACIONALES

Concentración de alimentación:
2.500 - 5.200 mg/L SO_4.

Concentración de salida:
840 mg/L SO_4.

Tasa de reducción de SO_4:
10,5-15,3 mg/L/día.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Bajo costo de operación y mantenimiento.
- La mayoría de los diseños de *BRP* no requieren estructuras sobre tierra.

Desventajas
- Requiere de investigación y desarrollo (I+D) para su aplicación a drenajes con alta carga de sulfato.
- Tecnología dependiente de otro sistema de tratamiento complementario.
- El tiempo de remediación puede ser extenso, dependiendo del tamaño de la zona contaminada.
- La precipitación de minerales puede limitar la permeabilidad del sistema.

RECOMENDACIONES

Para el éxito del diseño de una *BRP* se requiere comprender la química del drenaje minero y la técnica que se aplicará en base a la experiencia recopilada. Si existen altas cargas de algún contaminante se debe aplicar alguna técnica como prevención al taponamiento de la *barrera*. Asimismo, se recomienda su uso en conjunto con lagunas de sedimentación y/o humedales aeróbicos para facilitar la remoción de metales y oxígeno disuelto. Para la remoción de sulfato se requiere de I+D en el diseño del sistema de tratamiento.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulfate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- Cortina, J. L., Fiúza, A. M., Silva, A., and Litter, M. I. Tecnologías de tratamiento in-situ de aguas subterráneas. Capítulo 7.
- Johnson, D. B., and Hallberg, K. B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the total environment, 338(1), 3-14.
- U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency, 1998. Permeable Reactive Barrier Technologies for contaminant remediation. 102 p.
- Younger, P. L., Jayaweera, A., Elliot, A., Wood, R., Amos, P., Daugherty, A. J., and Johnson, D. B., 2003. Passive treatment of acidic mine waters in subsurface-flow systems: exploring RAPS and permeable reactive barriers. Land Contamination and Reclamation, 11(2), 127-135.

8 Pozos de desviación de piedra caliza
(Limestone diversion wells)

OBJETIVOS

Los *pozos de desviación de piedra caliza (LDW)* son dispositivos simples desarrollados para el tratamiento de corrientes ácidas causadas por lluvias ácidas, que posteriormente han sido adaptados para el tratamiento de drenaje minero ácido.

Representan una opción en sitios donde la diferencia topográfica es acentuada, permitiendo que una fracción del flujo se desvíe y atraviese una barrera de piedra caliza, provocando la subida del pH y precipitación de algunos metales.

DESCRIPCIÓN

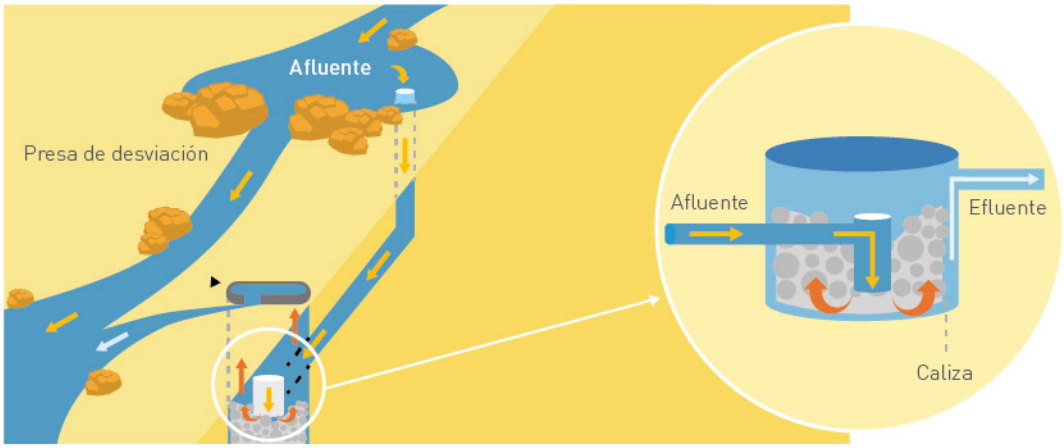
Un *LDW* típico consiste en un cilindro o tanque vertical de metal u hormigón, con 1.5 - 1.8 m de diámetro y 2-2,5 m de profundidad, relleno de arena de piedra caliza construido a un lado o enterrado en el suelo junto al flujo. Un tubo de 20-30 cm de diámetro, entra verticalmente en el centro del pozo. La fuerza hidráulica permite alimentar el agua por el fondo del pozo hacia arriba a través de la piedra caliza, fluidizando el lecho y el ácido disuelve las partículas de caliza generando alcalinidad, y formando flóculos de metal por hidrólisis y neutralización.

El flujo sale por la parte superior del pozo y los flóculos de metal suspendidos son precipitados en un estanque aguas abajo. El caudal tratado se reincorpora al flujo inicial.

APLICACIÓN

Tratamiento de agua a largo plazo en minas abandonadas o luego del cierre de una faena.

Tratamiento principalmente de efluentes ácidos (drenaje minero ácido), y también para aquellos efluentes con concentraciones bajas de hidróxidos de metales disueltos como el hierro o el aluminio.



Esquema de una *pozo de desviación de piedra caliza*
Fuente. Modificado de Cravotta, 2010.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- Muros rellenos - Cilindros rellenos - Arena de Caliza	Emergente	Precipitación química	Fisicoquímico		•	•		•			•						•	DMA DMAL

EFICIENCIA

Máximo pH alcanzable: 6 – 8

CONDICIONES OPERACIONALES

Acidez media: < 500 mg/L $CaCO_3$.

Carga de acidez: 1 – 1000 kg/d $CaCO_3$.

Caudal medio: < 1000 L/s.

Concentración de oxígeno: Ambiente.

Rango típico de pH: > 2.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Sistema económico y bajo nivel obra civil.
- Alta sostenibilidad.
- Se puede localizar a lo largo de una cuenca hidrográfica, por lo que puede abarcar extensas superficies.

Desventajas

- Si el cambio de elevación es inferior a 10 metros provoca bajas velocidades impidiendo la mezcla turbulenta.
- Alcalinidad insuficiente puede producir precipitados de metal y podría bloquear el pozo.
- Durante los períodos de flujo mayor, la tasa de generación de alcalinidad puede no ser adecuada para neutralizar la corriente a tratar.

RECOMENDACIONES

Se debe realizar un mantenimiento periódico para eliminar hojas, ramas o cualquier elemento que bloque el acceso del agua a los pozos.

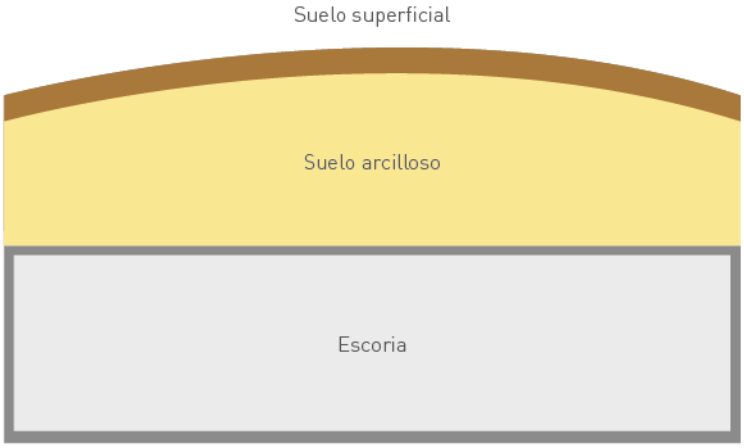
La piedra caliza debe ser alimentada en pequeñas cantidades por lo que se requiere de un llenado frecuente para asegurar el tratamiento continuo.

MÁS INFORMACIÓN

- Cravotta, C.A. III, 2010. Abandoned mine drainage in the Swatara Creek Basin, Southern Anthracite Coalfield, Pennsylvania, USA--2. Performance of passive-treatment systems: Mine Water and the Environment, v. 29, p. 200-216. (http://dx.doi.org/10.1007/s10230-010-0113-5).
- Environmental Stewardship Initiative (ESI) of the Canada Mining Innovation Council (CMIC), 2014. Pre-Feasibility Report of the ESI Closure Working Group.
- Skousen, J., 1997. Overview of passive systems for treating acid mine drainage. Green Lands, 27(4), 34-43.
- Taylor, J., Pape, S. and Murphy, N., 2005. A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD). Prepared for the Australian Centre for Minerals Extension and Research (ACMER), EARTH SYSTEMS PTY LTD, Australian Business Number 29 006 227 532.

9 Lecho de escoria lixiviante
(Slag leach beds)

OBJETIVOS	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Los *lechos de escoria lixiviante (SLB)* son sistemas similares a los drenes de caliza (Limestone drains), que consisten en estanques o celdas rellenas de escoria de acero con la finalidad de agregar grandes cantidades de alcalinidad al agua antes de mezclar con afluentes ácidos (drenaje minero ácido), mejorando la calidad de los drenajes de minas abandonadas.	En los *SLB*, una cama de finos de escoria de acero (<1/8 pulgada) se utiliza para tratar el agua que no contiene hierro, manganeso o aluminio. La escoria de acero tiene un potencial mucho mayor para la generación de la alcalinidad que otros generadores de alcalinidad. Son atractivas porque son fáciles de construir y reponer, llegando a eliminar entre 0,4 a 59 t/año de carga ácida a bajo costo.	Se utiliza para tratar drenajes mineros procedentes de minas abandonadas que no contienen hierro, manganeso o aluminio.



Esquema de un *lecho de escoria lixiviante*.
Fuente. Modificado de ITRC Mining Waste Team, 2014.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	No Convencional	Precipitación química	Fisicoquímico	•														DMA

EFICIENCIA

Generación máxima de alcalinidad: > 2000 L en afluentes sin hierro, manganeso o aluminio.
Remoción de acidez: entre 24,4 y 8,0 g/d/t.

CONDICIONES OPERACIONALES

Usando el mismo esquema para calcular el tiempo de residencia en los drenajes anóxicos de caliza:

Masa: 150 - 6250 t.

Tiempo residencia: 10 - 70 h.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Reutilizar residuos de la industria del acero.
- Baja mantención.
- Rápida aplicación.

Desventajas
- Altas cantidades de alcalinidad puede generar efluentes tóxicos en el ambiente.

RECOMENDACIONES

Los lugares donde se generan altos niveles de alcalinidad deben ser cuidadosamente estudiados, dado que el agua demasiado alcalina puede ser tóxica para la vida acuática.

El diseño se debe realizar caso a caso, dependiendo de la calidad del afluente a tratar y las condiciones del medio.

MÁS INFORMACIÓN

- Environmental Stewardship Initiative (ESI) of the Canada Mining Innovation Council (CMIC), 2014. Pre-Feasibility Report of the ESI Closure Working Group.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7.
- http://www.gardguide.com/
- Kruse, N. A., Mackey, A. L., Bowman, J. R., Brewster, K. and Riefler, R. G., 2012. Alkalinity production as an indicator of failure in steel slag leach beds treating acid mine drainage. Environmental earth sciences.
- Ziemkiewicz, P. F., Skousen, J. G., and Simmons, J., 2003. Long-term performance of passive acid mine drainage treatment systems. Mine Water and the Environment, 22(3), 118-129.

10 Cubiertas productoras de alcalinidad
(Alkalinity producing covers)

OBJETIVOS

Las *cubiertas productoras de alcalinidad* son diseñados para minimizar la carga ácida descargada desde los botaderos disminuyendo las tasas de infiltración.

La combinación estratégica de acondicionadores alcalinos, como la piedra caliza, dentro de los botaderos, también se utiliza para reducir al mínimo la carga ácida descargada.

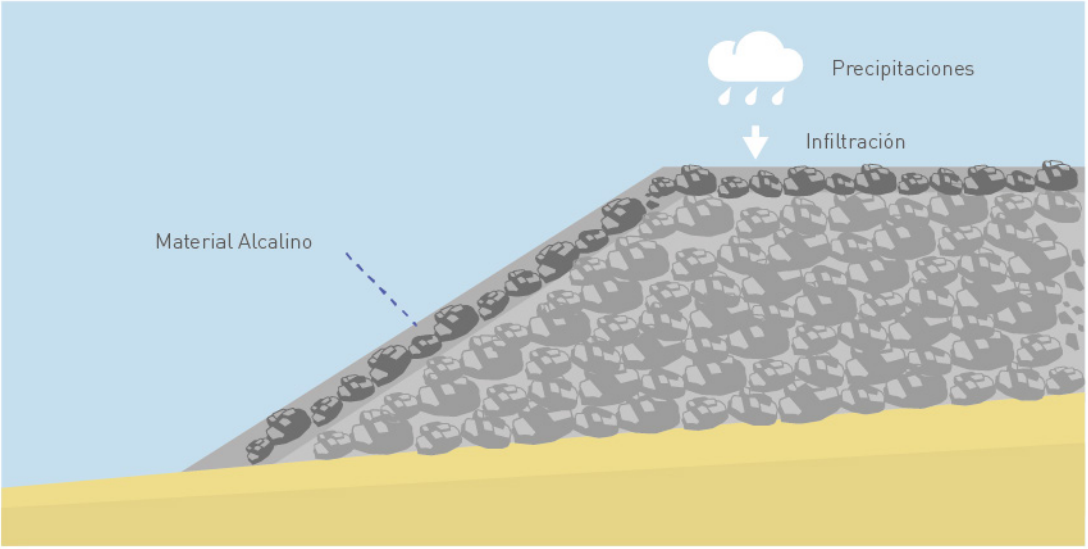
DESCRIPCIÓN

El mecanismo responsable de la mejora en la calidad del lixiviado se cree que es el revestimiento de las vías de flujo preferenciales con precipitados de neutralización, generados por la formación de alcalinidad cuando el agua de lluvia reacciona con la piedra caliza en la superficie de la pila.

Investigaciones han probado que la magnesita cáustica (MgO) puede ser modificada en la cinética de solubilidad y disolución para lograr liberaciones de alcalinidad eficientes, convirtiéndola en la candidata ideal para las cubiertas, siendo más costo-eficientes en bajas cantidades y frente a diferentes condiciones climáticas.

APLICACIÓN

Utilizados para la prevención de la generación de drenaje minero ácido desde botaderos, pudiéndose aplicar de forma proactiva a nuevos depósitos o de forma retroactiva a botaderos activos o en sitios mineros abandonados.



Esquema de una *cubierta productora de alcalinidad.*
Fuente. Modificado de GARD Guide (INAP, 2012).

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- CKD - $Mg(OH)_2$ - LKD - MgO - PCC - MgO Mejorada - FlyAsh	Emergente	Precipitación química	Fisicoquímico	•														DMA

EFICIENCIA

Concentraciones de alcalinidad como $CaCO_3$:

Para magnesita caústica: < 510 mg/L.
Para caliza: <10-15 mg/L.

pH alcanzado:

Para magnesita caústica: 9,0 - 9,5.
Para caliza: 8,0 – 8,5.

CONDICIONES OPERACIONALES

La cantidad de acondicionadores alcalinos se determina teniendo en cuenta las condiciones climáticas y la cantidad de agua lluvia, dependiendo de la cinética de solubilidad y disolución del material.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Minimizar costos y mejorar el rendimiento de la gestión de drenaje minero ácido en botaderos.
- Rápida, significativa y sostenible reducción de vertidos contaminantes desde botaderos en la mayoría de las condiciones climáticas.
- Ayuda en el retraso de las tasas de generación de hierro férrico soluble.
- Mejora la capacidad de retención de agua de algunos botaderos bloqueando totalmente algunas vías preferenciales.

Desventajas

- El uso de compuestos de cal quemados en las cubiertas son raramente rentables, por lo general de corta duración y tienen el potencial de generar picos de alcalinidad tóxicos.

RECOMENDACIONES

Usar esta tecnología en lugares donde la lluvia sea un factor importante en la generación de drenaje minero ácido.

MÁS INFORMACIÓN

- Environmental Stewardship Initiative (ESI) of the Canada Mining Innovation Council (CMIC), 2014. Pre-Feasibility Report of the ESI Closure Working Group.
- Taylor, J., Pape, S., and Murphy, N., 2005. A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD). Prepared for the Australian Centre for Minerals Extension and Research (ACMER), EARTH SYSTEMS PTY LTD, Australian Business Number 29 006 227 532.
- Taylor, J., Guthrie, B., Murphy, N., and Waters, J., 2006. Alkalinity producing cover materials for providing sustained improvement in water quality from waste rock piles. In Proceedings of the 7th international conference on acid rock drainage (ICARD), Mar (pp. 26-30)

11 Reactores SCOOFI
(SCOOFI reactors)

OBJETIVOS

En esencia, un *reactor SCOOFI* es un medio plástico poroso con una relación área de superficie muy alta.

Trabajan en el principio de que el agua aireada (oxigenada) fluye a través de las cavidades del medio poroso precipitando el hierro gradualmente sobre la superficie, que de manera constante resulta en una capa delgada de hidróxido férrico (ocre).

Una vez que el ocre ha recubierto el material poroso, la tasa de eliminación de hierro aumenta.

DESCRIPCIÓN

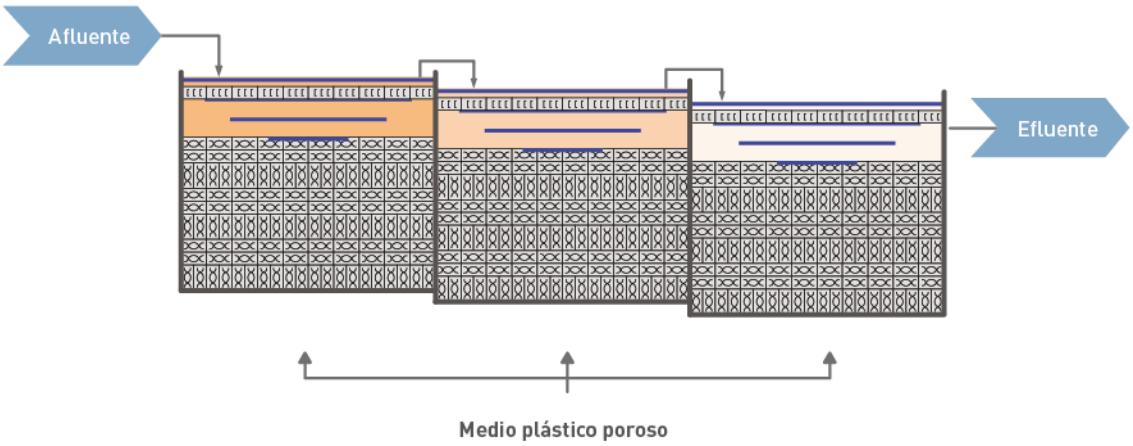
Es un sencillo proceso de dos pasos. En primer lugar, el hierro ferroso se elimina mediante adsorción sobre la superficie altamente polar de ocre fresco (depósito de hierro). Una vez adsorbidos los iones ferrosos, éstos son oxidados *in situ* por el oxígeno disuelto. Esta reacción es catalizada por la presencia de hidróxido férrico, creando una capa adicional en la superficie del ocre.

De esta manera la oxidación de hierro ferroso es mucho más rápida que la oxidación por el oxígeno disuelto en solución. Por lo tanto, en sitios estrechos, los sistemas que emplean *SCOFFI* ofrecen la opción de lograr un tratamiento pasivo sin humedales.

APLICACIÓN

El proceso S*COOFI* ocurre naturalmente en casi todas las descargas de drenaje minero, y será operativo siempre que se pueda ver el ocre, donde ocurrirá la acreción desde el lixiviado que fluye a gran velocidad, favoreciendo el posible poblamiento natural de coloides en suspensión.

Son adecuados para afluentes netamente alcalinos con concentraciones de hierro de menos de 50 mg/l, en lugares donde el espacio es limitado.



Esquema del medio plástico poroso de un *reactor SCOOFI*.
Fuente. Elaboración Propia

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- Reactores SCOOFI saturados - Reactores SCOOFI insaturados	Emergente	Precipitación química	Fisicoquímico			•												DMAL DMN

EFICIENCIA

Con concentraciones de hierro entre 2 – 5 mg/L, de manganeso entre 0,60 – 0,70 mg/L, y de sulfatos de 300 mg/L, las tasas de extracción de hierro son del orden de 80%.

En algunos sitios se ha logrado eliminar aproximadamente 50% de manganeso.

CONDICIONES OPERACIONALES

Se debe diseñar un sistema en que el lixiviado a tratar sea alimentado de forma constante. Los tiempos de retención son bajos (alrededor de los 10 a 20 min). Se prefiere diseñar estilos de cascadas para favorecer la oxigenación del afluente y los reactores deben estar alineados.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Costo eficiente.
- Menor espacio que otros sistemas pasivos biológicos.
- Baja mano de obra en operación y mantención.

Desventajas

- Posibilidad de rápida saturación, obligando a realizar una limpieza constante.

RECOMENDACIONES

Los *SCOOFI* de flujo saturado sólo son adecuados donde el drenaje minero ya está bien oxigenado, y para afluentes con concentración de hierro < 50 mg/L.

Los *SCOOFI* de flujo instaurado no tienen que estar precedidos de una instalación de ventilación, ya que por su naturaleza van a oxigenar el afluente. Sin embargo, tales reactores necesitan estar alineados verticalmente.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowden, L. I., Johnson, K. L., Jarvis, A. P., Robinson, H., Ghazireh, N., and Younger, P. L., 2006. The use of basic oxygen steel furnace slag (bos) as a high surface area media for the removal of iron from circum neutral mine waters. In Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). St. Louis, Missouri (pp. 25-30).
- Moorhouse, A. M., Wyatt, L. M., Watson, I. A., and Hill, S., 2013. A high surface area media treatment trial of a circum-neutral, net alkaline coal mine discharge in the South Derbyshire Coal Field (UK) using hydrous ferric oxide. "Reliable Mine Water Technology" IMWA 2013.
- PIRAMID Consortium, 2003. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK. 166pp.

5.2 Fichas de tratamientos activos

A continuación, en la Tabla 3, se presentan los 21 tratamientos activos que son detallados posteriormente en Fichas. Las consideraciones que se han tenido en la clasificación de cada tratamiento son las siguientes:

- **Tipo de tecnología en relación a su consideración en el mercado:** convencional, no convencional o emergente.
- **Tipo de tratamiento activo:** tratamiento de aireación, adsorción, extracción líquido-líquido, intercambio iónico, precipitación química, técnica de membrana o tratamiento biológico anaeróbico.
- **Fundamento de la tecnología:** proceso biológico, físico o fisicoquímico.
- **Levantamiento de los contaminantes abatidos más típicos:** acidez, sulfato, hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), aluminio (Al), plomo (Pb), plata (Ag), cromo (Cr), cadmio (Cd), níquel (Ni) y arsénico (As).
- **Tipo de drenaje minero (DM) a tratar:** ácido (DMA), neutro (DMN) o alcalino (DMAL).

Tabla 3. Listado de la fichas de Tecnologías de Tratamiento Activo.

NÚMERO	TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO ACTIVO	PÁGINA
1	Sistemas de aireación	82
2	Neutralización e hidrólisis	84
3	Precipitación de sulfuros	86
4	Precipitación fraccionada con extracción por solvente, oxidación o intercambio iónico	88
5	Precipitación de sales en agua en condiciones supercríticas	90
6	Precipitación química de sulfatos	92
7	Osmosis inversa	94
8	Ultrafiltración	96
9	Nanofiltración	98
10	Microfiltración	100
11	Electrofloculación	102
12	Electrocoagulación	104
13	Electroflotación	106
14	Electrodiálisis reversible	108
15	Intercambio iónico con resinas selectivas	110
16	Remoción biológica de sulfatos	112
17	Adsorción en carbón modificado con $ZnCl_2$	114
18	Adsorción en médula de fibra de coco	116
19	Adsorción en zeolitas modificadas (ZEOTREAT)	118
20	Cristalización	120
21	Extracción por solvente	122

1 Sistemas de aireación
(Aeration systems)

OBJETIVOS

La *aireación* es un componente del proceso de tratamiento activo de drenajes, utilizado para reducir la concentración de ciertos metales disueltos bajo condiciones geoquímicas específicas.

El tratamiento implica la introducción mecánica de oxígeno a la corriente de agua a tratar, con el objeto de incrementar la concentración de oxígeno disuelto, lo que promueve la oxidación de hierro.

Además de estas especies se promueve la oxidación de otros metales, aumentando la efectividad y eficiencia del tratamiento químico y disminuyendo los costos de operación.

DESCRIPCIÓN

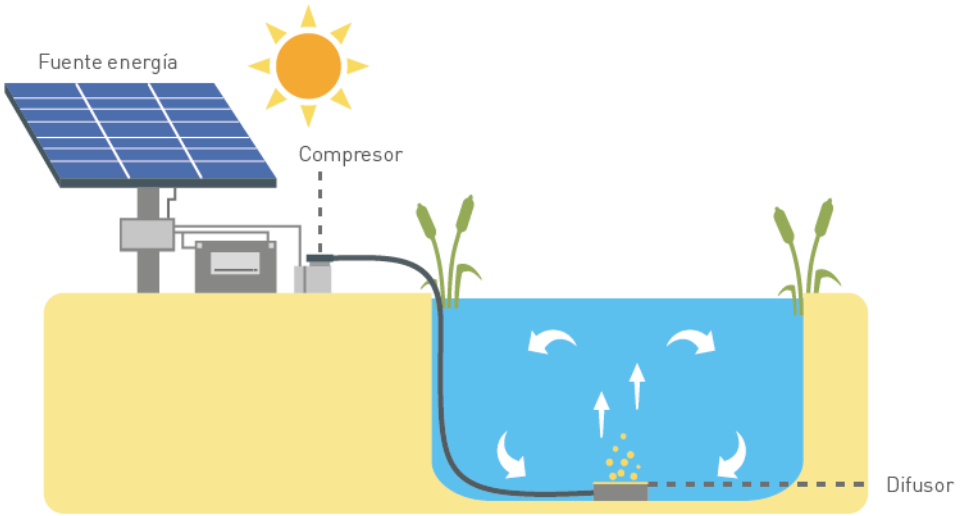
Consiste en la inyección mecánica de burbujas de oxígeno mediante bombas de chorro tipo Venturi, mezcladores mecánicos y/o difusores de membrana.

La aireación puede realizarse antes o después del tratamiento principal, utilizando la gravedad o dispositivos mecánicos de aireación y mezcla.

Esta tecnología se utiliza a menudo en conjunto con agentes neutralizantes de acidez (p.ej. cal, caliza, sosa cáustica, carbonato de sodio), oxidantes químicos (p. ej. ozono, hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio), floculantes, filtración y drenes de sedimentación.

APLICACIÓN

Descarga de drenaje minero ácido que contiene, además de altas concentraciones de metales disueltos, bajos niveles de oxígeno disuelto. Opera en una amplia variedad de condiciones de flujo y es usualmente utilizada en conjunto a otras tecnologías de tratamiento.



Sistema de aireación con alimentación energética solar.
Fuente. Modificado de Shenzhen Powered Optoelectronic Co., Ltd.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
Por gravedad Mecánica	Convencional	Aireación	Fisicoquímico			•												DMA DMAL

EFICIENCIA

Al ser una operación de tratamiento complementario, se determina la eficiencia de la *aireación* como la cantidad de oxigeno disuelto introducido al afluente.

Por ejemplo, para el tratamiento de corrientes con concentración de Fe^{2+} > 50 m/L, la cantidad a inyectar es de 10 mg/L (que es la máxima concentración de oxígeno en el agua).

CONDICIONES OPERACIONALES

Las condiciones operacionales dependerán del *sistema de aireación*. Si se trata de aireación por gravedad será el diseño de la cascada la que limite las variables operacionales dependiendo del caudal. Similarmente, para la aireación mecánica, dependerán de las características del soplador, el sistema de distribución y la agitación. Por ejemplo, para un sistema de inyección Venturi y agitador mecánico, sería necesario disponer de 20 psi de presión hidráulica para su funcionamiento. Sin embargo, se puede operar con menores requerimientos energéticos.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Simplicidad del proceso.
- Adaptable para un amplio rango de condiciones del sitio donde se implementará (sitios remotos, sitios mineros activos).
- Utiliza aire atmosférico como reactivo de tratamiento, evitando problemas de permisos, manipulación y eliminación de otros reactivos químicos.

Desventajas

- No aplicable para efluentes que contienen alto contenido de oxígeno disuelto, los que no se beneficiarían con la inyección de este gas.
- Se debe combinar con otras tecnologías.

RECOMENDACIONES

Normalmente el diseño de estos sistemas incluye un segundo soplador como respaldo y se debe construir un edificio insonorizado para minimizar el impacto de los altos decibeles emitidos por la maquinaria.

Sistemas en línea que utilicen bombas de chorro Venturi pueden ser una alternativa costo eficiente del sistema, entrando el agua y el agente neutralizante al mismo tiempo por el mismo orificio de la bomba de chorro, lo que aumenta la eficiencia operativa.

MÁS INFORMACIÓN

- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- Johnson, D. B., and Hallberg, K. B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the total environment, 338(1), 3-14.

2 Neutralización e hidrólisis
(Neutralization and hydrolysis)

OBJETIVOS

El tratamiento de la acidez en drenajes mineros ácidos mediante *neutralización e hidrólisis*, se ha utilizado durante años para elevar el pH y precipitar metales presentes en estos drenajes, permitiendo la obtención de lodos con alta densidad, lo que favorece su disposición en espacios reducidos.

Los materiales neutralizantes forman compuestos insolubles en medios acuosos, precipitándolos hasta el punto de solubilidad de cada compuesto. El precipitado principal es yeso.

Se utilizan diferentes agentes de neutralización, destacando la caliza, la cal hidratada, carbonato de sodio, escoria del acero, hidróxido de sodio, carbonato de sodio, entre otros.

DESCRIPCIÓN

Los equipos utilizados en un tratamiento de *neutralización e hidrólisis* son principalmente, un estanque de mezcla agitada y aireación (mecánica o difusión), seguido de un decantador para separar las fases acuosa y sólida.

Para obtener un lodo con mayor grado de sequedad se pueden utilizar filtros (por ejemplo, prensa, anilla o filtros banda) para deshidratar.

APLICACIÓN

La tecnología es ampliamente aplicada a variados rubros, siendo la minería uno de los principales, considerando el tratamiento de drenajes mineros ácidos.

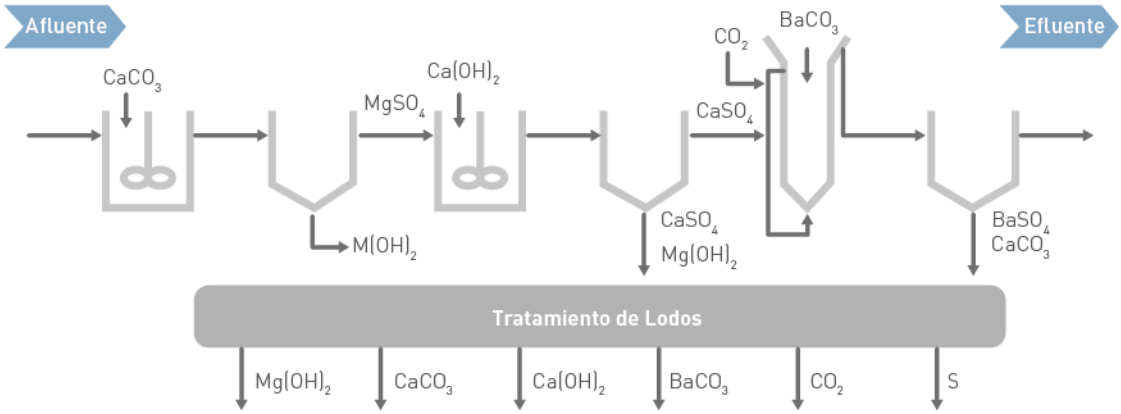


Diagrama de un *proceso de neutralización*.
Fuente. Modificado de Rukuni *et al.*, 2012.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- Con Cal - Con Caliza	Convencional	Precipitación química	Fisicoquímico	• •	• •	•				• •	•				•	•	•	DMA

EFICIENCIA

Es posible bajar la concentración de sulfato hasta 1000 mg/L, mostrando una eficiencia moderada de remoción.

La eficiencia del tratamiento radica en la relación tamaño de partícula y liberación de alcalinidad, la cual debe ser estudiada en cada caso

CONDICIONES OPERACIONALES

La selección del material alcalino depende de varios factores como el caudal a tratar, junto con la acidez y carga de metales en el afluente.

Se deben considerar los impactos secundarios asociados al uso de una especie alcalina específica y la generación de residuos en el afluente tratado, tales como la presencia de amoníaco y el aumento de la salinidad.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Necesita poco monitoreo.
- Remueve metales trazas.
- Uso en capa suprayacente puede proporcionar fuente de alcalinidad a largo plazo.

Desventajas
- Produce lodos.
- Remoción limitada de sulfato.
- Eficacia depende de la infiltración de agua que lleve la alcalinidad hacia los residuos subyacentes.
- Los costos pueden aumentar por la necesidad de mezcla mecánica y la disposición final del desecho alcalino.

RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de esta técnica de tratamiento cuando el lixiviante posee gran variedad de compuestos o parámetros a remover.

Sin embargo, es importante mencionar que la remoción de sulfato no es muy apreciable, sólo logra disminuirlo a 1000 mg/L. Se recomienda la recirculación de los insumos para abaratar costos de operación.

MÁS INFORMACIÓN

- INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- MEND - Mine Environment Neutral Drainage, 2000. Mend manual volume 5 – treatment mend 5.4.2e.
- Taylor, J. and Waters, J., 2003. Treating ARD – how, when, where and why. Min Environ Manag, 11, 6-9.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

3 Precipitación de sulfuros
(Sulphide precipitation)

OBJETIVOS

El principio básico es similar a la precipitación de hidróxido, convirtiendo los compuestos metálicos solubles en compuestos de sulfuro relativamente insolubles a través de la adición de agentes de precipitación tales como sulfuro de sodio, hidrosulfuro de sodio, sulfuro ferroso o sulfuro de calcio.

En un amplio rango de pH, los sulfuros son extremadamente reactivos con iones de metales pesados. La reacción de precipitación es generalmente inducida bajo condiciones casi neutras (pH 7 a 9).

Los *precipitados de sulfuro* y metales deben ser removidos físicamente de la solución, a través de tecnologías de coagulación, floculación, clarificación o filtración, produciendo un lodo del metal precipitado en forma de sulfuro.

DESCRIPCIÓN

Existen diferentes tecnologías para inducir la *precipitación*, como la que utiliza gas sulfuro de hidrógeno producido biogénicamente para recuperar o eliminar metales disueltos del agua de forma selectiva y/o la tecnología que utiliza sulfuro químico para recuperar o eliminar selectivamente los metales disueltos en el agua.

En una primera etapa, consiste principalmente en una neutralización, floculación o coagulación seguida de un decantador primario o filtración.

Luego, el afluente ingresa a un reactor cerrado donde se produce la *precipitación de sulfuros*. Para finalizar, se utiliza un decantador secundario o filtros para separar los precipitados y el sobrenadante.

APLICACIÓN

La *precipitación de sulfuros* trabaja en un amplio rango de pH, donde los sulfuros son extremadamente reactivos con iones metálicos pesados pudiéndose eliminar plomo, cobre, cromo (IV), plata, cadmio, zinc, mercurio, níquel, talio, antimonio y vanadio presentes en afluentes con estas especies.

Utilizada principalmente en la industria energética, petróleo y gas y en minería:

- Flujos de aguas subterráneas y superficiales.
- Drenaje minero ácido.
- Drenaje minero alcalino.
- Corrientes de purga metalúrgicas.
- Efluentes de plantas de cal.
- Tratamiento de relaves.
- Minería del oro por proceso SART.

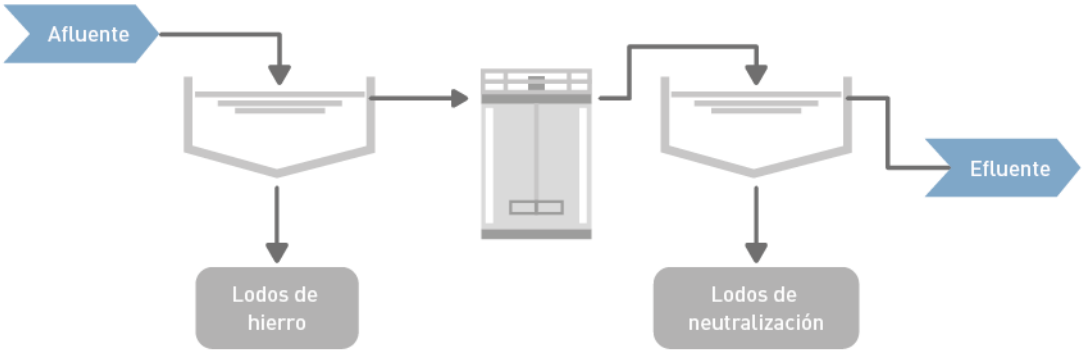


Diagrama del proceso de *precipitación de sulfuros*.
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- BioSulphide® - ChemSulphide®	Convencional	Precipitación química	Fisicoquímico						•	•				•	•	•		DMA DMAL

EFICIENCIA

La eficiencia del proceso depende de factores como el tipo y la concentración de metales presentes en la matriz, así como también del flujo, pH, temperaturas, entre otros.

Algunas experiencias realizadas con esta tecnología informan una eficiencia de recuperación de metales >99% debido a la baja solubilidad de los sulfuros metálicos en la planta recuperadora de cobre en Bisbee, Arizona.

CONDICIONES OPERACIONALES

Nutrientes y donadores de electrones son directamente dependientes de la concentración de entrada de la matriz a tratar.

Condiciones de presión y temperatura del reactor:

Temperatura: 20 – 35 ºC

Presión: 30 cm H_2O

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Mecanismo de remoción más eficiente que la neutralización.
- Cumple con normas estrictas de calidad del agua.
- Requiere de bajos tiempos de retención hidráulica.
- Generación de reducido volumen de lodos.
- Generación de productos de metal de alto grado comercial adecuado para su refinación.

Desventajas
- Mayor complejidad de tratamiento, resultan en mayor costo de operación.
- Potencial emisión de gases como sulfuro de hidrógeno.
- Generación de productos sulfurados tóxicos.

RECOMENDACIONES

Utilizar métodos adecuados y coherentes de medición de eliminación. Existen varias técnicas disponibles para realizar un seguimiento en una gama completa de tamaños, que tienen en cuenta la no idealidad de la mezcla para realizar el modelado del proceso.

Realizar una caracterización química compleja y tener en cuenta las múltiples especies de sulfuros e interacciones metálicas.

MÁS INFORMACIÓN

- Bhattacharyya, D. and Chen, L. F., 1986. Sulphide precipitation of Nickel and other heavy metals from single- and multi-metal systems. EPA/600/S2-86/051.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- Lawrence, R. W., Kratochvil, D. and Ramey, D., 2005. "A new commercial metal recovery technology utilizing on-site biological H2S production." Proceedings–Hydro Copper (2005): 23-25.
- Lewis, A. E., 2010. Review of metal sulphide precipitation. Hydrometallurgy, 104(2), 222-234.
- MEND - Mine Environment Neutral Drainage, 2000. Mend manual volume 5 – treatment mend 5.4.2e.
- Robinson, A. K. and Sum, J. C., 1980. Sulphide precipitation of heavy metals. EPA-600/2-80-139.

4 Precipitación fraccionada + extracción por solvente, oxidación o intercambio iónico

(Fractional precipitation + solvent extraction, oxidation or ion exchange)

OBJETIVOS

Es un proceso que combina diferentes operaciones unitarias integradas con el objetivo de separar secuencialmente el sulfato de calcio dihidratado de otras impurezas obteniendo un subproducto de valor comercial y minimizando la generación de residuo.

El proceso implica la adición de reactivos químicos tras lo cual se procede a separar los sólidos precipitados del efluente tratado mediante procesos convencionales como clarificación, filtración, lagunas de sedimentación, etc.

DESCRIPCIÓN

El afluente contaminado ingresa a un reactor de mezcla completa donde se adiciona cal para precipitar sulfato de calcio dihidratado hasta alcanzar un pH determinado.

Al sobrenadante se le aplica según la matriz a tratar una etapa de extracción por solvente, oxidación o intercambio iónico.

Finalmente el sobrenadante libre de cationes se somete a una segunda precipitación con cal hasta reducir la concentración de sulfato, la que puede ser inducida por la adición de algún reactivo alcalino, sulfuro, coagulante u otra especie que se una con los iones metálicos disueltos.

APLICACIÓN

Proceso que se compone de tecnologías convencionales que se utilizan para tratar afluentes en faenas mineras, incluyendo el drenaje minero ácido, el drenaje minero neutro y/o que presenten una matriz compleja.

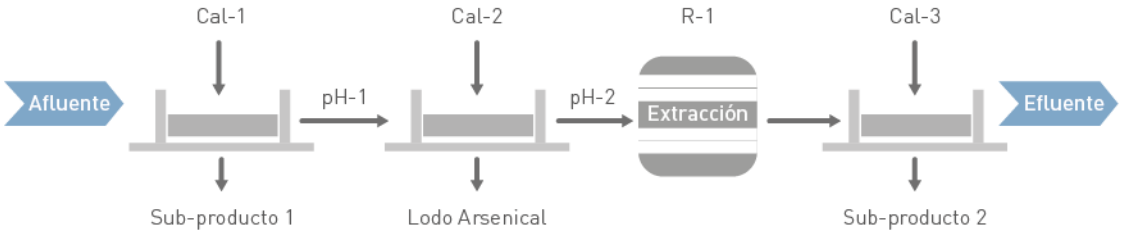


Diagrama de *precipitación fraccionada y extracción por solvente* (proceso MILAF® Fundación Chile).
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Precipitación química	Fisicoquímico		•	•			•		•						•	DMA DMAL

EFICIENCIA

El rendimiento y los resultados obtenidos varían de acuerdo a las condiciones en que se implemente esta tecnología, dependiendo de la calidad inicial del agua a tratar, además de las limitaciones propias del sitio donde se emplazará el sistema de recuperación. Algunas experiencias informan resultados de un 90% de remoción de sulfato.

CONDICIONES OPERACIONALES

Actividades previas necesarias son la preoxidación del metal o metales.

En caso de que el pH sea cercano a 3 se inicia el proceso con extracción selectiva de metales.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Ofrece resultados permanentes para la eliminación de contaminante metálicos.
- Resultados inmediatos en la reducción de contaminantes hacia receptores superficiales.
- Eficiente para alcanzar limites de descarga apropiados para la salud pública y del medio ambiente.
- Fácil de implementar y controlar.

Desventajas

- Costos elevados debido a los reactivos requeridos para su implementación.
- Requiere de operación y mantenimiento especializado.
- Genera productos de desecho que deben ser gestionados.

RECOMENDACIONES

Requiere de estudios de factibilidad técnica. Dentro de este marco, la elección del tipo de tratamiento de precipitación que se utilizará dependerá de la caracterización física y química del sitio, para asegurar que se utilice la tecnología adecuada y se cumplan las regulaciones establecidas para la descarga de este tipo de contaminantes.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulphate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- Broschek, U., Vidal, C., Bravo, L., and Zuñiga, G., 2009. MILAF: Integral Management of arsenical sludge, treatment and recovery of by-products of acid waters from smelter plants. International Mine Water Association IMWA.
- Proyecto MILAF: Desarrollo de una Tecnología Innovadora para el Manejo Integral de Lodos Arsenicales, Tratamiento y Valorización de Residuos de Efluentes Ácidos de Fundiciones, 2007. INNOVA CHILE. Corfo.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

5 Precipitación de sales en agua en condiciones supercríticas

(Salts precipitation by super critical water)

OBJETIVOS

La oxidación en condiciones supercríticas ocurre en el agua que se encuentra sobre la temperatura y presión críticas (374 °C y 221 bar). En estas condiciones, el agua tiene baja constante dieléctrica, baja solubilidad y muy pequeña constante de disociación, lo que se traduce en baja solubilidad de algunas sales.

Se adiciona una corriente líquida presurizada que se encuentra a una temperatura más baja que la condición supercrítica a una corriente coaxial que lleva agua en condiciones supercríticas.

La corriente, al entrar en contacto con el reactor, se calienta produciendo una precipitación violenta debido a que el agua pasa rápidamente a estado gaseoso.

DESCRIPCIÓN

El proceso consiste en alcanzar las condiciones supercríticas del agua mediante un compresor e intercambiador de calor para aumentar la presión y la temperatura.

La corriente ingresa al reactor de precipitación donde precipitan las sales, las que pueden ser retiradas periódicamente desde el fondo del reactor o mediante una etapa adicional de separación. Esto, con tecnologías convencionales (decantador, filtros, etc.) o mediante un reactor tubular horizontal donde se enfría el efluente hasta una temperatura que permite la separación de las fases gas y líquido.

La solución líquida será la salmuera que contiene las sales concentradas que se retiran del sistema.

APLICACIÓN

Aún está en etapa de diseño de parámetros de operación, y potencialmente se podría aplicar a matrices mineras.

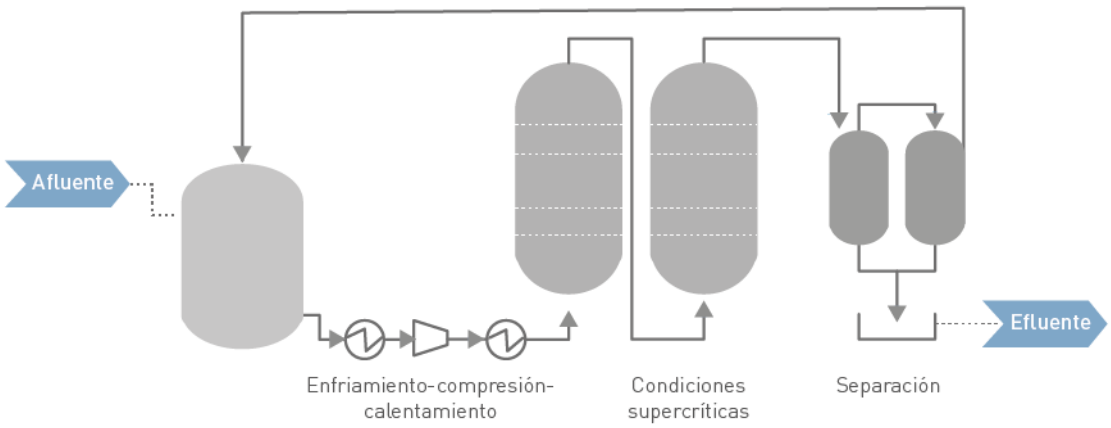


Diagrama de *precipitación de sales en agua en condiciones supercríticas*.
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Tratamiento biológico	Físico		•													DMN

EFICIENCIA

En estudios a escala laboratorio se informan como flujo de entrada al sistema 600 mg/L de sulfatos y como efluente menos de 10 mg/L de sulfatos.

CONDICIONES OPERACIONALES

La eficiencia depende de la temperatura. Mientras más elevada sea ésta, mayor es la formación de precipitado.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas

- Alcanza bajos niveles de sulfato.
- Se puede reciclar el sulfuro de bario (BaS).
- Remueve metales trazas.

Desventajas

- Produce lodos.
- Remueve pequeñas cantidades de metales traza.
- Requiere alto monitoreo por los gases formados en el proceso (ácido sulfhídrico).
- No hay implementaciones a escala industrial.
- Requiere personal altamente capacitado para su operación.

RECOMENDACIONES

Se requiere más estudios a nivel piloto y con matrices más complejas para poder evaluar de mejor forma la tecnología. Sin embargo, el hecho de no agregar químicos al medio hace interesante su revisión.

MÁS INFORMACIÓN

- Armellini, F. J., and Teste, J. W., 1991. Experimental methods for studying salt nucleation and growth from supercritical water. The Journal of Supercritical Fluids, 4(4), 254-264.
- Martinto, O. E. P., and Alonso, M. J. C., 2001. Oxidación en agua supercrítica (OASC): aplicación a la eliminación de aguas residuales industriales. In El agua, un bien para todos: conservación, recuperación y usos: 6ª Jornadas Ambientales (pp. 265-280). Ediciones Universidad de Salamanca.

6 Precipitación química de sulfatos
(Chemical precipitation of sulphates)

OBJETIVOS

El proceso implica la adición de reactivos químicos tras lo cual se procede a separar los sólidos precipitados del afluente.

Se usan reacciones de precipitación en etapas sucesivas, incluyendo la adición de cal, sulfato de calcio e hidróxido de aluminio.

Se usan como agentes precipitantes $Ba(OH)_2$, $BaCO_3$, BaS, siendo el hidróxido y el sulfuro las sales más eficientes en todo rango de pH.

DESCRIPCIÓN

El proceso consiste en alcanzar las condiciones supercríticas del agua mediante un compresor e intercambiador de calor para aumentar la presión y la temperatura.

La corriente ingresa al reactor de precipitación donde precipitan las sales, las que pueden ser retiradas periódicamente desde el fondo del reactor o mediante una etapa adicional de separación. Esto, con tecnologías convencionales (decantador, filtros, etc.) o mediante un reactor tubular horizontal donde se enfría el efluente hasta una temperatura que permite la separación de las fases gas y líquido.

La solución líquida será la salmuera que contiene las sales concentradas que se retiran del sistema.

APLICACIÓN

Aún está en etapa de diseño de parámetros de operación, y potencialmente se podría aplicar a matrices mineras.

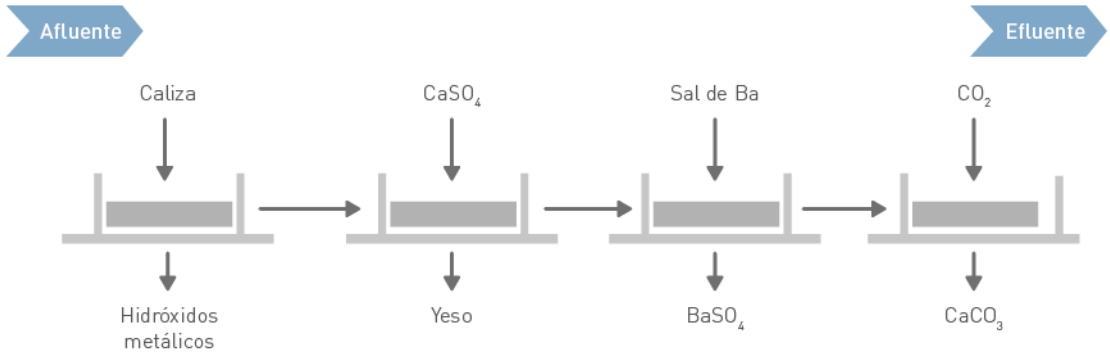


Diagrama de *precipitación química de sulfatos*.
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- Sal de Bario - Etringita: SAVMIN™ and CESR	Convencional	Precipitación química	Fisicoquímico		• •	•		•										DMA DMAL

EFICIENCIA

Su aplicación ha demostrado ser altamente eficiente en mejorar la calidad de drenajes mineros ácidos, además de reducir y/o eliminar la migración de contaminantes metálicos hacia acuíferos aguas abajo. Algunas experiencias mencionan eficiencias de remoción de sulfato entre el 80 - 99% (usando dosis máxima de reactivos).

CONDICIONES OPERACIONALES

Al ser un proceso de neutralización e hidrólisis utilizando compuestos alcalinos específicos, las condiciones operacionales se verán determinadas por la especiación química del afluente y la carga contaminante.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Elevada eficiencia.
- Se puede reciclar los reactivos.
- Remueve metales trazas.
- Fácil implementación y control

Desventajas
- Produce lodos.
- Requiere alto monitoreo por los gases formados en el proceso (ácido sulfhídrico).
- Encarecimiento de los costos debido a los reactivos requeridos para su implementación.

RECOMENDACIONES

Debido al costo y toxicidad medio ambiental del bario, se recomienda tener una planta recuperadora para reciclar lodos formados durante la remoción.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulfate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- Dill, S., Cowan, J., Wood, A. and Bowell, R. J., 1998. A review of sulfate removal options from mine waters. IMWA Proceedings 1998 | © International Mine Water Association 2012.
- INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- Mintek, SA., SAVMIN Process , 2014. http://www.mintek.co.za/wp-content/uploads/2014/10/SAVMIN-Process.pdf

7 Osmosis inversa
(Reverse osmosis systems - Membrane treatment)

OBJETIVOS

La *Osmosis Inversa (OI)* es un tratamiento de membrana en el que el agua se desmineraliza al ser inyectada a altas presiones sobre un conjunto de membranas semipermeables con tamaño de poros de 0,00005 µm.

El proceso se basa en el potencial hidráulico generado entre dos líquidos de diferente concentración de sales cuando se sitúan a cada lado de la membrana semipermeable.

Aumentando convenientemente la presión en el lado del agua con mayor concentración de sales, se puede hacer pasar el agua al compartimiento menos salino, separando los iones y partículas.

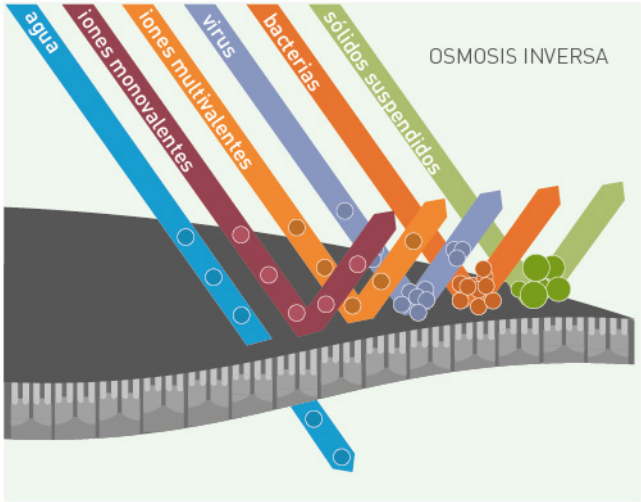
DESCRIPCIÓN

El proceso SPARRO es una mejora del tratamiento, protegiendo la superficie de la membrana. Para ello, se adicionan cristales de yeso antes de la *OI*, logrando que se precipiten gran parte de sólidos de calcio, sulfato y silicatos, que provocan escalamiento o ensuciamiento de la membrana. Así, la membrana logra elevar la eficiencia del tratamiento obteniendo mayores caudales de afluente tratado y menores volúmenes de rechazo. Estos sistemas generalmente cuentan con etapas de pretratamiento para eliminar sólidos suspendidos de gran tamaño, precipitación de metales y regulación de pH para proteger las membranas. El rechazo o salmuera generado puede ser dispuesto o pasar por una etapa de deshidratación. El sobrenadante puede pasar por una etapa simple de estabilización mediante un álcali.

APLICACIÓN

Este tratamiento tiene aplicación en la eliminación de impurezas iónicas tales como: nitratos, fosfatos, sulfatos, iones metálicos, coloides, compuestos orgánicos y también de microorganismos.

Utilizado en la potabilización de agua, producción de agua para riego, como pretratamiento para intercambio iónico, abastecimiento de aguas para usos industriales, tratamiento de efluentes industriales para el control de la contaminación y/o recuperación de compuestos valiosos reutilizables.



Esquema de un tratamiento de membrana por *Osmosis Inversa*.
Fuente. Modificado de Synder Filtration Inc, 2015.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
SPARRO	Convencional	Técnicas de membrana	Físico		•	•	•	•						•	•	•	•	DMA DMAL

EFICIENCIA

Porcentaje de remoción: 98% de remoción de las sales, y 100% de virus y bacterias.

Remueven la dureza, acompañada de una reducción parcial y simultánea del sodio.

CONDICIONES OPERACIONALES

Tipo de Operación Continua. Tratamiento No Selectivo. Necesita de pretratamiento (Filtración).

Caudal de operación: > 200 L/s*

(*) El caudal máximo de operación no tiene limitaciones ya que éste es definido en el diseño.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Operación continua y poco espacio para sus instalaciones (plantas modulares).
- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el afluente.

Desventajas
- El afluente de alimentación requiere de un pretratamiento.
- Los compuestos orgánicos que son inmiscibles pueden afectar el funcionamiento de las membranas.
- Algas y bacterias causan taponamiento de las membranas.
- Los aceites y grasas pueden afectar la capacidad de las membranas.
- Genera un rechazo de sales.

RECOMENDACIONES

Generalmente se utiliza para generar efluentes ultrapuros y para remover contaminantes específicos. Muy eficientes para afluentes con bajo contenido de elementos.

Es primordial para aumentar la vida útil de las membranas contar con un sistema de tratamiento previo para remoción de sólidos suspendidos y ajuste de pH.

No se recomienda el uso de esta técnica como tratamiento primario.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulphate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7.
- http://www.gardguide.com/
- MEND - Mine Environment Neutral Drainage, 2000. Mend manual volume 5 – treatment mend 5.4.2e.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

8 Ultrafiltración
(Ultrafiltration - Membrane treatment)

OBJETIVOS

La *ultrafiltración (UF)* es un tratamiento de membrana que opera gracias a una diferencia de presión como fuerza impulsora, logrando separar partículas que se encuentran en el rango entre 0,001 µm a 0,05 µm.

Los solventes y solutos de bajo peso molecular pasarán a través de la membrana, quedando retenidas las grandes moléculas.

La *UF* es capaz de concentrar sólidos suspendidos, bacterias, algunas proteínas, algunos colorantes y compuestos, con un peso molecular mayor a 150,000 Dalton.

DESCRIPCIÓN

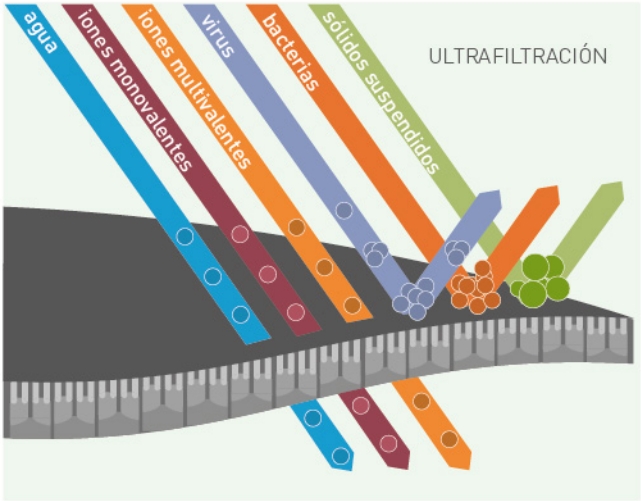
La *membranas de ultrafiltración* están dispuestas en forma de capilares y están construidas con materiales porosos semipermeables confeccionados a partir de polímeros hidrofílicos, tales como polisulfona, poliacrilonitrilo, polietersulfonas, etc. Estos equipos operan a presiones más bajas que las membranas de Osmosis Inversa y Nanofiltración, generalmente a 10 bar.

Estos sistemas generalmente cuentan con etapas de pre-tratamiento para eliminar sólidos suspendidos de gran tamaño, precipitación de metales y regulación de pH para proteger las membranas. El rechazo o salmuera generado puede ser dispuesto directamente o puede pasar por una etapa de deshidratación mediante centrifugas, decantadores o filtros. El sobrenadante puede pasar por una etapa simple de estabilización mediante un álcali.

APLICACIÓN

Su versatilidad le otorga una gran gama de aplicabilidad en el tratamiento y acondicionamiento de afluentes en la industria. Como la industria del metal (separación de emulsiones agua/aceite, tratamiento de pinturas), la industria textil, minería y tratamiento de drenajes.

También se puede aplicar como operación de pretratamiento.



Esquema de un tratamiento de membrana por *Ultrafiltración*.
Fuente. Modificado de Synder Filtration Inc., 2015.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Técnicas de membrana	Físico		•	•	•											DMA DMAL

EFICIENCIA

Porcentaje de remoción: 90% en remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y agentes patógenos.

85% de la demanda química de oxígeno.

CONDICIONES OPERACIONALES

Estos polímeros presentan una notable estabilidad térmica, resistencia a condiciones extremas de pH (entre 1 y 13), buena resistencia a agentes oxidantes y capacidad de ser configurada en diferentes geometrías.

Buena resistencia al cloro (50-200 mg/L) según tiempo de exposición.

Presión: 5 - 20 Bar.
Flujo: 10 – 100 L/m^2/h.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Presenta ahorros de energía ya que puede funcionar a baja presión.
- Menor rechazo que la OI.
- Uso reducido de reactivos químicos.

Desventajas
- Poco eficientes cuando la carga de contaminantes es elevada.
- A pequeñas escalas puede resultar más cara que a mayores escalas (economía de escalas).

RECOMENDACIONES

Se emplean en etapas de pretratamiento y se caracterizan por ser muy sensibles a la suciedad.

Se recomienda para el tratamiento de afluentes con carga media/baja de contaminantes.

MÁS INFORMACIÓN

- Dill, S., Cowan, J., Wood, A., and Bowell, R. J., 1998. A review of sulphate removal options from mine waters. IMWA Proceedings 1998 | © International Mine Water Association 2012.
- Mortazavi, S., 2008. Application of Laboratories Membrane Separation Technology to Mitigation of Mine Effluent and Acidic Drainage. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

9 Nanofiltración
(Nanofiltration - Membrane treatment)

OBJETIVOS

Al igual que la Osmosis Inversa, el mecanismo de transferencia de masa en *Nanofiltración (NF)* es la difusión. Aunque es en general muy similar en términos de química de membranas, la *membrana de nanofiltración* permite la difusión de ciertas soluciones iónicas (predominantemente iones monovalentes), así como agua.

Los tipos iónicos más grandes, incluyendo los iones divalentes y multivalentes y las moléculas más complejas son altamente retenidas

DESCRIPCIÓN

Las *membranas de NF* están fabricadas a base de difluoruro de polivinilideno (PVDF, por sus siglas en inglés). Otro tipo son las membranas de policarbonatos o "thin-film composite" (TFC, por sus siglas en inglés).

El mecanismo de separación es la filtración, que según los distintos tipos de membrana y equipos, se realiza por flujo cruzado o flujo sin salida. Estos sistemas generalmente cuentan con etapas de pretratamiento para eliminar sólidos suspendidos de gran tamaño, precipitación de metales y regulación de pH para proteger las membranas.

El rechazo o salmuera generado puede ser dispuesto directamente o puede pasar por una etapa de deshidratación mediante centrifugas, decantadores o filtros.

APLICACIÓN

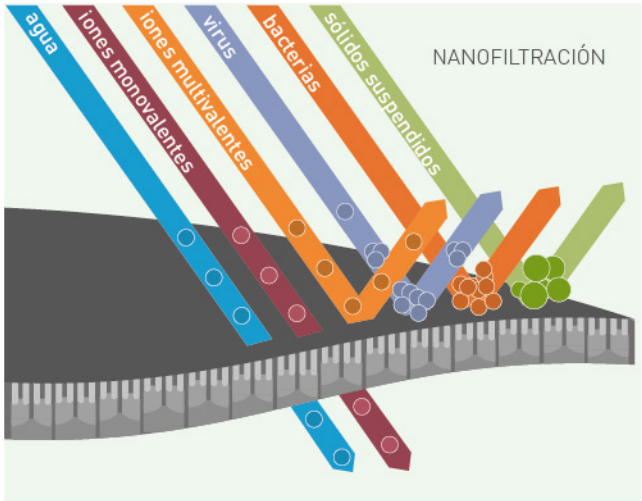
En pasos de purificación de agua potable, tales como ablandamiento del agua, decoloración y eliminación de micro-contaminantes.

En la eliminación de pesticidas de las aguas subterráneas.

En la eliminación de metales pesados de las aguas residuales.

Reciclaje de aguas residuales.

Eliminación de nitratos.



Esquema de un tratamiento de membrana por *Nanofiltración*.
Fuente. Modificado de Synder Filtration Inc., 2015.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Técnicas de membrana	Físico		•	•	•									•	•	DMA DMAL

EFICIENCIA

Porcentaje de remoción: 95% de los iones bivalentes, y 40% - 60% de iones monovalentes.

CONDICIONES OPERACIONALES

Las membranas orgánicas presentan una resistencia adecuada a 2<pH<11 en la mayoría de los casos; sin embargo, su resistencia a la temperatura es, hasta el momento, inferior a los 100 ºC.

Estas membranas son sensibles a los solventes orgánicos y a algunas moléculas como los surfactantes.

Presión: 10 - 100 Bar.

Flujo: 5 - 100 L/m^2/h.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Alta eficiencia.
- Sistema compacto y de fácil operación.
- Genera afluentes de alta calidad y menor rechazo que la Osmosis Inversa.
- Puede tratar grandes volúmenes de agua
- Bajos costos de operación.
- Suelen ensuciarse menos que las membranas de Osmosis Inversa.

Desventajas
- El mantenimiento puede ser de alto costo si se necesita reemplazar la membrana.
- El reemplazo de membranas debe ser realizado por personal especializado. Requiere de pretratamiento, dependiendo del caso.

RECOMENDACIONES

Es conveniente caracterizar el afluente a tratar para determinar de forma exacta qué tipo (o modelo) de membrana es la necesaria para el proceso. Antes del módulo de *nanofiltración* es importante determinar el pretratamiento más adecuado en función de las características del afluente a tratar, con el fin de garantizar la máxima continuidad del funcionamiento de la planta.

MÁS INFORMACIÓN

- Dill, S., Cowan, J., Wood, A., and Bowell, R. J., 1998. A review of sulphate removal options from mine waters. IMWA Proceedings 1998 | © International Mine Water Association 2012.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7.
- http://www.gardguide.com/
- Mortazavi, S., 2008. Application of Laboratories Membrane Separation Technology to Mitigation of Mine Effluent and Acidic Drainage. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

10 Microfiltración
(Microfiltration - Membrane treatment)

OBJETIVOS

El principio de la *Microfiltración (MF)* se basa en la separación física.

Es el tamaño de poro de la membrana lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. Las membranas usadas para la *MF* tienen un tamaño de poro de 0,1 – 10 µm.

Las sustancias que son más pequeñas que los poros de la membrana son retenidas parcialmente, dependiendo de la construcción de una capa de rechazo en la membrana.

DESCRIPCIÓN

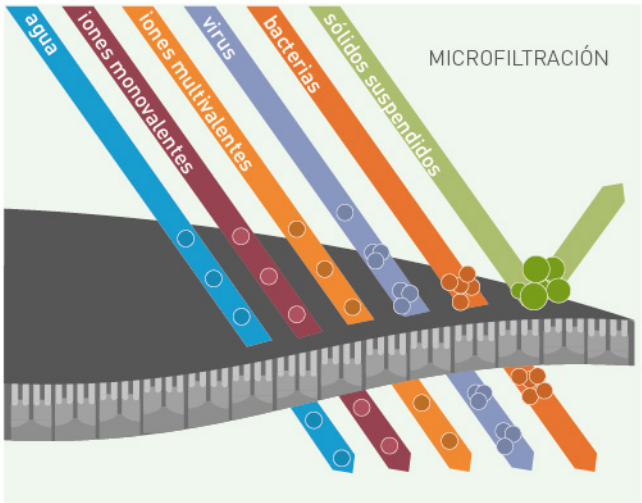
La *MF* llena el vacío entre la Ultrafiltración y filtración con medios granulares. Estas membranas pueden funcionar tanto en separación de flujo cruzado o filtración sin salida (o extremo muerto). En el modo flujo cruzado, sólo una parte de la corriente de alimentación se hace pasar por la membrana y luego se mezcla con el resto del agua sin tratar. En cambio en el modo de extremo muerto, toda el agua de alimentación es tratada. Generalmente cuentan con etapas de pretratamiento de precipitación de metales y regulación de pH para proteger las membranas. El rechazo o salmuera generado puede pasar por una etapa de deshidratación mediante centrífugas, decantadores o filtros. El sobrenadante puede pasar por una etapa simple de estabilización mediante un álcali.

APLICACIÓN

La *MF* puede ser aplicada a muchos tipos diferentes de tratamientos de agua cuando se necesita retirar de un líquido las partículas de un diámetro superior a 0,1 mm.

Algunos ejemplos de aplicaciones de la *MF* son:

- Separación de bacterias del agua (tratamiento biológico de aguas residuales).
- Tratamiento de afluentes.
- Separación de emulsiones de agua y aceite.
- Pretratamiento del agua para Nanofiltración y Osmosis Inversa.



Esquema de un tratamiento de membrana por *Microfiltración*.
Fuente. Modificado de Synder Filtration Inc., 2015.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Técnicas de membrana	Físico		•	•												DMA DMAL

EFICIENCIA

Porcentaje de remoción: 90% en remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y agentes patógenos.

85% de la demanda química de oxígeno.

CONDICIONES OPERACIONALES

Presión: 1-10 Bar.

Flujo: 10-200 L/m^2/h .

Temperatura: 2-45°C.

Es de operación continua y requiere de un pretratamiento.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Puede tratar grandes volúmenes de agua.
- Alta eficiencia y bajos consumos energéticos.
- Uso reducido de reactivos químicos, incluso disminuye el consumo posterior de cloro en la etapa de desinfección.
- Tamaños pequeños para las plantas de tratamiento.

Desventajas
- Genera rechazos (lavado de la membrana) según el agua tratada, que deben disponerse o tratarse.
- Poco eficientes para el tratamiento de afluentes con elevado contenido de elementos.
- A pequeñas escalas puede resultar más cara que a mayores escalas (economía de escalas).

RECOMENDACIONES

Es necesario el control regular de rendimiento de la membrana para garantizar que el sistema está operando en el régimen eficaz de carga y lavado.

Es necesario controlar la turbidez del filtrado para dar una indicación aproximada de la integridad de la membrana, realizando pruebas de caída de presión.

MÁS INFORMACIÓN

- Mortazavi, S., 2008. Application of Laboratories Membrane Separation Technology to Mitigation of Mine Effluent and Acidic Drainage. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program.
- Pall Corporation, 2012. Tratamiento de Aguas en la Industria Minera, Tecnologías de Separación y Filtración para Tratamiento de Aguas en Minería.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

11 Electrofloculación
(Electroflocculation)

OBJETIVOS

El proceso de *electrofloculación* consiste en la formación de flóculos mediante la aplicación de una corriente eléctrica.

DESCRIPCIÓN

La *electrofloculación* consiste en una celda con electrodos de hierro y aluminio. Los electrodos reciben alimentación eléctrica con una corriente de fuerte amperaje y débil voltaje.

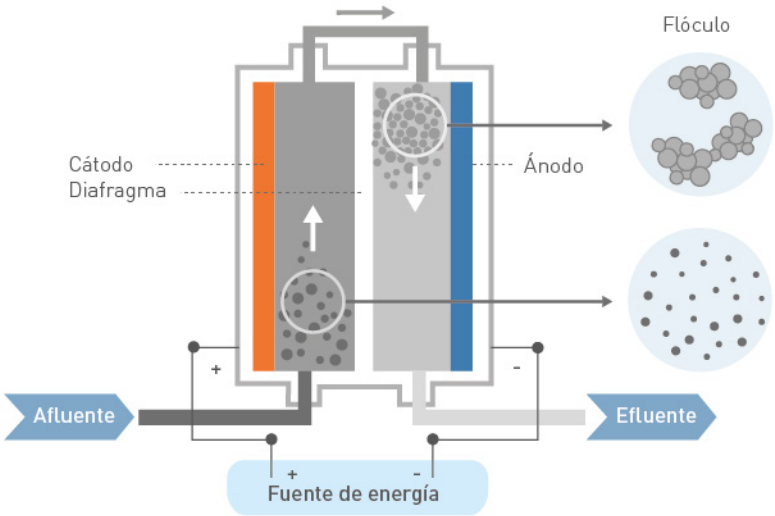
Un agitador se encarga de garantizar la optimización del tratamiento en la cuba de trabajo.

El hierro y el aluminio se transforman en cationes, formando flóculos sólidos e insolubles de hidróxidos metálicos con los iones hidróxidos del agua.

APLICACIÓN

La tecnología de *electrofloculación* puede ser aplicada en:

- Industria química.
- Industria textil.
- Tratamiento de afluentes con colorantes, cargados de cola, tintas, emulsiones de grafito.



Esquema del proceso de *Electrofloculación*.
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes												Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Electroquímica	Fisicoquímico			•												DMA DMAL

EFICIENCIA

Porcentaje de remoción: 99 % eliminación de metales.

Se reducen los enlaces orgánicos.

CONDICIONES OPERACIONALES

La distancia entre los electrodos es una variable de diseño importante cuando se trata de la optimización de los costos de operación, los cuales son dependientes del consumo de energía, que se puede expresar como P = U x I. Donde P es la potencia (W), U es el voltaje (V) e I es la corriente (A).

Para reducir el consumo de energía sin cambiar la corriente y el grado de separación, se puede reducir la resistencia en el afluente. Reducir la distancia entre los electrodos o aumentar la conductividad del afluente, reducirá el consumo de energía sin cambiar el grado de separación.

La Ley de Ohm indica que el consumo de energía disminuirá a medida que la distancia entre los electrodos se reduce y la conductividad del afluente aumenta.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Grandes caudales de tratamiento.
- Independiente de las variaciones de concentración en el afluente.
- No necesita de productos químicos.

Desventajas
- Los electrodos deben ser cambiados regularmente para asegurar el buen funcionamiento.
- Gran consumo de energía si el sistema no está bien diseñado.

RECOMENDACIONES

La *electrofloculación* es muy adecuada para tratar los afluentes difíciles. Este proceso permite tratar grandes caudales con bajos costos de funcionamiento y sin la utilización de productos químicos, con excepción de mantener un pH cercano a 7.

MÁS INFORMACIÓN

- Kore, J. P., and Syversen, U., 1995. State of-the-art electroflocculation. Filtration and Separation 32.2, 153-146.
- Sasson, M. B., Calmano, W., and Adin, A., 2009. Iron-oxidation processes in a electroflocculation (electrocoagulation) cell. Journal of hazardous materials, 171(1), 704-709

12 Electrocoagulación
(Electrocoagulation)

OBJETIVOS

El proceso de la coagulación, consiste en desestabilizar las fuerzas de enlace de los coloides presentes en el agua. Estas fuerzas de enlaces no permiten que los coloides se aglomeren o se junten, impidiendo con esto la sedimentación. Esta desestabilización se produce por la acción química de un producto químico cuyo objetivo es aportar una energía superior a las fuerzas de enlaces coloidales de manera que se produzca su rompimiento.

En la *electrocoagulación (EC)*, la desestabilización es producida mediante la aplicación de corriente eléctrica, desestimando el uso de productos químicos coagulantes.

DESCRIPCIÓN

El reactor utilizado para realizar la *EC* en una operación por batch está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectados a una fuente de energía externa. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.

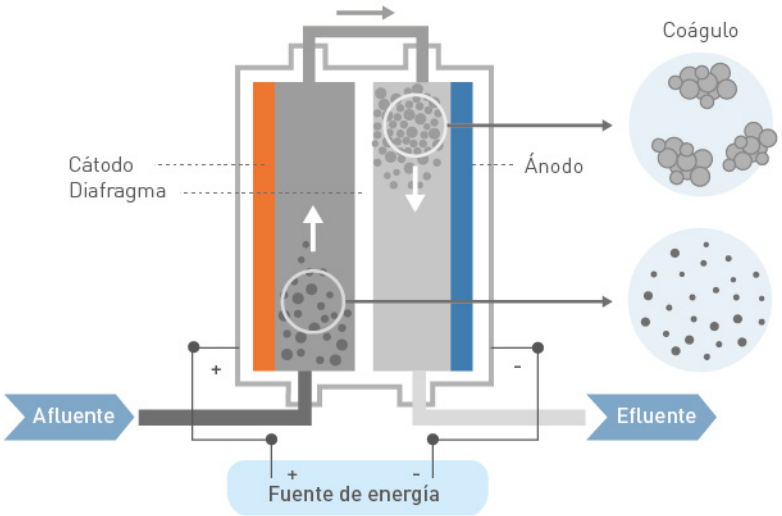
Los iones negativos provienen del ánodo y se solubilizan en el medio. Estos iones cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado se forman agregados contaminantes iniciando así el proceso de coagulación. El concentrado puede pasar por una etapa de filtración y/o deshidratación para obtener un lodo manejable para disposición.

APLICACIÓN

La tecnología de *EC* puede ser aplicada para la limpieza de aguas residuales que contengan emulsiones oleosas, coloideos y/o iones metálicos.

En procesos de depuración de afluentes residuales con el objeto de reutilizar las aguas limpias en el propio proceso productivo. Puede ser aplicada en diversos sectores industriales: industria minera, alimentación, textil, papel, química, tratamiento y revestimiento de metales

También aplicada para depurar el lixiviado de los vertederos y diversas matrices (curtiembre, galvanoplastía, etc.).



Esquema del proceso de *Electrocoagulación*.
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Electroquímica	Fisicoquímico			•	•											DMA DMAL

EFICIENCIA

Porcentaje de remoción: 90% de remoción en contaminantes de iones metálicos, residuos de grasa, tientes textiles, nitratos, fenoles, arsénico.

Sin embargo, el pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar oxihidróxidos.

CONDICIONES OPERACIONALES

El suministro de corriente al sistema determina la cantidad de iones de aluminio y/o hierro, liberado por los respectivos electrodos. El aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante.

El pH óptimo para mejor remoción es 5.0.

Las temperaturas superiores al ambiente benefician la cinética en todos los pasos del proceso del electrodo, incrementando el coeficiente de difusión y el cambio de densidad de corriente.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Elimina partículas coloidales pequeñas.
- Requiere equipamiento sencillo y fácil de usar.
- No requiere el insumos químicos.
- Tecnología modular.
- Permite re-uso del efluente tratado.

Desventajas
- Reemplazo frecuente de electrodos.
- Deben ajustarse los parámetros caso a caso.
- Oxidación en ánodo puede formar capa que disminuye la corriente eléctrica de paso.
- Generación de lodos.

RECOMENDACIONES

Es una tecnología flexible, fácil de implementar y sus costos pueden ser similares a las técnicas de precipitación química. Sin embargo, debido a lo complejo del proceso, debe siempre realizarse un estudio a nivel piloto para encontrar los parámetros de operación óptimos.

Se recomienda que, para un proceso de *EC* normal, se mantengan cantidades de iones Cl^- alrededor del 20%.

MÁS INFORMACIÓN

- Department of water affairs, Republic of South Africa, 2013. Feasibility study for a long-term solution to address the acid mine drainage associated with the east, central and west rand underground mining basins options for the sustainable management and use of residue products from the treatment of AMD.
- Taylor, J., and Waters, J., 2003. Treating ARD – how, when, where and why. Min Environ Manag, 11, 6-9.

13 Electroflotación
(Electroflotation)

OBJETIVOS

El proceso de *electroflotación* (*EF*) es un proceso simple por el cual los contaminantes flotan en la superficie del agua cuando pequeñas burbujas de aire (hidrógeno y oxígeno) son absorbidas en su superficie.

Las burbujas son generadas respectivamente en el cátodo y en el ánodo. Mientras más pequeñas sean las burbujas, mayor será la superficie de contacto en la capa exterior de la partícula.

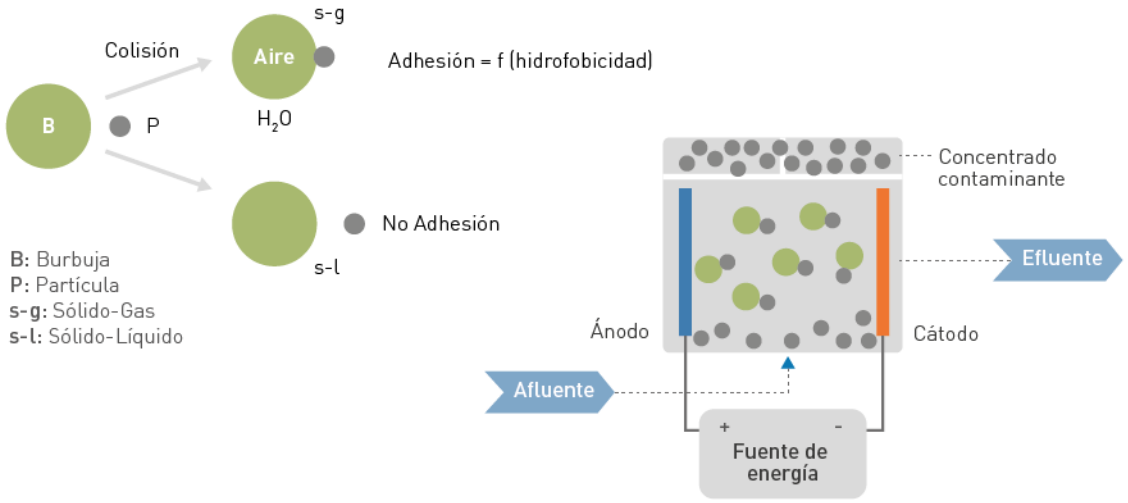
DESCRIPCIÓN

La tecnología de *EF* corresponde a una celda electrolítica en la que se hace pasar la solución a tratar, luego de una eventual corrección de pH. En este punto se aplica la oportuna tensión al sistema de electrodos compuesto de cátodos de un material inerte (titanio), y ánodos de hierro o de aleación de aluminio.

La diferencia de voltaje genera las burbujas que se fijarán a las superficies de las partículas a eliminar. El concentrado puede pasar por una etapa de filtración y/o deshidratación para obtener un lodo manejable para disposición.

APLICACIÓN

La tecnología puede ser aplicada en: agroindustria, efluentes mineros, efluentes con altos contenidos de metales, aceites y grasas.



Principio básico del proceso de *Electroflotación*.
Fuente. Modificada de Codelco Educa.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Electroquímica	Fisicoquímico		•	•	•											DMA DMAL

EFICIENCIA

La eficiencia del proceso de flotación está fundamentalmente determinada por el tamaño de las burbujas generadas.

Porcentajes de remoción:
Aproximadamente 90 % demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO).
95% Aceites emulsionados y grasas saturadas.
95% Eliminación de metales pesados.
95% Eliminación de sulfuros, nitritos y cianuros.

Decoloración total del agua.

CONDICIONES OPERACIONALES

La tasa de flotación depende de varios parámetros, tales como la tensión superficial entre el agua, partículas y burbujas de gas, el diámetro de la burbuja de gas, tiempo de residencia del agua en la célula electrolítica y el tanque de flotación, la temperatura, pH y la distribución de tamaño de partícula.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- No requiere de insumos químicos para producir burbujas.
- Genera burbujas muy finas, aumentando la eficiencia de la flotación.

Desventajas
- Se requiere de un ajuste previo del pH entre 5-8.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que el diseño sea caso a caso y realizado por un experto.

Realizar una caracterización fisicoquímica de afluente a tratar para ajustar el pH de entrada.

MÁS INFORMACIÓN

- Gao, P., Chen, X., Shen, F., and Chen, G., 2005. Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. Separation and Purification Technology, 43(2), 117-123.
- Poon, C. P., 1997. Electroflotation for groundwater decontamination. Journal of Hazardous Materials, 55(1), 159-170.

14 Electrodiálisis reversible
(Reversed electrodialysis)

OBJETIVOS

La electrodiálisis es un proceso que consiste en someter un agua cargada con sales a la acción de un campo eléctrico generado por dos electrodos, entre los que se aplica una diferencia de potencial de tipo continuo, provocando la migración de los iones hacia los polos.

Se colocan una serie de membranas con selectividades aniónica y catiónica para separar los iones que contiene el agua y concentrarlas en una solución para su posterior eliminación.

DESCRIPCIÓN

Los procesos de separación basados en la *electrodiálisis reversible* utilizan membranas donde se han incorporado grupos con cargas eléctricas, con el fin de restringir el paso de los iones presentes en una solución acuosa. En estos procesos la "fuerza impulsora" responsable del flujo de los iones, a través de la membrana, es una diferencia de potencial eléctrico.

Los equipos de *electrodiálisis reversible* están formados por un conjunto de membranas dispuestas en forma alterna y separadas por espaciadores o placas, en una configuración semejante a los filtros prensa (configuración de placas y bastidores). Los espaciadores provocan turbulencias que evitan las deposiciones de materiales en la superficie de las membranas y homogenizan la concentración.

APLICACIÓN

Aplicable para la recuperación y reutilización de concentrados aniónicos y/o catiónicos, en los siguientes sectores industriales:

- Industria alimentaria.
- Industria gráfica.
- Industria química.
- Industria no-metálica.
- Industria de metales.
- Industria textil.

Las aplicaciones potenciales más importantes de la *electrodiálisis reversible* son:

- Desalación del agua salobre y agua marina.
- Concentración de agua marina.
- Recuperación de metales y aguas de lavado de electrodeposición.
- Desalación de purga de agua de fibra y refrigeración.
- Recuperación de ácidos y bases de efluentes ácidos usados.

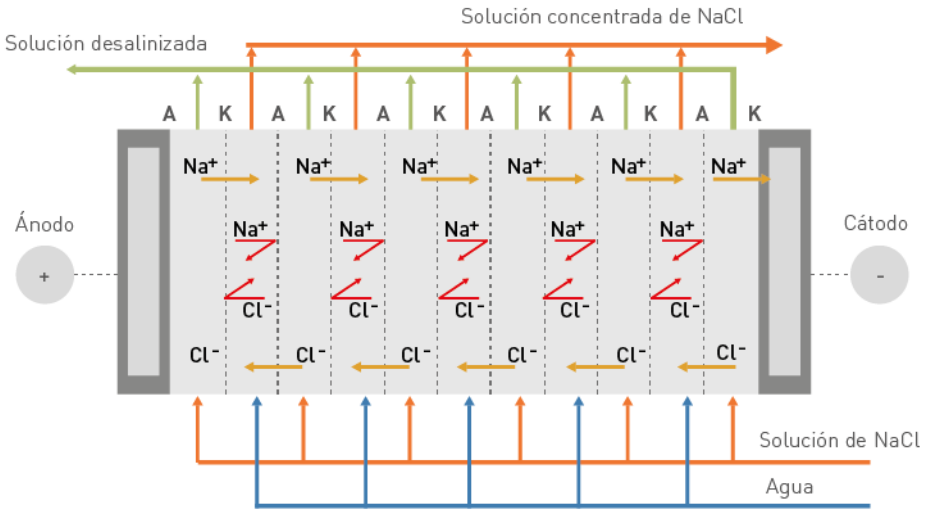


Diagrama de un proceso de *electrodiálisis reversible*.
Fuente. Modificado de U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Convencional	Técnicas de membrana	Físico		•	•	•							•	•	•		DMA DMAL

EFICIENCIA

Porcentaje de remoción: sobre el 90% en iones cargados eléctricamente.

CONDICIONES OPERACIONALES

Requiere de una filtración previa y pretratamiento.

Apta para todo rango de temperatura.

No requiere de reactivos.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- No requiere de insumos químicos.
- Operación simple.
- Sistema modular y escalable.
- Proceso automático con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento.
- Puede utilizar diferentes fuentes de energía eléctrica (combustibles fósiles, solar o eólica).

Desventajas
- Requiere gran cantidad de energía.
- Necesita purificación previa.
- No se puede usar para afluentes de dureza superior a 1ppm.

RECOMENDACIONES

Se recomienda su utilización en instalaciones donde se requiera obtener agua ultra purificada.

Por lo general la tecnología es una unidad dentro de un sistema de tratamiento.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulphate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- Dill, S., Cowan, J., Wood, A. and Bowell, R. J., 1998. A review of sulphate removal options from mine waters. IMWA Proceedings 1998 | © International Mine Water Association 2012.
- INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.
- U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. http://www.netl.doe.gov/research/coal/crosscutting/pwmis/tech-desc/membrane

15 Intercambio iónico con resinas selectivas
(Selective ion exchange resins)

OBJETIVOS

Tecnología basada en el uso de materiales de intercambio específicos capaces de separar y concentrar contaminantes presentes en aguas residuales.

Los diferentes tipos de resinas resultan en afinidades variables para una gran gama de iones metálicos. Por lo tanto, deben ser seleccionadas en base a las necesidades de la química del agua y los metales específicos a eliminar.

DESCRIPCIÓN

El afluente a tratar es bombeado a un flujo continuo a través de columnas rellenas con la *resina de intercambio iónico*, donde los contaminantes son retenidos. Al saturarse la columna (mínimo intercambio) se inicia el proceso de regeneración.

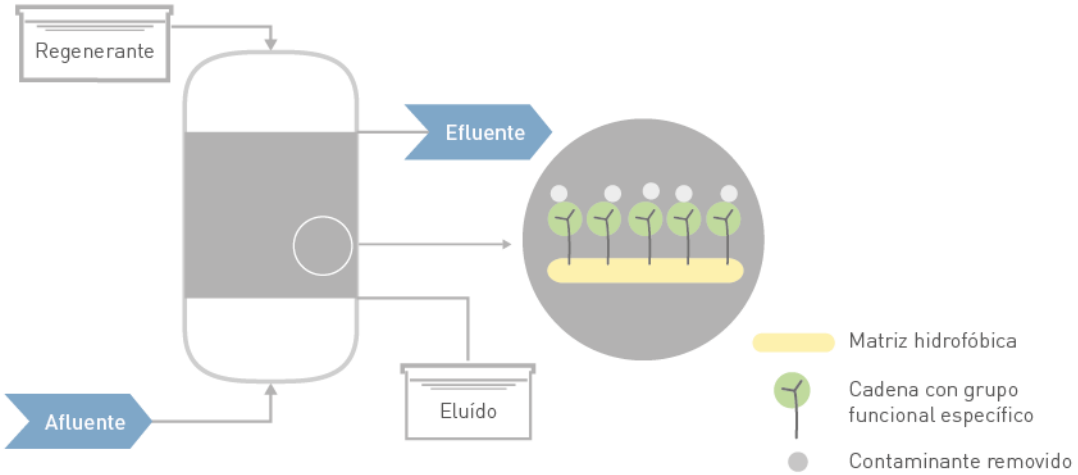
Además de acondicionar y tratar los afluentes es posible recuperar valores metálicos.

La planta de tratamiento es diseñada de acuerdo a las características del agua y requerimientos en cada caso.

APLICACIÓN

Las principales aplicaciones de la tecnología y parámetros removidos en cada caso son las siguientes:

- Recuperación de valores metálicos.
- Drenaje minero.
- Tratamiento de aguas claras y aguas de filtro.
- Agroindustria.
- Potabilizadoras.
- Acuicultura.
- Depuración de agua.
- Depuración final de los tratamientos de afluentes agroindustriales y aguas servidas, entre otros.



Esquema del principio del intercambio iónico con *resinas selectivas*.
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
Proceso GYPCIX Zeolitas	Convencional	Intercambio iónico	Fisicoquímico			•	•		•	•							•	DMA DMAL

EFICIENCIA

La tecnología de intercambio iónico es altamente selectiva y capaz de remover la totalidad del analito, sobre el 99,9%.

El inconveniente para su uso para remover sulfato es la rápida colmatación de las columnas dadas las altas concentraciones de sulfato que se requieren reducir.

CONDICIONES OPERACIONALES

Temperatura ambiente: 2 - 40°C.

Caudal de operación: 1 a 20000 m^3/día.

Vida útil: puede ser 5 años considerando procesos de lavado.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Es una tecnología altamente costo-eficiente.
- Es de operación simple.
- Utiliza espacios pequeños.
- La regeneración del material aumenta su vida útil.
- No genera lodos y produce bajos volúmenes de rechazo.
- Posibilidad de aplicación en una gran variedad de matrices.

Desventajas
- Consumo de reactivos químicos.
- Genera eluídos que deben ser dispuestos o tratados.
- Requiere pretratamiento en efluentes con alta carga de sólidos suspendidos totales (SST).

RECOMENDACIONES

Al ser una tecnología altamente selectiva permite la extracción de valores desde los afluentes. Asimismo, es aplicable a una amplia gama de afluentes industriales tanto en bajas como altas concentraciones.

Sin embargo, el uso de esta tecnología para la remoción de altas concentraciones de sulfato no es recomendable.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulphate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- MEND - Mine Environment Neutral Drainage, 2000. Mend manual volume 5 – treatment mend 5.4.2e.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

16 Remoción biológica de sulfatos
(Biological removal of sulphates)

OBJETIVOS

La reducción de sulfato usando bacterias sulfato reductoras, es un proceso donde se usa la capacidad metabólica de estos microorganismos, para llevar el azufre desde su estado oxidado (SO_4^{2-}, +6) hasta su estado reducido (S_2^-, -2). El sulfato es incorporado hacia el interior de las células, y es usado como aceptor final de electrones en su respiración, reduciéndose hasta sulfuro, que es eliminado como producto metabólico final.

Por otro lado, el bicarbonato también promueve la eliminación de estos metales en la forma de carbonatos, bajo condiciones adecuadas de pH y concentración de bicarbonato.

DESCRIPCIÓN

Los sistemas de tratamiento de *remoción biológica* utilizan microorganismos para transformar los contaminantes y aumentar el pH del efluente. Para ello se usan reactores bioquímicos que operan en condiciones anaeróbicas.

Básicamente existen dos tipos de reactores: el de tanque agitado y el de lecho fijo. En el primero, la agitación permite una mezcla homogénea entre el afluente y los microorganismos. En el segundo, los microorganismos se adhieren al soporte formando un biofilm, aumentando la concentración de bacterias al interior del reactor.

Estos sistemas tienen un pre- tratamiento mediante neutralización para separar sólidos suspendidos y regular el pH, luego se adiciona nutrientes antes de entrar al reactor, finalizando con una separación final mediante decantación.

APLICACIÓN

La tecnología es aplicable a empresas que generen residuos líquidos con sulfato. Por ejemplo, la industria papelera, minera, industrias de fermentaciones, de alimentos o procesos industriales de alimentos marinos.

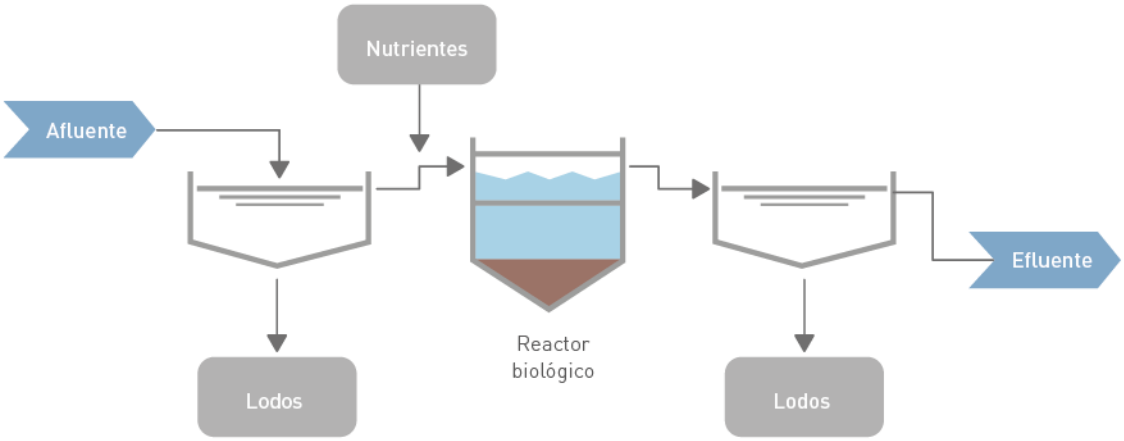


Diagrama de flujo de *remoción biológica de sulfatos*.
Fuente. Modificado de INAP, 2012.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
- Precipitación "biológica" de sulfuros - THIOPAQ - Biosulfuro	Convencional No convencional Convencional	Tratamiento biológico anaeróbico	Biológico	•	•													DMA

EFICIENCIA

Los sistemas bien diseñados aumentan el pH ácido de los afluentes con sulfuro o metales, llevándola a valores neutros y disminuyendo la concentración de metales en más del 90%.

CONDICIONES OPERACIONALES

pH del afluente a tratar: 5-9 (dependiendo de las bacterias sulfato reductoras y de los metales a tratar).

Concentración de alimentación:
7-9 mg/L SO_4.

Profundidad: 90-120 cm, pudiendo ser más profundos (180-240 cm).

Tasa máxima de carga de metales en forma de sulfuros:
0,3 mol/m^3/d.

Tasa de reducción de sulfatos:
12-30 g/L/día.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Versátil para el tratamiento de grandes caudales en un espacio reducido.
- Sencilla operación y mantenimiento.
- Permite obtener subproductos de valor comercial.

Desventajas
- Climas con periodos de frío largos, pueden resultar en una reducción del rendimiento (baja actividad microbiana).
- Variaciones en la concentración de entrada puede disminuir la tasa de actividad microbiana.
- En algunos casos se puede observar taponamientos de los sistemas o la formación de vías preferenciales.
- Se producen lodos.
- El sulfuro producido es tóxico y corrosivo.

RECOMENDACIONES

Es importante considerar que al tratar afluentes de baja carga, para lograr una eficiencia alta, se requiere incrementar el tiempo de residencia del biorreactor.

El *sistema biológico de remoción* de sulfatos, generalmente es operado en un sistema global que permite la remoción conjunta de sulfato, y de los sulfuros generados.

MÁS INFORMACIÓN

- Bowell, R. J., 2004. A review of sulphate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.
- INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.
- INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), Chapter 7. http://www.gardguide.com/
- Johnson, D. B., and Hallberg, K. B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the total environment, 338(1), 3-14.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

17 Adsorción en carbón modificado con $ZnCl_2$

(Biological removal of sulphates)

OBJETIVOS

Esta tecnología se basa en un material adsorbente generado a partir de residuos de coco mezclados con carbón y tratados con cloruro de zinc ($ZnCl_2$). Este filtro de carbón modificado es capaz de remover sulfato del agua por medio de adsorción. Las materias que hay que filtrar se adhieren a la superficie de los gránulos del material adsorbente.

Este material es eficiente ya que su gran porosidad hace aumentar la superficie de contacto con el agua.

DESCRIPCIÓN

La aplicación de *carbón modificado* constituye un tratamiento terciario y tiene por propósito obtener una calidad de efluente mejor que la conseguida en los tratamientos primarios y secundarios convencionales.

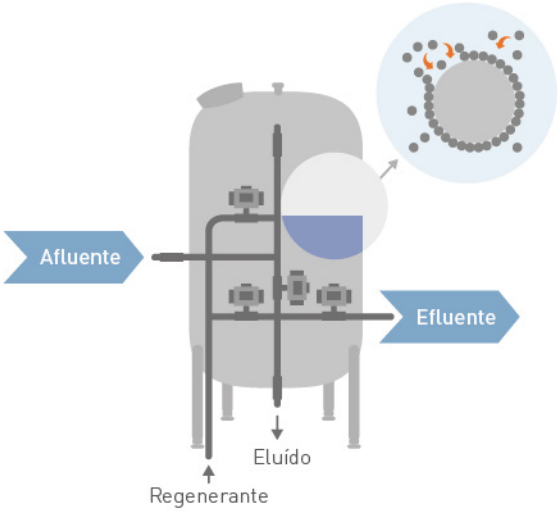
Su aplicación se realiza en lechos empacados, tipo columnas, cargados con gránulos del material adsorbente y se bombea el afluente a través del filtro empacado.

Cuando la superficie disponible del *carbón activado* se carga de contaminantes, se dice que el carbón está agotado. Este carbón agotado debe reemplazarse o limpiarse para permitir que el filtro se reutilice.

APLICACIÓN

Aplicación a remoción de sulfato desde diferentes tipos de efluentes, entre los que destacan:

- Tratamiento terciario de aguas residuales y tratamiento de aguas servidas.
- Tratamiento de agua en procesos industriales, como por ejemplo en la industria química, industria alimentaria y farmacéutica.
- Potabilización de aguas.
- Tratamiento de drenaje minero ácido.



Carbón modificado

Columna de *adsorción y pellets de carbón modificado*.
Fuente. Elaboración Propia.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Emergente	Adsorción	Fisicoquímico		•													DMA DMAL

EFICIENCIA

La tecnología de adsorción usando este material adsorbente es eficiente en remover sólidos suspendidos totales (SST) alcanzando remociones del orden de 95-99%.

En el caso de sulfato la eficiencia es medida de acuerdo a la capacidad de captación la que es 4,9 mg/g para adsorción de sulfato.

CONDICIONES OPERACIONALES

Temperatura ambiente: 2 – 40°C.

Caudal de operación: 1 a 20000 m^3/día.

Vidal útil carbón activado: 5 años (considerando procesos de lavado).

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Gran capacidad de remoción.
- Proceso económico.
- Fácil de operar y mantener.

Desventajas
- Mantenimiento frecuente.
- Esta tecnología no destruye los contaminantes y eventualmente se requiere de otra tecnología que sí lo haga.
- Generan residuos que deben ser dispuestos en vertederos controlados.

RECOMENDACIONES

Dada su gran versatilidad se recomienda su uso en la depuración terciaria, en el tratamiento de aguas potables o en el tratamiento de depuración de afluentes industriales y aguas servidas.

MÁS INFORMACIÓN

- Bendezú, S., Oyague, J., Romero, A., García, R., Muñoz, Y. and Escalon, N., 2005. Adsorción de cromo desde efluentes de curtiembres por carbones activados preparados desde cáscaras de coco por activación química con KOH y ZnCl2. Journal of the Chilean Chemical Society, 50(4), 677-684
- Caturla, F., Molina-Sabio, M., and Rodriguez-Reinoso, F., 1991. Preparation of activated carbon by chemical activation with ZnCl2. Carbon, 29(7), 999-1007.

18 Adsorción en médula de fibra de coco
(Adsorption on coir pith)

OBJETIVOS

La *médula de fibra de coco* es un residuo agrícola obtenido durante la separación de la fibra desde la cáscara de coco. Debido a sus propiedades de porosidad y altas capacidades de adsorción, surgen numerosas aplicaciones para la eliminación de aniones desde aguas residuales. La médula de fibra de coco se compone de 35% de celulosa, el 25,2% de lignina, 7,5% pentosanas, 1,8% grasa y resina, 8,7% de cenizas, el 11,9% de humedad y 10% otras sustancias.

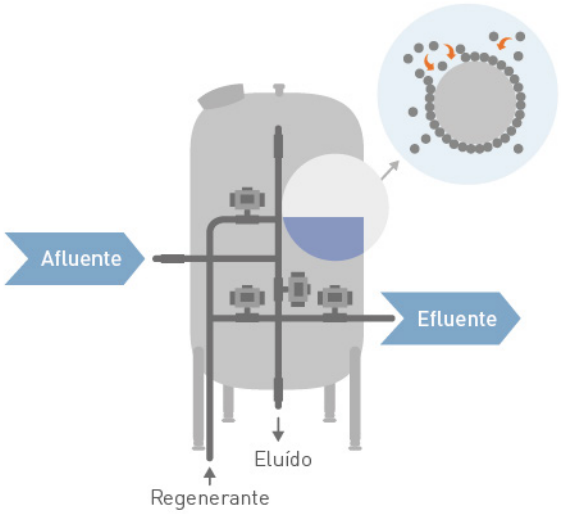
Con el fin de mejorar su capacidad de adsorción, la superficie de la médula de fibra de coco se modifica usando un tensoactivo catiónico, el bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HDTMA) incrementando el contenido de C, H y N en su superficie. Logrando un área superficial de 1,9 m^2/g y polaridad positiva.

DESCRIPCIÓN

La tecnología consiste en columnas de lechos empacados cargados con gránulos del material adsorbente. Se bombea el afluente a tratar a través del filtro empacado. A medida que éste fluye a través de la columna, los químicos se sorben a la superficie porosa de los gránulos. Cuando la superficie disponible del material adsorbente se satura de químicos, se dice que está agotado. El material debe reemplazarse o limpiarse para permitir que el filtro pueda volver a ser usado, reutilizado.

APLICACIÓN

Utilizada principalmente para la remoción de sulfato en afluentes residuales industriales ácidos como la industria del fertilizante, o drenaje minero ácido en minería, entre otras.



Fibra de coco

Mecanismo de *adsorción con médula de fibra de coco*.
Fuente. Modificado de
Fundación Chile (CONAMA), 2010.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Emergente	Adsorción	Fisicoquímico		•													DMA

EFICIENCIA

La eficiencia de remoción por adsorción depende principalmente de la concentración de aniones en el afluente a tratar, además del pH, temperatura y caudal.

Estudios realizados han demostrado que la eficiencia de remoción de la médula de fibra de coco se encuentra entre los siguientes rangos:

Sulfatos inicial 10 mg/L: capacidad de adsorción 2,3 mg/g.
Sulfatos inicial 50 mg/L: capacidad de adsorción 7,6 mg/g.

Máxima remoción: pH=2.
Decrece la remoción: pH > 2.

CONDICIONES OPERACIONALES

Temperatura: > 30°C.

Tiempo contacto: depende de la concentración inicial de sulfato:

Sulfato inicial 10 mg/L: Tiempo de Residencia (TR) 30 min.

Sulfatos inicial 50 mg/L: Tiempo de Residencia (TR) 100 min.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Alta innovación.
- Alternativa sustentable de tratamiento.
- Bajos costos de operación y mantenimiento operación simple.

Desventajas
- Debe ser activada para mejorar la eficiencia.
- Necesidad de estudios adicionales para su desarrollo industrial.

RECOMENDACIONES

Se debe realizar una caracterización detallada del afluente a tratar ya que la adsorción no es completamente selectiva, lo que significa que la presencia de otros aniones puede afectar la eficiencia de remoción (aniones como Cr(VI), SCN^-, Mo(VI) principalmente).

MÁS INFORMACIÓN

- Fundación Chile, 2010. Catastro de tecnologías, proyecto Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de Abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos, para la Comisión Nacional de Medio Ambiente, CONAMA.
- MEND - Mine Environment Neutral Drainage, 2000. Mend manual volume 5 – treatment mend 5.4.2e.
- Namasivayam, C., and Sureshkumar, M. V., 2007. Removal of Sulphate from Water and Wastewater by Surfactant-modified Coir Pith, An Agricultural Solid Waste'by Adsorption Methodology. Journal of environmental engineering and management, 17(2), 129.

19 Adsorción en zeolitas modificadas
(ZEOTREAT- Adsorption on modified zeolites)

OBJETIVOS

Las *zeolitas activadas* son zeolitas naturales sometidas a un proceso de activación que potencia su capacidad intrínseca para la adsorción de cationes intercambiables. Por otra parte, las *zeolitas modificadas* son obtenidas por el tratamiento de la zeolita activada, con un detergente catiónico.

Debido a esta activación y posterior modificación, la zeolita obtiene propiedades de adsorción mejoradas de aniones y cationes.

DESCRIPCIÓN

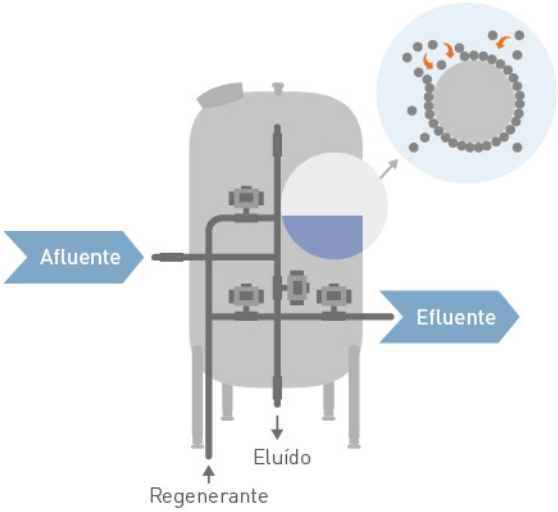
La tecnología se basa en un proceso de adsorción en flujo continuo, en columnas con *zeolitas modificadas* y acondicionadas. El afluente es bombeado a través de la columna donde los contaminantes son retenidos.

Al saturarse la columna se inicia el proceso de regeneración donde la zeolita agotada es regenerada para ser utilizada en un nuevo proceso de adsorción.

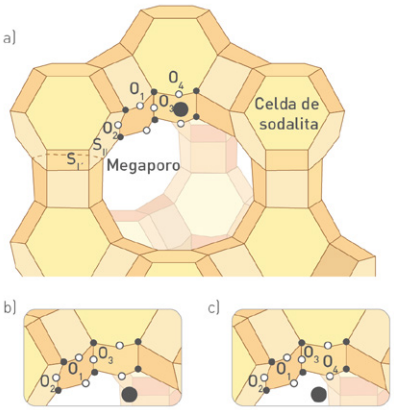
APLICACIÓN

Algunas de las aplicaciones más importantes son:

- Para la remoción de cationes como el amonio en el rubro de la acuicultura.
- También se recomienda la depuración final de los tratamientos de efluentes agroindustriales y aguas servidas, entre otros.
- Aplicación innovadora para afluentes mineros, tratamiento de aguas claras y aguas de filtro.
- Afluentes ácidos provenientes del lavado de gases de fundiciones de cobre.



Mecanismo de adsorción con *zeolitas modificadas*.
Fuente. Modificado de Fundación Chile (CONAMA), 2010



Zeolita.
Fuente. Modificado de Goursot, A. *et al.*, 1997.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	Emergente	Adsorción	Fisicoquímico		•	•											•	DMA DMAL

EFICIENCIA

La tecnología ZEOTREAT™ es altamente selectiva y capaz de remover la totalidad del amonio, arsénico, molibdeno, sulfato y metales pesados como níquel, cromo, cadmio, cobre, entre otros, sobre el 99,9%.

Las **capacidades de captación** alcanzadas son de:

Amonio: 22 mg/g.
Arsénico: 13 mg/g.
Molibdeno: 28,8 mg/g.
Sulfato: 5,1 mg/g.
Plomo: 20,2 mg/g.
Cobre: 12 mg/g.
Níquel: 13,5 mg/g.

CONDICIONES OPERACIONALES

Tipo de operación: continua.
Selectividad: no es selectivo.
Pretratamiento: en general filtrado previo.
Consumo de reactivos: H_2SO_4, HCl y detergente.
Temperatura: 2 – 60°C.
Caudal de operación: 1 - 100 m^3/día.
Vidal útil: 20 años (referida a los equipos y motores con un adecuado manejo de mantención).

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Permite recuperación de valores metálicos.
- Tiene bajo costo de inversión.
- Es de operación simple.
- No genera lodos y produce bajos volúmenes de eluídos.
- Flexibilidad en aplicación y facilidad para complementarse con otras tecnologías a costos razonables.

Desventajas
- Posee costos operacionales mensuales por consumo de reactivos químicos.
- Requiere el uso de regenerantes.
- Genera eluídos que deben ser dispuestos o tratados.
- Finalmente la zeolita agotada debe ser dispuesta.
- El 60% de los costos operacionales corresponden a la regeneración.

RECOMENDACIONES

Es una tecnología preferentemente para su uso en depuración de efluentes industriales líquidos en concentraciones diluidas, donde otras tecnologías convencionales no resultan ser costo-efectivas.

MÁS INFORMACIÓN

- Broschek, U., 2013. Desarrollo de soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos de la gestión hídrica en el sector productivo. Water Week LA.
- Goursot, A., Vasilyev, V., and Arbuznikov, A., 1997. Modeling of Adsorption Properties of Zeolites: Correlation with the Structure. J. Phys. Chem. B 1997, 101, 6420-6428.
- The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.
- Vidal, C., Broschek, U., Zuñiga, G., and Bravo, L., 2009. Zeotreat: multifunctional adsorbents for metal and sulphate removal in mining wastewaters from copper industry, Chilean case. Abstracts of the International Mine Water Conference, Pretoria, South Africa.

20 Cristalización
(Crystallization)

OBJETIVOS

Es un proceso donde a partir de una solución diluida de dos o más electrolitos se puede remover uno de ellos por dilución de la mezcla. A través de cambios de temperatura se produce la separación de sales de acuerdo al Kps (que indica la solubilidad de un compuesto iónico) de cada sal presente en la matriz.

Se debe conocer la solubilidad máxima del compuesto que no se quiere precipitar a la temperatura de enfriamiento dada, para luego diluir la mezcla lo necesario para que solo cristalice el electrolito en cuestión.

DESCRIPCIÓN

El afluente pasa por una serie de etapas de pretratamiento, para eliminar la mayor cantidad de iones de calcio y magnesio. Luego pasa a una etapa de intercambio iónico donde se eliminan las trazas de calcio y magnesio remanentes. El "licor" resultante pasa a la celda electrolítica, donde se produce parte del cambio de cloruro de sodio a clorato de sodio. El "licor" de clorato de sodio resultante pasa entonces al cristalizador primario, donde el agua se evapora y se cristalizan cristales de clorato de sodio. En el cristalizador secundario, la solución madre diluida se enfría, para cristalizar el sulfato de sodio como decahidrato de sulfato de sodio. El sulfato de sodio cristalizado, se puede separar por centrifugación o filtración.

APLICACIÓN

Tecnología versátil y aplicable a muchas matrices.

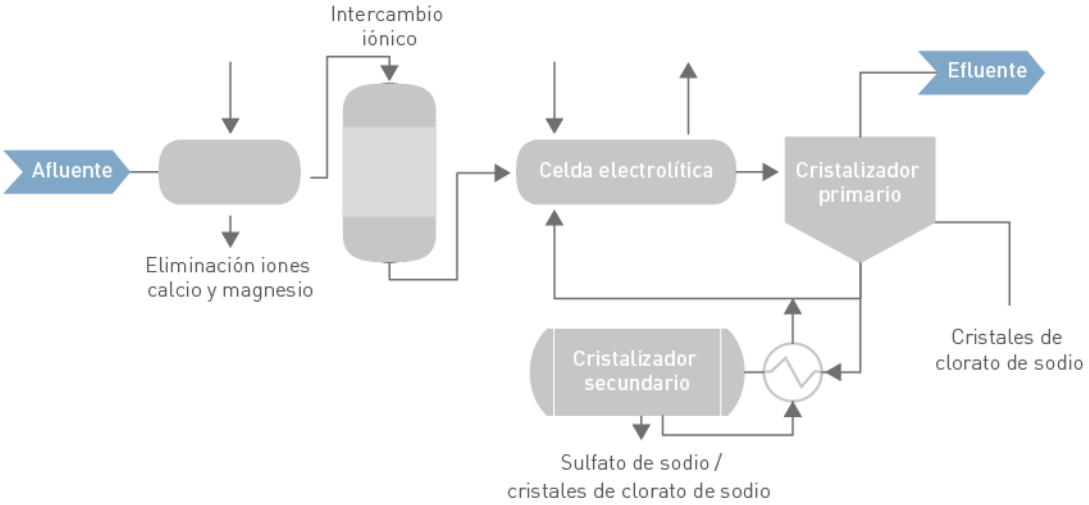


Diagrama de flujo del proceso de *Cristalización*.
Fuente. Modificado de Burkell *et al.*, 1987.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes													Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
-Por dilución-enfriamiento -Por alentamiento-enfriamiento	Convencional	Precipitación química	Fisicoquímico		•													DMA DMAL

EFICIENCIA

La eficiencia depende de lo complejo de la matriz, ya que en el punto óptimo de cristalización no debe haber algún interferente.

CONDICIONES OPERACIONALES

Requiere de dilución previa para llegar a una eficiencia óptima.

Eventualmente según la estequiometría y Kps (que indica la solubilidad de un compuesto iónico) se requeriría la adición de cationes y/o semillas de nucleación.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Preserva la actividad microbiológica.
- Uso de materiales simples.
- No requiere del uso de reactivos por lo que el costo operacional puede ser bajo.

Desventajas
- Tiene un alto consumo energético.
- Se requiere hacer estudios previos de solubilidad a diferentes temperaturas.

RECOMENDACIONES

Requiere de estudios de factibilidad técnica y el diseño del tratamiento caso a caso.

MÁS INFORMACIÓN

- Burkell, J. E., and Warren, I. H., 1987. Production of sodium chlorate. United States Patent Nº 4,702,805. Date of Patent: Oct. 27, 1987.
- Ruthel; W. W., and Bommaraju, T. V., 1992. Sulphate removal from chlorate liquor. United States patent Nº 5,108,722.

21 Extracción por solvente
(Solvent extraction)

OBJETIVOS

La extracción por solvente es una operación de transferencia de masas en un sistema de dos fases líquidas que se fundamenta en el principio por el cual un soluto o ion metálico se puede distribuir en cierta proporción entre dos solventes inmiscibles, uno de los cuales es usualmente acuoso y el otro un solvente orgánico o cualquier solvente inmiscible al agua.

La separación es posible debido a que ciertos reactivos químicos orgánicos, tienen un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, formando compuestos organometálicos y a su vez, no tienen casi ninguna afinidad con iones contaminantes.

DESCRIPCIÓN

Es un proceso que se realiza en varias etapas de extracción en un reactor tipo tanque agitado, donde se agregan los extractantes y recuperan las soluciones enriquecidas en diversos elementos.

El reactor está equipado de un cátodo, construido en acero inoxidable, espuma metálica recubierta y fibras de carbono; y un ánodo construido en titanio; recubierto con metal precioso o óxidos metálicos.
El proceso consiste en dos etapas fundamentales. En primer lugar el extractante se mezcla al afluente mediante agitación. Luego, este complejo extractante es separado de la solución mediante gravedad obteniendo una corriente libre de contaminante y una línea con extractante cargado.
La solución cargada puede ser regenerada mediante un proceso de electro-obtención.

APLICACIÓN

Tecnología aplicable a muchas matrices, principalmente en el proceso de recuperación de valores metálicos en la industria metalúrgica.

También usado en la industria alimentaria para extracción de aceites.

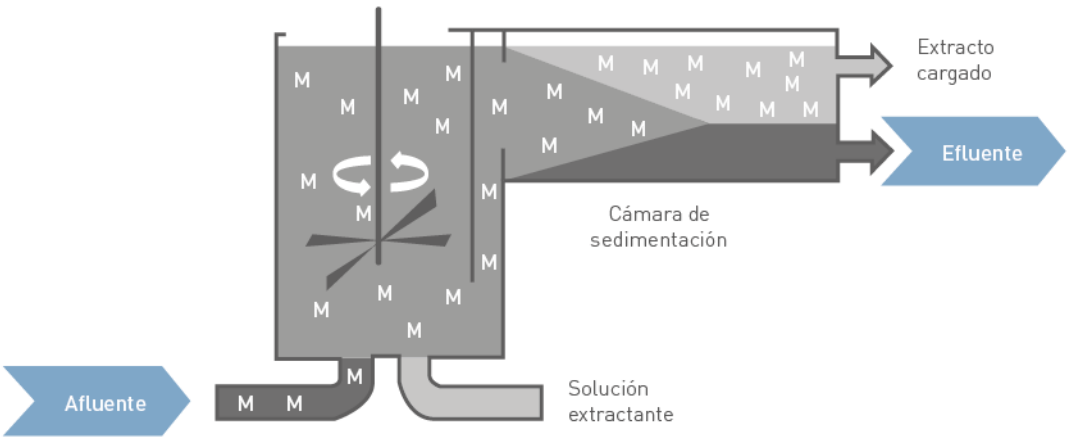


Diagrama de mezclador-decantador continuo de *extracción por solvente*.
Fuente. Modificado de Wilson *et al.*, 2014.

Variante	Tipo	Tipo de tratamiento	Clasificación general	Contaminantes														Tipo de drenaje
				Acidez	Sulfato	Hierro	Magnesio	Manganeso	Cobre	Zinc	Aluminio	Plomo	Plata	Cromo	Cadmio	Níquel	Arsénico	
N.A.	No convencional	Precipitación química	Extracción líquido-líquido		•				•									DMA

EFICIENCIA

Se logran alcanzar eficiencias de entre 85 – 90%.

CONDICIONES OPERACIONALES

Principalmente, la extracción dependerá de las condiciones químicas del afluente, la solubilidad entre las fases y de la selección del extractante.

La operación dependerá esencialmente de tiempo de residencia, área de interfaz acuoso/extractante y del potencial químico en la interfaz.

VENTAJAS/DESVENTAJAS

Ventajas
- Genera subproductos.
- No genera residuos ni lodos a disponer.
- Genera efluentes de alta calidad.
- Recupera sulfato.
- Permite reuso de extractantes.

Desventajas
- Requiere de un diseño a la medida.
- Requiere de insumos químicos específicos.
- Tiene operación compleja.

RECOMENDACIONES

Requiere de estudios de factibilidad técnica.

MÁS INFORMACIÓN

- MEND - Mine Environment Neutral Drainage, 2000. Mend manual volume 5 – treatment mend 5.4.2e.
- Taylor, J., and Waters, J., 2003. Treating ARD – how, when, where and why. Mine Environmental Management, 11, 6-9.
- Wilson, A.M., Bailey, P.J., Tasker, P.A., Turkingon, J.R., Grant, R.A. and Love, J.B., 2014. Solvent extraction: the coordination chemistry behind extractive mineralogy. Chem Soc. Rev. 43: 123-134.

6. Referencias bibliográficas

Al, T.A., and Blowes, D.W., 1999. The hydrogeology of a tailings impoundment formed by central discharge of thickened tailings: implications for tailings management, Journal of Contaminant Hydrology 38.

Acid Drainage Technology Initiative (ADTI), 1998. Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage. J. Skousen, A. Rose, G., Geidel, J., Foreman, R., Evans, W. Hellier, and members of the Avoidance and Remediation Working Group, National Land Reclamation Centre, West Virginia University, Morgantown, WV.

Andrina, J., Wilson, W., and Miller, S., 2009. Behavior of water flow and geochemical mixing in layered waste rock stockpiles: a meso-scale experiment. In: Proc. Securing the Future and 8th Internat. Conf. on Acid Rock Drainage, June 22–26, 2009, Skellefteå, Sweden.

Arcos, D., Von Igel, W., Flores, L.G., and Acuña, A., 2011. Geo-environmental units (GEUs) in waste dumps from Collahuasi, Enviromine 211, 2nd International Seminar on the Environmental Issues in the Mining Industry, 23-25 November 2011, Santiago, Chile.

Armellini, F. J., and Teste, J. W., 1991. Experimental methods for studying salt nucleation and growth from supercritical water. The Journal of Supercritical Fluids, 4(4), 254-264.

Australian Government, 2007. Department of Industry Touris and Resources. Tailings Management. Leading Practice Sustainable Development Program for the Minng Industry. 88 p.

Bendezú, S., Oyague, J., Romero, A., García, R., Muñoz, Y., and Escalon, N., 2005. Adsorción de cromo desde efluentes de curtiembres por carbones activados preparados desde cáscaras de coco por activación química com KOH y ZnCl2. Journal of the Chilean chemical Society, 50(4), 677-684.

Bhattacharyya, D., and Chen, L. F., 1986. Sulfide precipitation of Nickel and other heavy metals from single- and multi-metal systems. EPA/600/S2-86/051.

Borden, R. K., 2003. Environmental geochemistry of the Bingham Canyon porphyry copper deposit, Utah. Environmental Geology 43(7):752–758.

Bowden,L. I., Johnson, K. L., Jarvis, A. P., Robinson,H., Ghazireh, N., and Younger, P. L., 2006. The use of basic oxygen steel furnace slag (bos) as a high surface area media for the removal of iron from circum neutral mine waters. In Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). St. Louis, Missouri (pp. 25-30).

Bowell, R. J., 2004. A review of sulfate removal options for mine waters. Proceedings of Mine Water, 75-88.

Broschek, U., Vidal, C., Bravo, L., and Zuñiga, G., 2009. MILAF: Integral Management of arsenical sludge, treatment and recovery of by-products of acid waters from smelter plants. International Mine Water Association IMWA.

Broschek, U., 2013. Desarrollo de soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos de la gestión hídrica en el sector productivo. Water week LA.

Brousseau, J.H.R., Seed, L.P., Lin, M.Y., Shelp, G.S., and Fyfe, J.D. Electrochemical Prevention of Acid Mine Drainage.

Burkell, J. E. and Warren, I. H., 1987. Production of sodium chlorate. United States Patent N° 4,702,805.

Caturla, F., Molina-Sabio, M., and Rodriguez-Reinoso, F., 1991. Preparation of activated carbon by chemical activation with ZnCl2. Carbon, 29(7), 999-1007.

Chartrand, M.M.G., 2003. Electrochemical remediation of acid mine drainage. Journal of Applied Electrochemistry 33, 259–264. doi:10.1023/A:1024139304342.

Cortina, j. L., Fiúza, a. M., Silva, a., and litter, M. I. Tecnologías de tratamiento in-situ de aguas subterráneas.Capítulo 7

Cravotta, C.A. III, 2010. Abandoned mine drainage in the Swatara Creek Basin, Southern Anthracite Coalfield, Pennsylvania, USA--2. Performance of passive-treatment systems: Mine Water and the Environment, v. 29, p. 200-216. (http://dx.doi.org/10.1007/s10230-010-0113-5).

Davies, M.P., Lighthall, P.C., Rice, S., Martin, T.E., 2002. Design of Tailings Dams and Impoundments, Keynote Address at Tailings and Mine Waste Practices, SME, AGM, Phoenix, 2002. http://www.infomine.com/library/publications/docs/Davies2002b.pdf. Accessed 2/02/2015

Davies, M., 2011. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals, Proceedings Tailings and Mine Waste 2011 Vancouver, BC, November 6 to 9, 2011.

Department of water affairs, Republic of South Africa, 2013. Feasibility study for a long-term solution to address the acid mine drainage associated with the east, central and west rand underground mining basins options for the sustainable management and use of residue products from the treatment of AMD.

Dill, S., Cowan, J., Wood, A. and Bowell, R. J., 1998. A review of sulfate removal options from mine waters. IMWA Proceedings 1998 | © International Mine Water Association 2012.

Dold, B., 2014. Submarine Tailings Disposal (STD)—A Review, Minerals 4, 642-666.

Driussi, C., and Jansz, J., 2006. Technological options for waste minimization in the mining industry. J. Clean. Prod. 14, 682-688.

Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D., and Moran, C., 2014. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches, Journal of Cleaner Production, Journal of Cleaner Production 84, 411-420.

Environmental Stewardship Initiative (ESI) of the Canada Mining Innovation Council (CMIC), 2014. Pre-Feasibility Report of the ESI Closure Working Group.

Evangelou, V. P., and Zhang YL., 1995. A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. Crit Rev Environ Sci Technol 25:141–199.

Evangelou V. P., 1995b. Potential microencapsulation of pyrite by artificial inducement of ferric phosphate coatings. J Environ Qual 24:535–542.

Evangelou V. P., 2001. Pyrite microencapsulation technologies: principles and potential field application. Ecol Eng 17:165–178.

Faulkner, B.B. and J.G. Skousen., 1995. Effects of land reclamation and passive treatment systems on improving water quality. Green Lands 25:34-40.

Franks, D.M., Boger, D.V., Cote, C.M., and Mulligan, D.R., 2011. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. Resour. Policy 36, 114-122.

Fourie, A.B., 2009. Preventing catastrophic failures and mitigating environmental impacts of tailings storage facilities. Proced.Earth.Planet. Sci. 1, 1067-1071.

Fundación Chile, 2010. Catastro de tecnologías, proyecto Consultoría de Apoyo a los Procesos de Normas Ambientales en Sistemas Hídricos: Estimación de Costos de Abatimiento de Contaminantes en Residuos Líquidos, para la Comisión Nacional de Medio Ambiente, CONAMA.

Gao, P., Chen, X., Shen, F. and Chen, G., 2005. Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotatio without a filter. Separation and purification Technology, 43(2), 117-123.

Germain, D., and Tassé, N., 2000. A novel treatment for acid mine drainage, using a wood-waste cover preventing sulfide oxidation. Fifth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 21-24 May 2000, Denver, Colorado.

Germain, D., Tassé, N., and Cyr, J., 2003. Rehabilitation of Mine Tailings by Simultaneous Prevention of Oxidation and Treatment of Acid Effluents Using a Wood-Waste Cover. 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australia, 12-18 July 2003.

Gonzales, C., Baumgartl, T., Edraki, M., and Soliman, A., 2014. Mine Wastes as Cover Materials in a Water-shedding Soil Cover in North-west Queensland. In:. Life-of-Mine 2014 Conference, Brisbane, QLD, 16-18 July 2014, pp. 261–270.

Gonzales, C., Baumgartl, T., Scheuermann, A. and A. Soliman 2014b. Soil moisture profile of a water-shedding cover design in central Queensland. Chapter 189 in : Unsaturated Soils: Research and Applications N . Khalili , A . R . Russell , and A . Khoshghalb (Eds): 1403-1408.

Goursot, A., Vasilyev, V., and Arbuznikov, A., 1997. Modeling of Adsorption Properties of Zeolites: Correlation with the Structure. J. Phys. Chem. B 1997, 101, 6420-6428.

Grady, J., and Bethune, P., 2003: Permanent creek diversion through spoil - Back Creek, Queensland. AUSIMM Water in Mining Conference Proceedings 2003, 14-16 + 18-24

Graupner, T., Kassahun, A., Rammlmaier, D., Meima, J.A., Kock, D., Furche, M., Fiege, A., Schippers, A., and Melcher, F., 2007. Formation of sequences of cemented layers and hardpans within sulfide-bearing mine tailings (mine district Freiberg, Germany). Applied Geochemistry 22 (11), 2486–2508.

Gusek, J.J., 2002. Sulfate-reducing bioreactor design and operating issues: Is this the passive treatment technology for your mine drainage?

Harris, D.L., and Lottermoser, B.G., 2006. Phosphate stabilization of polymineralic mine wastes. Mineralogical Magazine, 70 (1). pp. 1-13.

Hawkins, J.W., 1994. Assessment of contaminant load changes caused by remining abandoned coal mines. p. 20-29. In: International Land Reclamation and Mine Drainage Conference, 24-29 April 1994, USDI, Bureau of Mines SP 06A-94, Pittsburgh, PA.

Hesketh, A.H., Broadhurst, J.L., and Harrison, S.T.L., 2010. Mitigating generation of acid mine drainage from copper sulphide tailings impoundments in perpetuity: a case study for an integrated management strategy. Miner. Eng. 23, 225-229.

INAP – The International Network for Acid Prevention, 2012. Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide). http://www.gardguide.com/

INAP - International Network for Acid Prevention, 2003. Treatment of Sulphate in Mine Effluents. LORAX Environmental Report.

ITRC Mining Waste Team, 2014. Technology Overview as part of a Web-based Technical and Regulatory Guidance. Anoxic Limestone Drains (en línea). http://www.itrcweb.org/miningwaste-guidance/to_anoxic.htm

Jarvis, A. P., Gandy, C. J., and Gray, N. D., 2012. Mitigation of pollution from abandoned metal mines Part 1: Review of passive treatment technologies for metal mine drainage remediation. © Environment Agency.

Jenkins, J., D., 2006. Role of Flow and Organic Carbon on Acid Mine Drainage Remediation in Waste Rock, PhD Thesis, University of Colorado, 213 pages.

Johnson, D. B., and Hallberg, K. B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the total environment, 338(1), 3-14.

Kore, J. P., and Syversen, U., 1995. State of-the-art electroflocculation. Filtration and Separation 32.2, 153-146.

Koski, JA., 2004. Sealing abandoned mine shafts with concrete. PUBLICATION #J941015, Copyright © 1994, The Aberdeen Group.

Kruse, N. A., Mackey, A. L., Bowman, J. R., Brewster, K. and Riefler, R. G., 2012. Alkalinity production as an indicator of failure in steel slag leach beds treating acid mine drainage. Environmental earth sciences.

Lawrence, R. W., Kratochvil, D. and Ramey, D., 2005. "A new commercial metal recovery technology utilizing on-site biological H2S production." Proceedings–HydroCopper (2005): 23-25.

Lewis, A. E., 2010. Review of metal sulphide precipitation. Hydrometallurgy, 104(2), 222-234.

López Pamo, E., Aduvire, O. and Barettino, D., 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21.

Martinto, O. E. P., and Alonso, M. J. C., 2001. Oxidación en agua supercrítica (OASC): aplicación a la eliminación de aguas residuales industriales. In El agua, un bien para todos: conservación, recuperación y usos: 6ª Jornadas Ambientales (pp. 265-280). Ediciones Universidad de Salamanca.

Mauric, A., and Lottermoser, BG., 2011. Phosphate amendment of metalliferous waste rocks, Century Pb–Zn mine, Australia: laboratory and field trials. Applied Geochemistry, 26 (1). pp. 45-56.

McGuire, G., 2003. Managing Mine Closure Risks in Developing Communities — A Case Study, Kelian Equatorial Mining, Indonesia. Mining Risk Management Conference, Sydney, 9-12 Sep 2003.

Meima, J.A., Graupner, T., and Rammlmair, D., 2012. Modeling the effect of stratification on cemented layer formation in sulfide-bearing mine tailings, Applied Geochemistry 27, 124–137.

MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 1998. Blending and Layering Waste Rock to Delay, Mitigate or Prevent Acid Rock Drainage and Metal Leaching: A Case Study Review. MEND Project 2.37.1.

MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 1998b. Design Guide for the Subaqueous Disposal of Reactive Tailings in Constructed Impoundments. Report 2.11.9, CANMET.

MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2000. MEND Manual Volume 5 – Treatment MEND 5.4.2e.

MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2004. Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings. MEND report 2.21.4, volume 1.Natural Resources Canada, pp 86.

MEND - Mine Environment Neutral Drainage Program, 2007. Macro-scale cover design and performance monitoring manual. MEND report 2.21.5. Natural Resources Canada, pp 108.

Mintek, SA., SAVMIN Process , 2014:
http://www.mintek.co.za/wp-content/uploads/2014/10/SAVMIN-Process.pdf.

Moorhouse, A. M., Wyatt, L. M., Watson, I. A., and Hill, S.,2013. A high surface area media treatment trial of a circum-neutral, net alkaline coal mine discharge in the South Derbyshire Coal Field (UK) using hydrous ferric oxide. "Reliable Mine Water Technology" IMWA 2013.

Mortazavi, S., 2008. Application of Laboratories Membrane Separation Technology to Mitigation of Mine Effluent and Acidic Drainage. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program.

Mudd, G., and Boger, D.V., April 2013. The ever growing case for paste and thickened tailings e towards more sustainable mine waste management. Aust. Inst. Min. Metall. Bull. 2, 56-59.

Namasivayam, C., and Sureshkumar, M. V., 2007. Removal of Sulfate from Water and Wastewater by Surfactant-modified Coir Pith, An Agricultural SolidWaste'by Adsorption Methodology. Journal of environmental engineering and management, 17(2), 129.

National Small Flows Clearinghouse, 1997. Pipline, small community wastewater issues explained to the public. Spring 1997 Vol. 8, No. 2.

OK Tedi Mining, 2009. Annual Environmental Report. Available online.

PADEP, 1998. Pennsylvania's Comprehensive Plan for Abandoned Mine Reclamation, Bureau of Abandoned Mine Reclamation, PADEP, June, 1998.

Pall Corporation, 2012. Tratamiento de Aguas en la Industria Minera, Tecnologías de Separación y Filtración para Tratamiento de Aguas en Minería.

Parisi, D., Horneman, J., and Rastogi, V., 1994. Use of bactericides to control acid mine drainage from surface operations. In: Proceedings of the international land reclamation and mine drainage conference, U.S. Bureau of Mines SP 06B-94, Pittsburgh, PA, pp 319–325.

Pearce, S.R., 2014. Beyond the PAF Cell, In H. Miller and L. Preuss (eds) Proceedings of 8th Australian workshop on acid and metalliferous drainage, 29 April-2 May 2014, Adelaide, South Australia, Published by JKTech.

Pimenta de Ávila, 2011. The Drained Stacking of Granular Tailings: A Disposal Method for a Low Degree of Saturation of the Tailings Mass. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011 Vancouver, BC, November 6 to 9, 2011.

PIRAMID Consortium, 2003. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK. 166pp.

Poon, C. P., 1997. Electroflotation for groundwater decontamination. Journal of hazardous materials, 55(1), 159-170.

Proyecto MILAF: Desarrollo de una Tecnología Innovadora para el Manejo Integral de Lodos Arsenicales, Tratamiento y Valorización de Residuos de Efluentes Ácidos de Fundiciones, 2007. INNOVA CHILE. Corfo.

Raberger, R., and Krammer, G., 2009. How to meet the challenge of tailings filtration, ENVIROMINE 2009, 1st International Seminar on International Issues in the Mining Industry, 30 September-2 October 2009, Santiago, Chile.

Rashidinejad, F., and Naraghi, S., 2011. Tailings disposal options study for Sangan Iron Mine Project - Iran, in Proceedings of the fifteenth International Conference on Tailings and Mine Waste, held in Vancouver, BC, November 6-9, pp 757-770.

Robinson, A. K., and Sum, J. C., 1980. Sulfide precipitation of heavy metals. EPA-600/2-80-139.

Rose, S., and Elliott, W.C., 2000. The effects of pH regulation upon the release of sulfate from ferric precipitates formed in acid mine drainage, Applied Geochemistry 15, 27-34.

Ruthel, W. W., and Bommaraju, T. V., 1992. Sulfate removal from chlorate liquor. United States patent N° 5,108,722.

Sahoo P.K., Kim, K., Equeenuddin, S.M., and Powell, M.A., 2013. Current approaches for mitigating acid mine drainage. Rev Environ ContamToxicol 226, 1-32.

Sasson, M. B., Calmano, W., and Adin, A., 2009. Iron-oxidation processes in a electroflocculation (electrocoagulation) cell. Journal of hazardous materials, 171(1), 704-709

Schoenbrunn, F., and Laros, T., 2002. Design Futures and Types of Sedimentation Equipment. In: A.L., Mular, D.N., Halbe, and D.J., Barratt, ed. Proceedings of the Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control. Vol.2, USA: SME, 1331-1341.

Skousen, J.G., Hedin, R., and Faulkner, B.B., 1997. Water quality changes and costs of remining in Pennsylvania and West Virginia. p. 64-73. In: 1997 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, 10-15 May 1997, Austin, TX.

Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., and Hellier, W., 1998. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage, Published by National Mined Land Reclamation Centre at West Virginia University, 140 pp.

Stimpfl, M., Carrigan, M. L., McLeary, M.B., and Taylor, J.R., 2009. Approaches to acid and metalliferous drainage management- implications of short-term trials for long-term remediation, In A.B. Fourie, M. Tibbett (eds) Mine Closure, Proceedings of the 4th International Conference on Mine Closure, 9-11 September 2009, Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 273-284.

Struthers, S., Brumle, J., Taylor, G., 1997. An Integrated System for Recycling Base Metal Tailings. Paper presented at the 1997 Annual Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation Austin, Texas, May 11-16, pp. 579-592.

Taylor, J., Guthrie, B., Murphy, N., and Waters, J., 2006. Alkalinity producing cover materials for providing sustained improvement in water quality from waste rock piles. In Proceedings of the 7th international conference on acid rock drainage (ICARD), Mar (pp. 26-30).

Taylor, J., Pape, S. and Murphy, N., 2005. A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD). Prepared for the Australian Centre for Minerals Extension and Research (ACMER), EARTH SYSTEMS PTY LTD, Australian Business Number 29 006 227 532.

Taylor, J. and Waters, J., 2003. Treating ARD – how, when, where and why. Min Environ Manag, 11, 6-9.

Theriault, J.A., Frostiak, J., and Welch, D. Surface disposal of past tailings at the Bulyanhulu Gold Mine, Tanzania.

The Minerals Coordinating Committee (MCC), 2001. Environmental Mine Waste Management: Strategies for the Prevention, Control, and Treatment of Problematic Drainages Volume 1 of 2.

Topal, E., Williams, D., and Zhang, N., 2009. Development and validation of a waste rock dumping optimisation model. in Securing the future mining, metals and the environment in a sustainable society, Proceedings of 8th ICARD International Conference on Acid Rock Drainage Sweden 23-26 June 2009, Online pages 1-11.

U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. http://www.netl.doe.gov/research/coal/crosscutting/pwmis/tech-desc/membrane

U. S. EPA, 1975. Inactive and Abandoned Underground Mines. Water Pollution Prevention and Control. Prepared for Office of Water and Hazardous Materials. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C. 20460. June 1975.

U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency, 1998. Permeable Reactive Barrier Technologies for contaminant remediation. 102 p.

U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency, 2008. Mine Waste Technology Program Electrochemical Tailings Cover. EPA/600/R-08/095 July 2008. National Service Center for Environmental Publications (NSCEP).

Verburg, B.M., 2001. Use of paste technology for tailings disposal: potential environmental benefits and requirements for geochemical characterization. In: Proceedings of the International Mine Water Association Symposium, 2001.

Vidal, C., Broschek, U., Zuñiga, G., and Bravo, L., 2009. Zeotreat: multifunctional adsorbents for metal and sulphate removal in mining wastewaters from copper industry, chilean case. Abstracts of the International Mine Water Conference, Pretoria, South Africa.

Wilson, A.M., Bailey, P.J., Tasker, P.A., Turkingon, J.R., Grant, R.A., and Love, J.B., 2014. Solvent extraction: the coordination chemistry behind extractive mineralogy. Chem Soc. Rev. 43: 123-134.

Williams, D.J., Stolberg, D.J., and Currey, N.A., 2006. Long-term performance of Kidston's store/release cover system over potentially acid forming waste rock dumps, Paper presented at the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis MO. R.I. Barnhisel (ed.) Published by the American Society of Mining and Reclamation (ASMR), 3134 Montavesta Road, Lexington, KY 40502, P. 2385-2396.

Wong, M.H., 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. Chemosphere 50,775–780.

Younger, P.L., 2000a. Holistic remedial strategies for short- and long-term water pollution from abandoned mines. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section A), 109, A210-A218.

Younger, P. L., Jayaweera, A., Elliot, A., Wood, R., Amos, P., Daugherty, A. J., and Johnson, D. B., 2003. Passive treatment of acidic mine waters in subsurface-flow systems: exploring RAPS and permeable reactive barriers. Land Contamination and Reclamation, 11(2), 127-135.

Ziemkiewicz, P. F., Skousen, J. G., and Simmons, J., 2003. Long-term performance of passive acid mine drainage treatment systems. Mine Water and the Environment, 22(3), 118-129.

7. Equipo de trabajo

Fundación Chile

Raquel Charte Gascón
María Carolina Soto
Angela Oblasser
Carla Calderón Rosas
Jutta Hoppe
Natalia Farfán Salazar
Cristóbal Girardi Lavín
Cecilia Vidal Cruz
Juan Ramón Candia Jorquera

Sernageomin

Lilian Valdebenito Valenzuela
Ana Luisa Morales Mella

Colaboradores

Jorge Campos Guala (Minería y Medio Ambiente Ltda., Chile)
Mansour Edraki (Sustainable Minerals Institute. University of Queensland, Australia)
Thomas Baumgartl (Sustainable Minerals Institute. University of Queensland, Australia)
Luis Bravo (Consultor independiente, Chile)

SERNAGEOMIN
Ministerio de Minería
Gobierno de Chile

Proyecto apoyado por

CORFO

FCH
FUNDACIÓN CHILE