

DRENAJES ÁCIDOS DE MINA
Alternativas de tratamiento

JOSE ENRIQUE SANCHEZ RIAL*
JUAN PABLO FERREIRA CENTENO**

**Director de Geología - Secretaría de Minería de Córdoba* josesanchezrial@yahoo.com.ar

** *Jefe Departamento Evaluación y proyectos Mineros Secretaría de Minería de Córdoba* jp.ferreiracenteno@gmail.com

Resumen

El agua de bajo pH es producida por un proceso natural en el que la percolación hídrica aeróbica por un sustrato que contenga sulfuro de hierro activa y promueve el desarrollo de bacterias específicas tales como el *Thiobacillus Ferrooxidans* y *Thibacillus Thiooxidans*.

El objeto de la presente ponencia es hacer un análisis crítico de los métodos que podrían aplicarse en el caso de drenajes ácidos de minas cerradas o abandonadas en América y ciertas recomendaciones sobre aquellas metodologías pasivas que parecen mas prometedoras, el involucramiento de la industria en lo que se llama, en general, el tratamiento de pasivos ambientales y algunas disquisiciones sobre el ahorro de recursos mediante el recupero de materiales.

**Acid mine drainage
Treatment Alternatives**

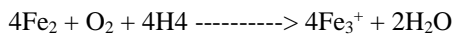
Abstract

The low pH water is produced by a natural process, in which percolation water aerobic a substrate containing active iron sulfide and promotes the development of specific such as bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* *Thibacillus* and *Thiooxidans*.

The purpose of this paper is to make a critical analysis of the methods that could be applied in the case of acid drainage from closed mines or abandoned in America and certain recommendations on those passive methods that seem more promising, the involvement of the industry in which It is called, in general, treatment of environmental liabilities and some disquisitions on saving resources through the recovery of materials.

Introducción

Las bacterias aeróbicas autotróficas interactúan electro bioquímicamente en la capa superior de átomos de los cristales de sulfuros de hierro en general y en particular de la pirita con lo que se produce una reacción muy conocida:



Esta reacción que es una sobre simplificación de un conjunto de procesos, logra la lixiviación de metales pues permite, al mismo tiempo, la acumulación de biomasa bacteriana en minerales y soluciones; obtener una fuerte oxidación de muchos sulfuros y producir un alto potencial redox en el medio.

Cualquier afloramiento con sulfuros de hierro que permita el acceso de agua en condiciones aeróbicas y ligero ph ácido incrementará la biomasa bacteriana y como subproducto se tendrá lo que llamamos un drenaje ácido.

Cuando este drenaje resulta favorecido en algún porcentaje por la actividad minera se denomina drenaje ácido de mina.

En la minería subterránea, de cuerpos cuya mena o ganga contenga sulfuros de hierro (pirita en particular), las probabilidades de poner en contacto estos minerales con agua en condiciones aeróbicas, es muy alta y, por ende, luego de un lapso de tiempo no muy prolongado se estará evacuando agua con valores de ph inferiores a 4.

Cualquiera de los inconvenientes o ventajas que pudieran presentarse por los drenajes ácidos de mina durante el tiempo de explotación y por ende de beneficio, son enfrentados por numerosos métodos que se mencionarán brevemente en este trabajo debido a que no constituyen mas que un inconveniente mas de los tantos que enfrenta la industria.

Por otro lado, cuando dichos drenajes se producen luego del cierre de las faenas mineras, estos, constituyen un problema completamente diferente:

- Comienzan a producirse o, a advertirse, luego de un largo período de inactividad de la mina y se han diluido todas las responsabilidades.
- A veces el período de inactividad es tan largo que ni siquiera se tiene registro de las faenas mineras cerradas.
- La acidez no constituye el único problema. La realidad demuestra que numerosos metales migran disueltos en los drenajes.

- Afectan aguas superficiales y subterráneas de toda la cuenca de diversos modos. En algunos casos, es una mera disminución del ph general, pero en muchos otros la carga de metales precipita en parte y en parte llega a plantas de potabilización o de adecuación de agua a otros usos.
- El problema excede límites jurisdiccionales y las responsabilidades y alternativas de acción se diluyen burocráticamente.
- Los fondos para la solución son insuficientes o las soluciones son solo paliativos momentáneos.
- Los métodos activos para eliminar el problema que se aplican durante la operación de la mina superan los presupuestos de los gobiernos locales que tienen que atenderlos luego de que la operación minera ha terminado.
- Los métodos pasivos cuyos costos son manejables, son muy variados y, existen opiniones contradictorias respecto a su utilización.

Reseña de tratamientos pasivos

Los tratamientos pasivos que se han desarrollado en estos últimos años no hacen sino emular de un modo explícito algunos de los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren en la naturaleza. Por otro lado, contrariamente a lo que pasa con los métodos activos, no requieren el aporte de sustancias químicas destinadas a producir tal o cual reacción ni en general ningún tipo de elemento mecánico o atención específica durante el tratamiento salvo los mecanismos de control y monitoreo.

Entre los procesos básicos que luego se combinan de algún modo se mencionan: los humedales artificiales (HA), los drenajes anóxicos en calizas (DAC o ALD en inglés anoxic limestone drains), los productores Continuos de alcalinidad (PCA o SAPS en inglés successive alkalinity producing systems), las piletas de caliza (PC), los canales de caliza (CC o OLC en inglés open limestone channels), Barreras reactivas permeables (BRP o PRB en inglés Permeable Reactive Barriers) y el tratamiento de arena calcárea (TAC)

Humedales artificiales

Se caracterizan por suelos saturados en agua o sedimentos de lagunas someras con vegetación adaptada a condiciones reductoras en la zona de sus rizomas. Por ende se construyen a los fines de imitar las condiciones de aquellos que cuyo éxito relativo se conoce.

Los procesos por los cuales se retienen metales en los humedales o pantanos son diversos y en orden de importancia se mencionan:

1. Formación y precipitación de hidróxidos metálicos
2. Formación de sulfuros metálicos

3. Reacciones de formación de complejos orgánicos
4. Intercambio con otros cationes de carga negativa
5. Toma directa de los metales por las plantas

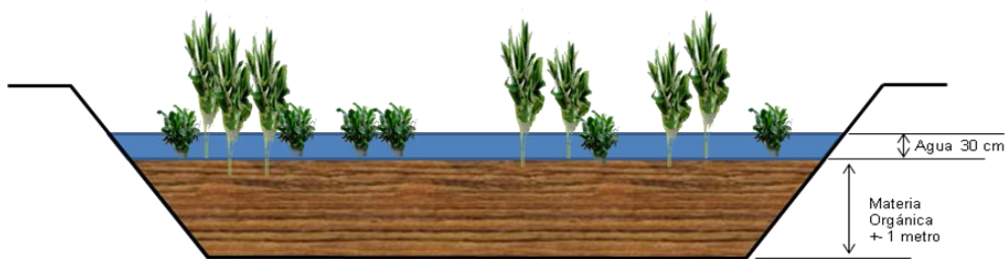


Fig. 1. Esquema de un humedal aeróbico



Fig. 2. Conjunto de humedales artificiales escalonados

Existen al menos dos tipos de humedales artificiales a saber:

Humedales Artificiales Aeróbicos

Este tipo de humedal o pantano artificial cuyo esquema básico se muestra en la figura 1 se basan en la existencia de un vaso con una base relativamente impermeable cubierta de materia orgánica de no más de 1m de espesor cubierta por una capa de agua de no mas de 30 cm de profundidad.

Generalmente se usan para lograr un tiempo de residencia y aireación del efluente de manera que los metales puedan precipitar.

Las plantas que se pueden ver tanto en las orillas como en el mismo humedal tienen la función de proveer materia orgánica y buen aspecto paisajístico.

En estos pantanos de gran extensión superficial y un flujo muy lento se produce la oxidación e hidrólisis de los metales que se depositan en el fondo.

Los factores que influyen en el éxito de estos humedales son, entre otros:

- La concentración de metal en el input
- Contenido de oxígeno disuelto
- PH y alcalinidad neta del agua
- Presencia de una biomasa bacteriana activa
- El tiempo de detención y tránsito del agua que contiene los metales a través del humedal.

De todos estos, el pH y la alcalinidad del agua son muy importantes debido a su influencia en la solubilidad de los hidróxidos metálicos que precipitan y la cinética de la oxidación y la hidrólisis de los mismos.

La hidrólisis de los metales produce acidez que es neutralizada por la alcalinidad del agua lo que permite la continuidad de la precipitación. Cada punto que baja el pH la oxidación inorgánica se reduce lo que es compensado por la oxidación orgánica.

La oxidación del manganeso ocurre a un pH mayor a 8 mientras que la acción microbiana cataliza esta reacción que se logra a un pH algo mayor a 6.

La precipitación de manganeso se inhibe cuando hay Fe^{+2} en el sistema por lo que se sabe que este fenómeno se producirá tan solo en las últimas fases de un humedal.

En suma, este tipo de pantanos artificiales es recomendable para contenidos de agua netamente alcalinos por lo que se verá que en su diseño se incluirán procesos que aumenten la alcalinidad como es el caso de drenajes alcalinos anóxicos que se describen brevemente mas adelante.

La oficina de minas del Servicio Geológico de los Estados Unidos ha promovido ciertos criterios para la determinación de la superficie de un humedal basado en lo que se usa en la industria del carbón. De este modo, se dice que los m^2 del humedal serán el resultado de dividir por 0.7 la carga ácida, expresada en galones por día. No recomienda este tipo de proceso cuando la acidez supere los 300mg/l y cuando el diseño se basa en la capacidad de remover hierro aplica $10g/m^2/día$.

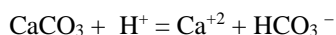
Humedales Artificiales Anaeróbicos

El esquema básico que se muestra en la figura 3 se basa en la existencia de un vaso de base relativamente impermeable con una cubierta de agua de no mas de 30 cm seguida de una capa de material orgánico de no más de 60 cm y una capa de carbonatos o calizas de no más de 25 cm de espesor.

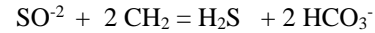
En estos casos se intenta que el agua pase a través de sustratos ricos en materia orgánica. Se puede contar con un lecho de caliza al fondo o mezclar la misma con el sustrato orgánico y las plantas del humedal se trasplantan directamente en el mismo.

Es obvio que este tipo de humedal se usa cuando el influente es netamente ácido por lo que la alcalinidad se genera directamente en el humedal y se contacta con el ácido previo a la precipitación de los metales.

Existe un mecanismo inorgánico para la producción de la alcalinidad como es el de la reacción de la caliza con la acidez de influente.



Por otro lado la acción bacteriana tal como la de *Desulfovibrio* o *Desulfotomaculum* que pueden utilizar el sustrato orgánico como fuente de carbono expresado como CH_2O .



Normalmente se debe esperar que exista una combinación de ambas.

Estos humedales tienen procesos de oxidación e hidrólisis de metales en las capas superficiales mientras que también se llevan a cabo mecanismos de reducción microbiana y química bajo la superficie que llevan a la precipitación de los metales y la neutralización del ácido.

El agua se infiltra a través de una gruesa capa orgánica cada vez mas anaeróbica debida a la alta demanda biológica de oxígeno.

La mayor parte de los procesos que se dan en los humedales aeróbicos, mejoran en éstos incluyendo la formación de sulfuros metálicos, la generación de alcalinidad debido a la acción biológica así como a la constante disolución de los carbonatos minerales. Esta formación constante de alcalinidad las hace aptas para el tratamiento de influentes netamente ácidos y altos contenidos de Fe.

A largo plazo, y no previendo un modo de agregar carbonatos, la alcalinización bacteriana adquiere una gran importancia.

Para el diseño se está usando un factor de contenido de Fe de $10 g/m^2/día$.¹

Análisis crítico

La bibliografía de los casos de estudio con el uso de humedales artificiales es abundante y, muchas veces, contradictoria.

Se dice que al menos un 80 a un 85 % del Fe proveniente de los DAM puede ser retenido en el fondo y en algunos casos absorbido en los rizomas de las especies que se plantan en estos pantanos.

¹ Ver referencia 1 en lecturas recomendadas

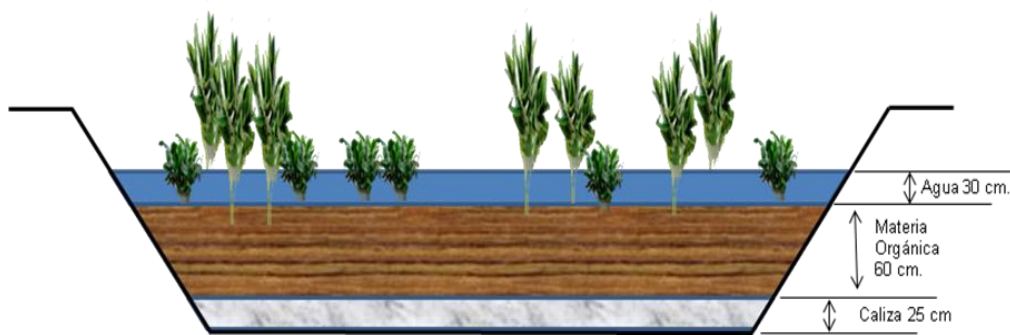


Fig. 3. Esquema de Humedal anaeróbico



Fig. 4. Algunas lagunas artificiales anaeróbicas

No existen reportes positivos en cuanto al Mn y si los hay en cuanto al Al. Todos los reportes coinciden en que la neutralización se mantiene durante mucho tiempo sin embargo la mayor parte de ellos reconoce que la continua precipitación satura los humedales y disminuye la biota necesaria para llevar adelante los procesos.

Esta saturación puede ocurrir luego de un par de años pero hay casos reportados en los cuales la calidad del DAM causa el problema en menos de 7 meses. La extensión de su vida útil suele lograrse por el agregado de agua orgánica donde se incluyen líquidos derivados de plantas cloacales.

Sin embargo cuando estos procesos se hacen más y más seguidos, el tratamiento puede llegar a dejar de considerarse “pasivo”.

La realidad es que la retención de sulfuros e hidróxidos de hierro en los humedales no esta bien comprendida en el largo plazo.

Una aproximación interesante es la del “sembrado” de microorganismos de tanto en tanto que reactivarían las características de los humedales pero no existen reportes definitivos respecto a esta iniciativa ni se conocen firmas que comercialicen algún producto estándar.

El tamaño de los humedales artificiales aeróbicos parece un inconveniente para el caso del relieve quebrado de muchas de las zonas mineras de cordillera por lo que el menor tamaño aparente de los pantanos anaeróbicos los haría mas recomendables, como puede verse en la foto de la foto de la figura 4.

También resulta conveniente advertir respecto a los cambios en el influente debido a cuestiones climáticas. Este es el caso de temporadas de lluvias intensas como ocurren en ciertos sectores de zona andina o el caso de los deshielos en el caso de cordillera en zona de Mendoza y San Juan en Argentina. La llegada de agua fresca

cambia totalmente la dinámica bioquímica del sistema por lo que conviene su estanqueidad respecto a inputs previsibles.

Drenajes anóxicos con calcáreos



Fig. 5. Esquema de un drenaje anóxico sobre caliza

La figura 5 ilustra el esquema en corte transversal de una trinchera rellena con material calcáreo con una cubierta de suelo de no más de 30 cm y un cobertor plástico de no más de 10 mm.

El agua entra así a la caliza en condiciones anóxicas de manera que ésta aumenta el pH y agrega alcalinidad. El hierro en el influente no se precipita sobre la caliza ni obtura los poros debido a que el Fe^{+2} no lo hace como hidróxido a pH inferior a 6.

Este tipo de tratamiento comenzó como un agregado anterior a los humedales naturales y artificiales como un modo de añadir alcalinidad ya que el Fe precipita a la salida del drenaje al encontrar condiciones aeróbicas.

En algunos casos se han usado como único tratamiento básicamente cuando el influente proviene de bocas de minas profundas con pH bajo y contenidos de Fe relativamente limitados.

Cuando existe una cantidad importante de Fe^{+3} o Al^{+3} se puede producir la precipitación de hidróxidos tanto de Fe como de Al y obturar los poros de la cama de caliza con lo cual el drenaje queda inutilizado.

Aún cuando la cantidad de los dos cationes sea menor se debe tener un especial cuidado en la velocidad de paso a través del drenaje.

En general se establece que si existe hierro férrico en el DAM a tratar o es demandante de oxígeno, no se podrían usar este tipo de tratamientos debido a que, en corto tiempo salen de operación.

El control de los mismos es relativamente simple ya que basta con tomar muestras a la salida y el pH no debería ser inferior a 5.5.

El otro punto importante es asegurar la estanqueidad del drenaje de modo de asegurar el paso del influente hasta el final del mismo en el volcamiento final o en el humedal artificial según sea el caso. Esto puede hacerse con el mismo material del cobertor en el fondo y paredes o con suelo compactado inerte o con contenido calcáreo tanto en paredes como en el fondo del canal de drenaje.

La figura 6 ilustra una forma constructiva sencilla en terreno quebrado que no es mas que uno o mas tubos de cemento de no mas de 60 cm de diámetro rellenos de caliza con una o varias salidas en su parte inferior. El DAM llega por medio de un canal superior A, que puede estar cubierto o un tubo para asegurar la anóxia, saliendo alcalinizado por la parte inferior B.

Análisis crítico

Este sistema de caños enterrados sería una opción barata e interesante para el caso de ciertos sectores andinos donde además se puede limitar la limpieza circundante y la tala de especies en peligro.

Del mismo modo que ocurre para otros de estos sistemas, no parece existir impedimento alguno para que, al menos el caso de los drenajes anóxicos verticales puedan ser construidos en interior mina aprovechando parte de las labores existentes en puntos anteriores a la salida de los DAM, dejando para la superficie tan solo las lagunas de decantación y precipitación de metales contenidos.

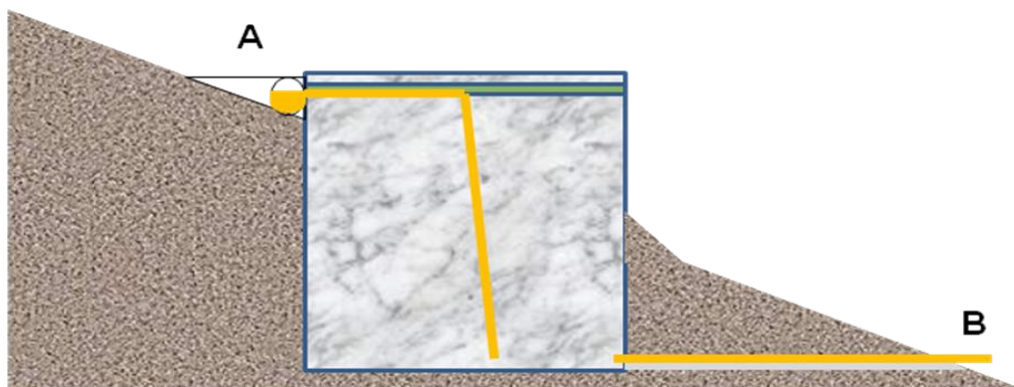


Fig. 6. Drenaje anóxico vertical

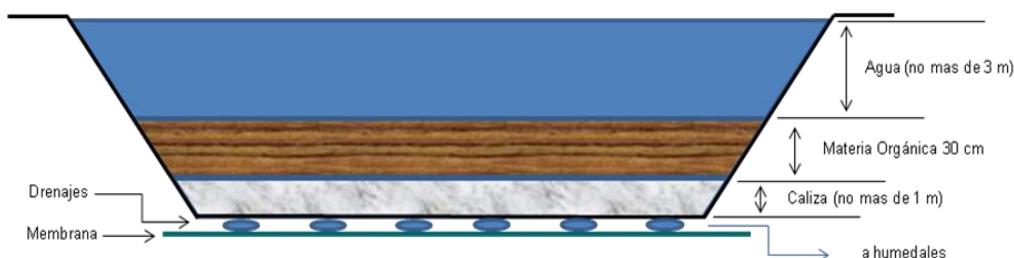


Fig. 7. Esquema de un PCA

Productores Continuos de alcalinidad

Este tipo de sistema resulta de la combinación de los Drenajes Anóxicos en Caliza (DAC) con un substrato orgánico.

En este caso el agua acidulada proveniente de la mina se acumula en un vaso de humedal de manera que de pelo de agua hasta el fondo orgánico no haya más de 3 m de profundidad. Este fondo de compuesto orgánico no supera los 30 cm de altura y se apoya sobre un fondo de roca carbonática de no más de 1 m de espesor.

Por debajo del humedal se ubica una serie de drenajes que recorren el fondo sobre una membrana impermeable por donde sale el efluente neutralizado.

El agua proveniente de este humedal es conducida a una o a una serie de humedales aeróbicos donde precipitan los metales contenidos aún en el líquido.

El substrato orgánico contribuirá al consumo del oxígeno en el agua y al paso de hierro férrico a ferroso.

La granulometría y el empaquetamiento de la caliza así como el diámetro de los drenajes debe tener un ajustado diseño de manera de evitar que la precipitación de Fe y Al obturen el paso del agua.

Los DAM con alto Al y Fe pueden llegar a necesitar un sistema de mantenimiento que lave la caliza y los drenajes por circulación de agua a presión con lo cual un sistema “pasivo” pueda llegar a no serlo tanto.

Si bien las aplicaciones que muestra la bibliografía son humedales externos nada impide el aprovechamiento de galerías y cámaras cercanas a la superficie de salida dejando tan solo el sistema de humedales aeróbicos de precipitación de metales en la parte externa.

La figura 7 ilustra el esquema típico de construcción de este tipo de humedales donde es de destacar, como en todos los demás el costo de excavación y el uso de terreno superficial.

Análisis crítico

Con relativamente poco esfuerzo se puede ahorrar terreno superficial ubicando el PCA en una zona interna de la mina que sea colectora de los DAM en la parte que salen al exterior sea el caso de una salida única o de varias.

Se menciona la posible necesidad de incluir algo de caliza en el mismo substrato orgánico para ayudar en el proceso de alcalinización y se indican ciertas dificultades en la precipitación tanto de Al como de Fe anteriores a los humedales aeróbicos destinados para ello.

El problema principal radica en un cambio en las condiciones químicas del DAM donde se manifieste un crecimiento en Fe^{+3} o Al^{+3} que precipiten y cubran la caliza impidiendo su acción, cosa que se manifestará debido al mantenimiento o poco cambio en el pH del drenaje.

Piletas de Caliza (PC)

Este es uno de los procesos pasivos mas simples ya que constituye en un estanque excavado como para contener un espesor no mayor de 1 metro de caliza sobre la que se vierte el DAM que escurre a través de la misma neutralizándose y escurriendo por los drenajes de fondo a las piletas de decantación y precipitación.

Además de las sencillez constructiva que puede aplicarse en interior mina sin mayores problemas, la ventaja de este tipo de proceso está en que cualquier operador puede darse cuenta de la disolución de la caliza y proceder a su agregado o puede observar la formación de precipitados de hidróxidos de Fe o Al y proceder manualmente a la rotura de de los mismos reavivando la circulación a través de la caliza.

Análisis Crítico

Se debe recordar, sin embargo, que no podrán ser usados con DAMs conteniendo Fe^{3+} o Al^{3+} debido a que estos precipitarán de inmediato obturando los poros e inutilizando el sistema en poco tiempo.

La solución en estos casos es la revisión constante del estado del substrato calizo para proceder a la fragmentación de las capas de hidróxido que impidan su trabajo. Esto sin embargo agrega un costo de personal, movilización y traslado en una cierta periodicidad mas corta que la que se prevé cuando ninguno de estos cationes está presente.

Canales de caliza (CC)

Este es, probablemente, el método más simple de alcalinización de un DAM ya que consiste en un canal que no supera el metro de ancho y no más de 30 cm de profundidad de manera que paredes y fondo se encuentran cubiertos con roca carbonática.

No se trata de una colocación manual, es decir no se trata de un canal revestido con placas, teselas o mosaicos de carbonato sino el simple agregado de material calcáreo de una granulometría suficiente para que se sostenga en el talud de los costados del canal.

El proceso de alcalinización se logra sencillamente por la circulación del DAM por dicho canal y la disolución de la caliza.

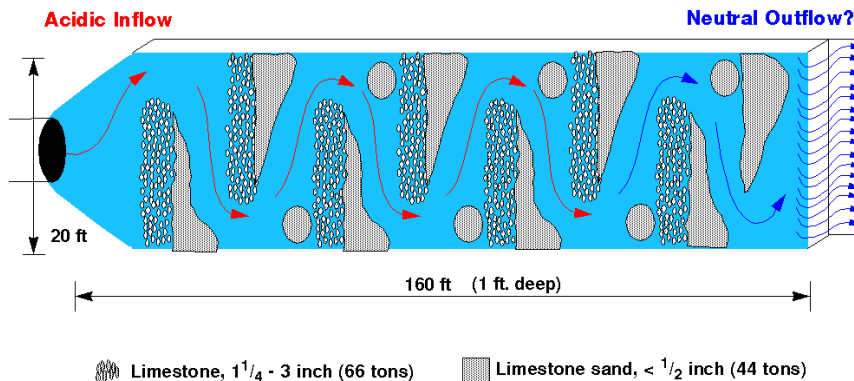
El parámetro de diseño fundamental es la velocidad y por ende la pendiente. La circulación debe ser tal que asegure la disolución del carbonato pero, al mismo tiempo que impida la precipitación de películas de hidróxidos que anulen el proceso.

Existen algunas recomendaciones en la bibliografía que hablan de una pendiente del 20 % mas menos 2 %, sin embargo existen varios ejemplos con pendientes mucho mayores.

El otro parámetro sea probablemente el largo del recorrido que terminará en una pileta o humedal de decantación y precipitación de los metales contenidos en el DAM.

Este parámetro puede calcularse con cierta facilidad en pruebas simples de laboratorio con modelos a escala. Se han registrado disminuciones de acidez del 62 % en tan solo 11 m de canal con una pendiente del 45 % y otros casos donde la disminución ha sido tan solo del 36 % en 49 m de largo con una pendiente del 20 %.

Open Limestone Channel



Es obvio que en interior mina existen condiciones óptimas para la construcción de este tipo de canales y es muy probable que la mayoría de las faenas permitan la construcción de los piletones de precipitación y decantación antes de que el DAM neutralizado y libre de cationes llegue a la superficie.

El mantenimiento del canal es relativamente simple con el agregado de caliza en el momento que sea necesario o aún la rotura a mano de aquellos sectores con películas aislantes de hidróxidos precipitados.

Análisis Crítico

La construcción de este tipo de elementos en interior mina, como todos los anteriores, es muy interesante desde el punto de vista que libera espacio en superficie y esto es mejor para el ambiente, sin embargo, obliga a tener en cuenta la estabilidad de las faenas mineras afectadas por el proceso y por ende, y por ende, deben mantenerse las revisiones y reparaciones de todas las condiciones de seguridad correspondientes al laboreo subterráneo.

Otro parámetro interesante está dado por el proveedor de alcalinidad y la pureza del material. Un aumento en la pureza hará lo propio con los costos y una disminución probablemente tenga su correlato con el rendimiento.

En el laboratorio de la Secretaría de Minería de Córdoba se está comenzando a experimentar con otras fuentes de calcio como el caso de la Wollastonita (Silicato complejo de calcio) que parece ofrecer ventajas comparativas con el carbonato de calcio.

Barreras reactivas permeables

No resulta nada raro que en la zona peri cordillerana y cordillerana, las faenas mineras se encuentren por encima de zonas de conos de deyección o de detritos permeables.

Es posible entonces que las labores inferiores drenen hacia estos sectores más permeables como DAMs.

La barrera reactiva permeable no es otra cosa que un cierto espesor de material permeable ubicado en la dirección de la corriente subterránea de material no deseable interpuesta antes de que este llegue al sistema hídrico natural.

El esquema de la figura 8 muestra el caso de un conjunto de labores en altura abandonadas y de difícil acceso cuyos DAM ingresan a un cono de deyección y afectan los acuíferos que se originan en el mismo.

En la posición B del esquema, es posible construir una barrera donde el acceso tanto para el proceso constructivo como para el monitoreo y cualquier intervención posterior resulta mucho más cómodo.

La construcción de una barrera es relativamente sencilla ya que se trata de una excavación que atraviese la pluma de drenajes no para retenerlos sino para que pasen a través de ella.

Se reconocen dos formas posibles:

- **Barrera continua:** En este caso la excavación tiene el largo suficiente para cubrir todo el acuífero afectado.
- **Barrera reconducida:** Se trata de un elemento impermeable tanto de H^o como de suelo consolidado que cuenta con puertas permeables que constituyen la verdadera barrera reactiva por donde la pluma afectada es reconducida.

Elementos agregados o de control son tanto los piezómetros anteriores y posteriores a la barrera así como las perforaciones de muestreo anteriores al mismo.

Existen una serie de condiciones referidas al relleno de la excavación que es en suma la barrera:

- **Reactividad:** Se espera que el material sea suficientemente reactivo con el efluente para asegurar el menor tiempo de residencia
- **Estabilidad:** Es deseable que el material permanezca reactivo durante mucho tiempo dado que su reemplazo no resulta una tarea sencilla. Se espera además que esta estabilidad se mantenga aún con cambios en las condiciones del efluente, el clima o la carga hidráulica.
- **Disponibilidad y costo:** Es obvio que este es un elemento a tener en cuenta ya que no disponer de, por ejemplo, wollastonita o autunita en cantidad y costos aceptable derivará el diseño a elementos más aceptables como calizas o calcarenitas si éstas estuvieran disponibles en la zona.
- **Comportamiento hidráulico:** Es obvio que la permeabilidad deberá ser mayor que la del acuífero que se intercepta o al menos igual y el tramo a atravesar con ese coeficiente de permeabilidad deberá ser tal que asegure la reacción de todo el efluente con el reactivo
- **Compatibilidad ambiental:** La reacción no debe producir subproductos que resulten ser una fuente de afectación el medio en sí mismos.
- **Seguridad:** El material reactivo debe ser seguro a la manipulación.

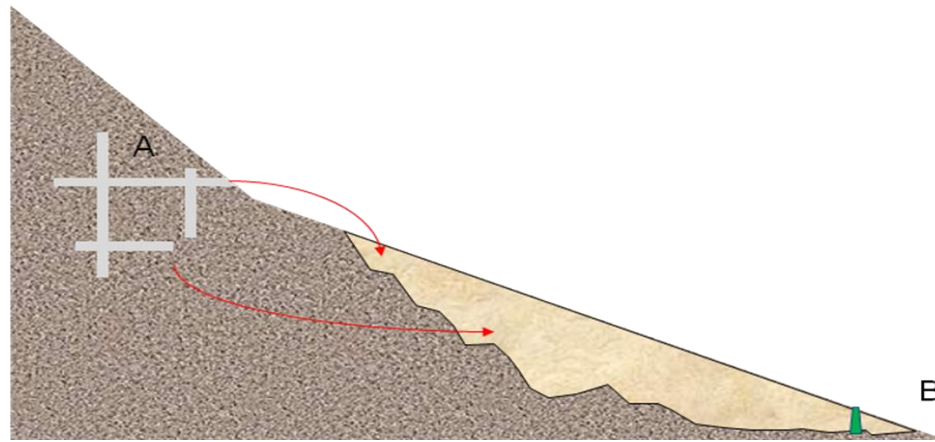


Fig. 8. Esquema de uso de una barrera

Análisis Crítico

En el caso particular que se plantea, que resulta bastante común para Sudamérica, este mecanismo resulta mas que interesante y su diseño y construcción puede ser llevada adelante por gobiernos locales en aquellos casos que las faenas mineras se encuentren abandonadas.

Como suele ocurrir en otros casos puede resultar importante la instalación de lagunas de decantación y precipitación de metales a seguir de la barrera.

Tratamiento de arena calcárea

En este caso una cierta cantidad de carbonato molido a malla (arena gruesa entre 1mm y 2mm) se vierte sobre los arroyos que reciben el DAM de forma que este agregado carbonático alcalinice la corriente a lo largo de su curso.

Análisis Crítico

Si bien se menciona como un proceso pasivo no es otra cosa que un paliativo para los casos en los que tan solo se desea la neutralización y la precipitación final de hidróxidos insolubles es un problema.

Una metodología similar aunque usando líquido se ha usado en la zona de Elliot Lake (Notario – Canadá) con los DAM originados por los diques de cola.

En este caso un depósito ubicado cerca de la corriente de agua que recibe el drenaje ácido contiene un recipiente de agua de cal (agua de cal apagada) que se vacía por medio de un caño con un caudal adecuado a la reacción que se desea. Este recipiente se llena de líquido de manera periódica del mismo modo que se debe arrojar arena calcárea a la corriente cada cierta cantidad de tiempo.

Estos procesos de mantenimiento pueden ser programados pero pueden precipitarse debido a los resultados de los análisis que se lleven a cabo y que aconsejen una intervención. Si bien el sistema puede calificarse como pasivo, requiere, como se ve, cierta cantidad de acción del personal a cargo que sube los costos de operación que son el item más interesante de este tipo de procesos.

Árbol de decisión

El siguiente gráfico extraído y modificado de Hedin et al, 1994 muestra un flujo de decisiones posibles atendiendo al tipo de drenaje que podría encontrarse a la salida de un conjunto de faenas mineras subterráneas, que es el objetivo del presente aunque es perfectamente aplicable al DAM de cualquier origen.

En este cuadro se reconocen los estudios necesarios en cada etapa, los procesos recomendables y la combinatoria posible.

Comienza el flujo reconociendo los parámetros de diseño:

Caudal: Si existiera una sola boca de salida este estudio no presentaría en general ningún tipo de problemas.

Sin embargo resulta bastante común que, un conjunto de labores mineras subterráneas avenen la carga hídrica por numerosas bocas y aún por sectores no trabajados.

Importa entonces reconocer el caudal total así como su distribución y el modo en el que los líquidos se agrupan y hacia donde derivan.

Si los DAM derivan hacia más de dos corrientes naturales aún cuando luego se junten será necesario tener en cuenta tratamientos separados o las obras complementarias de captación y reconducción unificada.

Si los costos de obras complementarias de unificación de inputs son muy elevados en comparación con la ejecución de facilidades de tratamiento por separado, se deberá tener en cuenta la necesidad de caracterizar tanto la química como la carga en suspensión de los influentes a cada sector de proceso por separado.

Se hace referencia al caudal del DAM antes de entrar al sistema natural con posible uso inmediato. En el caso planteado para el uso de Barreras Reactivas Permeables, el caudal de diseño se debe reconocer en los lugares aguas arriba del sitio de descarga al sistema superficial. Es decir que la medición del caudal a la salida de mina antes del ingreso al cono de deyección es poco menos que inútil.

Caracterización Química: Este estudio debe incluir al menos los siguientes aspectos:

Acidez: Si bien el pH es una medida bastante común para la expresión de la acidez o alcalinidad, en este trabajo se prefiere medir la acidez en COCa equivalente es decir en la cantidad de carbonato necesario para neutralizarla.

La tabla 1 extraída de Aduvire et al², establece una interesante clasificación de la acidez de un DAM con lo cual será posible ingresar al flujograma de la figura 8. Gracias a esta tabla se puede decir que los tipos 1 a 3 corresponden a la rama de las aguas netamente ácidas y los tipos 4 y 5 a la tipología netamente alcalina en el flujograma de la figura 8.

Demanda de oxígeno (DO): Se refiere a la demanda total de oxígeno disuelto expresada en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l). Aunque la mayor demanda de oxígeno será posiblemente de tipo químico no de be descartarse la demanda biológica y es conveniente hacer ambas determinaciones (DQO y DBO) por separado y sumar los resultados.

Carga química: Se hace referencia a los metales de carga en el DAM, en particular Fe⁺³ y Al⁺³, aunque no se debe dejar de reconocer el resto de los elementos que pueden estar incorporados tales como Cu, Cd, etc. El flujograma de la figura 8 permite la selección de un tipo de proceso o tratamiento o combinación pero la existencia de otros metales requerirá un ejercicio de diseño extra basado en ensayos de laboratorio muy bien acotados.

² Artículo sin mayores referencias en WEB, corresponde a la lectura recomendada 2

Algunos ejemplos interesantes

Mina La Mejicana (Argentina): Esta mina fue explotada por métodos subterráneos fundamentalmente durante el siglo XIX y en ella todavía existe un cable carril que llevaba mineral de Au, Ag y Cu a Chilecito (pequeño Chile) con un recorrido de mas de 34 km y un desnivel de mas de 3100 m.

Como puede verse en la fotografía de la figura 9, la zona de explotación se encuentra en un escudo de oxidación que desemboca en el Rio Amarillo. Este río tiene en las cercanías de la mina y por ende en su nacimiento un pH de 3, con aproximadamente 1200 ppm de Fe, y cerca de 3000 ppm de S. Se menciona la presencia de As, Mo, Cu, Pb y Zn y se menciona por otro lado que la carga de Fe y de S disminuye a 1.2 ppm y 160 ppm respectivamente al llegar a la zona baja.

Esta mina está en estudio para su reactivación en la actualidad y resulta impensable tal cometido si no se tienen en cuenta en el proyecto todos los mecanismos pasivos para el tratamiento de estos drenajes que se están produciendo tanto de la mina como del escudo de oxidación circundante.

Sin tener en cuenta la necesaria caracterización de los posibles DAM de la mina así como de la predicción de su caudal es posible que un proceso de Barreras Permeables Reactivas sea el mejor modo de lidiar con este problema, combinados con un conjunto de lagunas de decantación.

Existen otras alternativas interesantes como los canales de caliza en interior mina que podrían construirse sin mayores inconvenientes.

Mina Wheal Jane (UK): Explotada básicamente por Sn, fue cerrada en 1991 y sus labores se inundaron completamente. Uno de los cierres falló en 1992 y con ello mas de 50000 m³ de agua ácida se volcaron al medio.

El conjunto de procesos construido en 1994 consiste en una combinación de drenajes aeróbicos y anóxicos en caliza seguidos de un filtro especial de caliza y de lagunas de decantación.

De este modo el pH de aproximadamente 3 en el input se elevaba por etapas a 4.5, 5, y 6.8 a la salida del filtro y entrada a las lagunas de decantación. Mientras que el Fe pasaba de 161.3 mg/l a 0.4 mg/l al entrar a las lagunas finales y el sistema.

Este complejo sistema se llevó adelante además teniendo en cuenta aspectos geográficos estéticos que armonizan con la región.

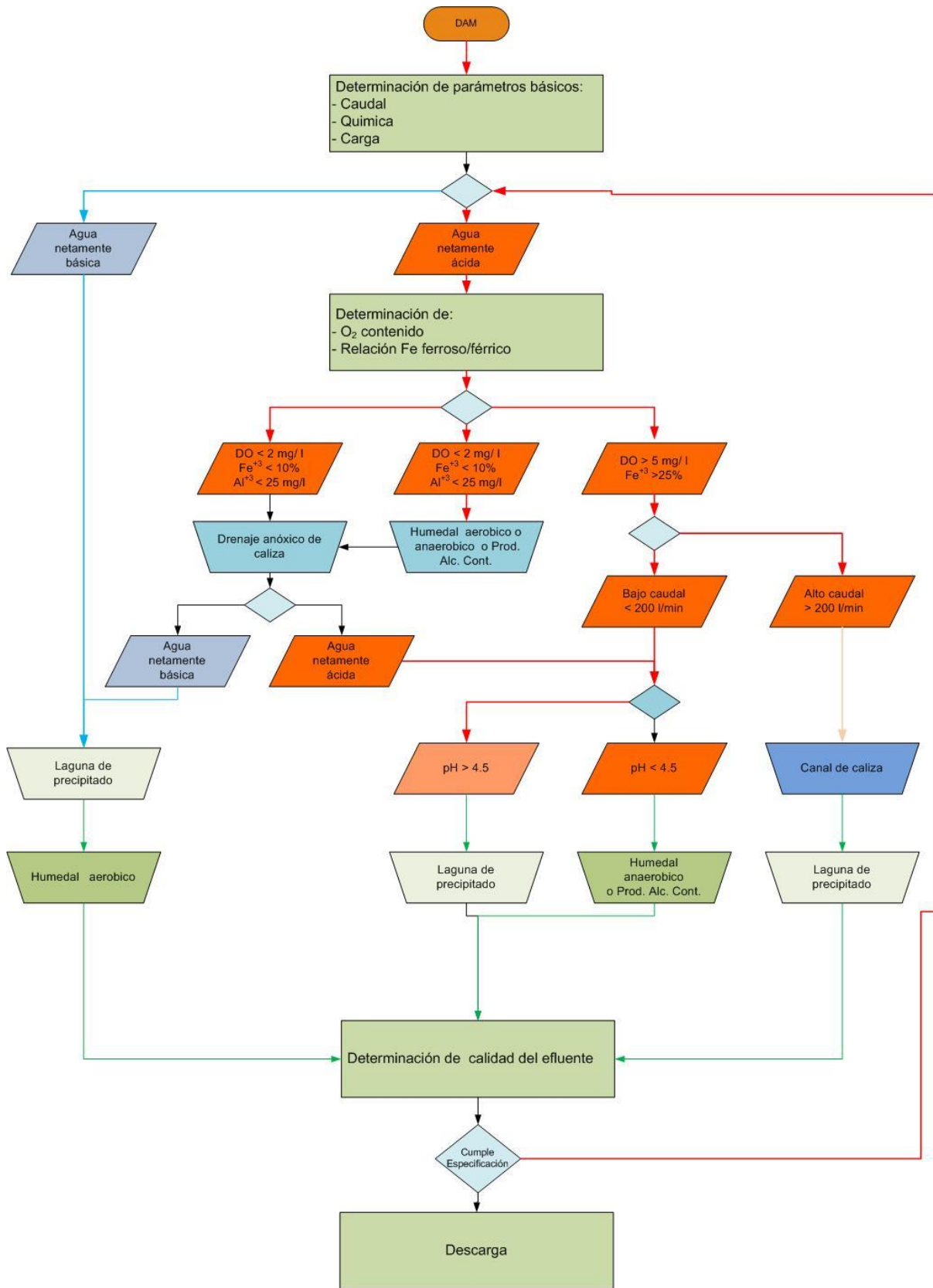


Fig. 8. Flujoograma de decisión extraído y modificado de Hedin et al, 1994.

Tabla 1. Clasificación de DAMs según acidez (Basado en Aduvire et al.)

Tipo	Descripción	Rango
1	Muy ácido	Acidez neta > 300 mg/l de CO ₃ Ca equivalente
2	Moderadamente ácido	Acidez neta entre 100 y 300 mg/l de CO ₃ Ca equivalente
3	Débilmente ácido	Acidez neta entre 0 y 100 mg/l de CO ₃ Ca equivalente
4	Débilmente alcalino	Alcalinidad neta < 80 mg/l de CO ₃ Ca equivalente
5	Fuertemente alcalino	Alcalinidad neta mayor o igual a 300 mg/l de CO ₃ Ca equivalente



Fig. 9. Vista desde la mina La Mejicana.



Fig. 9 Mina Wheal - Aspecto del derrame en el Rio Carnon

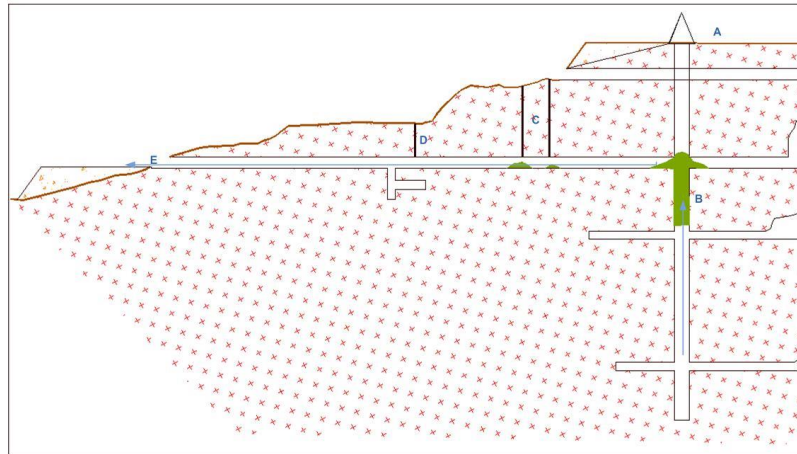


Fig. 10. Mina Lilly/Orphan Boy adaptado de EPA – MWTP 2004 .

Mina Lilly/ Orphan Boy Montana (USA): Explotada básicamente por Pb, este emprendimiento dejó de operar en 1950. Es una región de abundante cantidad de nieve con derretimientos en primavera que producen grandes crecidas.

El agua presenta un nivel estático ubicado en la galería E (fig. 10) por donde vierte al ambiente un caudal promedio de 11 l/min con ciertas cantidades de Al, Cd, Cu, As, Mn, Fe, Zn y sulfatos en general así como una acidez de pH 3.

La US Environment Protection Agency diseñó un sistema que fue finalmente construido y que consiste en un biorreactor que se ubica “colgado” en el pique principal B por medio de una serie de cables que se sostienen desde la boca A. Este biorreactor es básicamente un substrato de materia orgánica (básicamente aserrín y guano de vaca) que mantiene una población de bacterias sulforeductoras.

A los fines de agregado de materia orgánica se han perforado los pozos C y se ha hecho lo propio con el pozo D como punto de control de efluente.

Los resultados son mas que interesantes en cuanto a que el efluente saliendo en E está neutralizado y la cantidad de metales disueltos es la permitida por las regulaciones ambientales.

Lo mas interesante de este caso es el hecho que la instalación es en interior mina y que se previeron los métodos para el agregado de substrato orgánico sin necesidad de acceder al pique principal.

Es posible que una barrera permeable reactiva ubicada al pie de la escombrera que nace en la salida del agua en E, hubiera dado también buenos resultados aunque el hecho de que se produzcan crecidas estacionales en la primavera podrían haber dificultado su diseño.

Conclusiones

Los tratamientos pasivos para los drenajes ácidos de mina constituyen una alternativa válida para la solución del problema que se presenta en Sudamérica.

Si bien es cierto que su aplicación es mucho mas barata cuando se prevé y se ejecuta durante el tiempo de operación minera, no exige demasiado a los presupuestos locales y regionales donde los gobiernos locales y la comunidad deben lidiar con esta situación heredada.

Los DAM provenientes de laboreo subterráneo propiamente dicho, sea en forma directa de las faenas o de sus escombreras admiten tratamientos pasivos en interior mina en la medida que su aplicación no implique revisiones y mantenimiento posterior a la instalación.

Estudiar tratamientos pasivos en interior de mina constituye además una alternativa muy interesante en los casos de escasez de terreno de relieve moderado o condiciones climáticas extremas con mucha precipitación de agua y crecidas.

Las barreras reactivas permeables constituyen una solución simple y relativamente económica de regiones minadas que aportan DAM en las cabeceras de los

Lecturas recomendadas

ADTI Handbook - ACID DRAINAGE TECHNOLOGY INITIATIVE. 1998

Aduvire H., Vadillo L., Aduvire O. Innovaciones en la caracterización de Aguas Ácidas de minas y su tratamiento con tecnologías ecológicas.

Ehrlich H. L, Geomicrobiology. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York. 2001

Doshi S. M. Bioremediation of Acid Mine Drainage using sulfate-reducing bacteria. U.S. Environmental Protection Agency. 2006.

Hedin, R. y Nairn, R. Designing and sizing passive mine drainage treatment systems. In: Proceedings, Thirteenth West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, April 8-9, 1992, Morgantown, WV.

Hedin, R.S., R.W. Nairn, and R.L.P. Kleinmann. 1994. Passive treatment of coal mine drainage. USDI, Bureau of Mines Information Circular IC 9389. Pittsburgh, PA.

Interstate Technology & Regulatory Council Permeable Reactive Barriers Team. Permeable Reactive Barriers – Lessons learned / New Directions. 2005

Ruiz-Oriol Macián, Concepción Caracterización de los procesos de eliminación de metales de aguas ácidas utilizando magnesia caústica. Aplicación al tratamiento in situ Universitat Politècnica de Catalunya, 2004