

# Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera



Biblioteca Sernageomin



029889



GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE MINERÍA  
SUBSECRETARÍA DE MINERÍA



CONSEJO  
MINERO

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA  
CONSEJO NACIONAL DE PRODUCCIÓN LIMPIA

11058  
c.2

Disño y producción: mida@omunicación  
IMPRESIÓN: GRAMA S.A.

QUERDO MARCO DE PRODUCCIÓN LIMPIA SECTOR GRAN MINERÍA  
BUENAS PRÁCTICAS Y GESTIÓN AMBIENTAL

Noviembre 2002

## 1. Introducción

La alta concentración de la actividad minera en Chile y los impactos ambientales propios de la actividad conllevan a grandes desafíos en cuanto a su sustentabilidad, que comprenden cómo extraer en forma eficiente los minerales de interés, minimizando los impactos al medio ambiente.

La implementación de medidas de producción limpia en el desarrollo, la operación y el cierre de una faena minera, significa básicamente, establecer prácticas preventivas tendientes a evitar o minimizar la generación de residuos y emisiones al medioambiente y utilizar en mejor forma los recursos disponibles, para así mejorar la productividad, competitividad y sustentabilidad de la industria minera chilena.

Con este enfoque nació el Acuerdo Marco de Producción Limpia (AMPL), firmado el 27 de noviembre del 2000, entre los organismos públicos con competencia ambiental y el Consejo Minero A.G, que agrupa a las principales empresas del sector de la gran minería, bajo la coordinación de la Subsecretaría de Minería, con el compromiso de estudiar seis temas de interés común, entre ellos el "Potencial de Generación de Aguas Ácidas en Chile".

El Grupo de Trabajo dedicado al tema del drenaje ácido ha contado con la participación de profesionales del sector público relacionados con recursos naturales, salud y minería y de empresas mineras. Se reconoce la importancia del tema por los efectos de largo plazo que el drenaje ácido ha presentado en diversos lugares del mundo, y la necesidad de que el tema sea ponderado adecuadamente en Chile, sobre la base de un conocimiento científico sólido, evitando la discusión sobre la base de causas y efectos supuestos.



Esta "Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera", es una herramienta orientada a profesionales y especialistas del sector público y privado para facilitar el diseño de proyectos y el manejo de las operaciones mineras mediante la predicción, control y/o tratamiento del drenaje ácido y así reducir los efectos y posibles impactos al medio ambiente. Además está dirigida principalmente al drenaje ácido directamente asociado a la actividad minera, o sea, el escurrimiento de soluciones sulfatadas ácidas desde minas y acumulaciones de estériles, minerales o relaves.

En el análisis del fenómeno de drenaje ácido, es importante tener presente, que las faenas mineras,

están localizadas en distintas áreas geográficas de nuestro país, que presentan una gran variabilidad de climas y condiciones geológicas/mineralógicas a lo largo de Chile, lo que impide hacer una generalización representativa de este fenómeno. Así, aún cuando el drenaje ácido tiene características similares en todos los lugares, es necesario considerar caso a caso los diferentes factores geológicos, hidrológicos y mineros que influyen en la generación del drenaje ácido.

Específicamente, la Guía revisa la aplicabilidad a las faenas mineras en Chile, de diferentes metodologías de evaluación de riesgos y prácticas de predicción, control y/o tratamiento del drenaje ácido utilizadas en otros países.

## 2. Conceptos Generales

### 2.1 DEFINICIÓN DE DRENAJE ÁCIDO

El drenaje ácido es el escurrimiento de soluciones ácidas sulfatadas, frecuentemente con un contenido significativo de metales disueltos, resultado de la oxidación química y biológica de minerales sulfurados y de la lixiviación de metales pesados asociados. Las reacciones de oxidación ocurren en forma natural, y se aceleran por el aumento de exposición de la roca al oxígeno y al agua y por la acción catalizadora de algunas bacterias.

Generalmente, el drenaje ácido está caracterizado por pH bajo (valores de pH entre 5 y 1,5); asociado a una acidez creciente en el tiempo y una alcalinidad decreciente, y por concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales (SDT); de sulfato ( 2.000 mg/L), de hierro y otros metales. En algunas circunstancias, donde existen minerales no sulfurados pero solubles, o en presencia de algunos reactivos específicos como el cianuro, pueden encontrarse niveles elevados de metales disueltos en efluentes no ácidos.

Las soluciones de drenaje ácido frecuentemente presentan un color café rojizo atribuido al ión Fe (III); sin embargo, también puede aparecer un color azul verdoso en el caso de que el hierro disuelto se encuentre en estado Fe (II), el cual tenderá a oscurecerse por oxidación a Fe (III), a medida que esté expuesto al oxígeno del aire. El drenaje ácido contiene en suspensión productos de reacciones de precipitación asociadas a los iones disueltos, que le pueden dar distintos colores a la solución. Usualmente, cuando el escurrimiento de drenaje ácido es aireado, se forman manchas café rojiza en los cauces y canales del drenaje.

2.2. DEFINICIONES CLAVES

a) Drenaje ácido de minas (DAM) / Drenaje ácido de rocas (DAR)

DAR.- Fenómeno de generación de aguas ácidas, producido por procesos de oxidación de rocas (principalmente oxidación de sulfuros) en cualquier ambiente. Existe en el medioambiente sin actividad minera.

DAM.- Fenómeno de generación de aguas ácidas, asociado a la explotación de yacimientos minerales.

b) Efecto ambiental/Impacto ambiental

Efecto ambiental.- Reacción, influencia o condición ya sea natural o antropogénica. Es general y no requiere de un receptor.

Impacto ambiental.- Alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada, es decir, es específico de cada caso y requiere un medio de transporte (agua superficial o subterránea, aire, organismos, camiones etc.) y de un receptor (agua potable, población, cuerpo de agua, fauna y flora).

c) Prevención / control

Prevención.- Preparación y disposición que se hace anticipadamente para evitar las emisiones al aire, descargas de líquidos y/o la generación de residuos al medio ambiente, que puedan generar un efecto negativo.

Control.- Acciones y medidas tomadas para que el efecto negativo asociado a un determinado residuo o emisión al medio ambiente se mantenga dentro del rango establecido y no llegue a ser un impacto al medioambiente.

d) Protección del Medio Ambiente / Preservación de la Naturaleza

Protección del Medio Ambiente.- El conjunto de políticas, planes, programas, normas y acciones destinados a mejorar el medio ambiente y a prevenir y controlar su deterioro.

Preservación de la Naturaleza.- El conjunto de políticas, planes, programas, normas y acciones, destinadas a asegurar la mantención de las

condiciones que hacen posible la evolución y el desarrollo de las especies y de los ecosistemas del país.

2.3 FUENTES, MECANISMOS Y ETAPAS DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO

Las fuentes principales de drenaje ácido son:

- Botaderos de material estéril (< 0,2 % Cu). Actualmente en Chile, se generan más de 3.000.000 ton/día.

- Botaderos de sulfuros de baja ley (0,2 % < Cu < 0,4%).

- Relaves y eventuales derrames de concentrados.

En Chile se generan 650.000 ton/día de relaves de flotación.

- Extensas zonas fracturadas ("cráter") que se forman en la superficie sobre las minas subterráneas explotadas por hundimiento.
- Grandes rajos de la minería a cielo abierto.
- Finalmente, se debe considerar como fuentes potenciales: las rocas de construcción -rellenos, embalses, carreteras, aeropuertos; y cualquier otro mineral sulfurado expuesto al aire y agua, ya sea en fuentes naturales o en una explotación minera.

Los minerales sulfurados son de ocurrencia común en el ambiente geológico, pero se encuentran principalmente en rocas que yacen debajo de una capa de suelo y, a menudo debajo de la napa freática. Estos minerales se ven expuestos constantemente al oxígeno y al agua por procesos naturales, como la erosión y la actividad tectónica.

Bajo condiciones naturales, el suelo que cubre la roca y la presencia de agua subterránea minimizan el contacto de los sulfuros con el oxígeno, permitiendo así que la generación de ácido prosiga a una velocidad tan baja que el efecto sobre la calidad general del agua será insignificante o indetectable. Sin embargo, bajo condiciones antropogénicas, tales como obras civiles, construcción de vías, y en especial por la actividad minera, se acelera la velocidad de generación de drenaje ácido, ya que este material sulfurado se

fractura por las explotaciones y extracciones del mineral; y pasa a la superficie proveniente del ambiente subterráneo no reactivo. Con el pasar del tiempo, el contacto del agua y del oxígeno con las rocas y los desechos sulfurados, tales como ganga y rocas quebrantadas, puede crear charcos ácidos en que se disuelven o quedan suspendidos los metales pesados.

La generación de drenaje ácido se desarrolla en general siguiendo tres etapas en el tiempo, caracterizadas por el pH del agua en el microambiente de los minerales sulfurados. Estas tres etapas permiten comprender la evolución del drenaje ácido en el tiempo y su interpretación en el campo (Figura 1). El Cuadro 1 representa las etapas del drenaje ácido y sus mecanismos de reacción:

Etapas del drenaje ácido	Mecanismos
Etapa I	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los minerales sulfurados, principalmente pirita (bisulfuro de hierro(FeS<sub>2</sub>)), son oxidados químicamente por el oxígeno del aire, que es el oxidante principal. El producto de esta reacción de oxidación es sulfato (SO<sub>4</sub>)<sup>-2</sup>, hierro ferroso (Fe<sup>+2</sup>) y protones (H<sup>+</sup>), los cuales generan acidez.</li> <li>• En el rango normal de pH de suelos y agua (pH 5-7) los metales liberados por el desgaste de minerales generalmente precipitan y están relativamente inmóviles, debido a que los minerales alcalinos como la calcita (CaCO<sub>3</sub>), presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez y originan la oxidación y precipitación del hierro como óxido o hidróxido.</li> <li>• A medida que los minerales alcalinos se consumen o encapsulan por cubiertas de precipitado, disminuirá el pH en el área en torno al sulfuro, pasando a la siguiente etapa de desarrollo del drenaje ácido.</li> </ul>
Etapa II	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En esta etapa el pH del microambiente ha disminuido hasta 4,5; por lo que ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas y si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3,5.</li> <li>• Existen concentraciones elevadas de hierro ferroso y sulfato y pese a la acidez relativamente alta, las concentraciones de metales en la solución pueden ser bajas.</li> <li>• Las reacciones de oxidación catalizadas por bacterias aumentan.</li> <li>• Se produce hierro ferroso (Fe<sup>+2</sup>), que se oxida biológicamente a hierro férrico (Fe<sup>+3</sup>), el cual se convierte en el oxidante dominante, reemplazando al oxígeno.</li> <li>• El drenaje se vuelve aún más ácido producto de la oxidación de sulfuros metálicos (ZnS, PbS, etc), con mayores concentraciones de metales disueltos.</li> <li>• La velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la etapa I. Mediante estudios se ha podido observar que el aumento de las velocidades es de 10 a 1 millón de veces más.</li> </ul>
Etapa III	

Cuadro 1.- Etapas del DAR.

Fuente: Tabla elaborada a partir de (5).

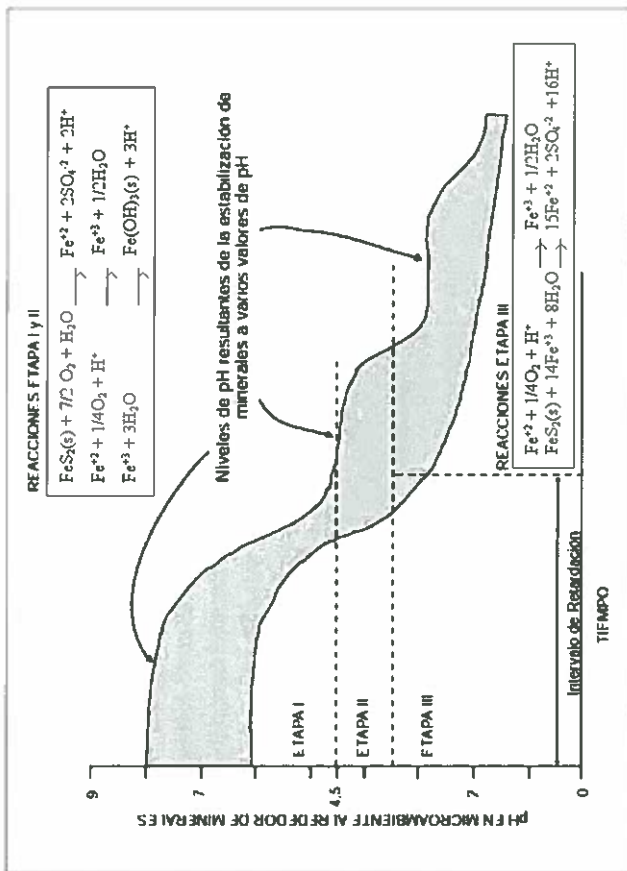


Figura 1.- Etapas en la formación del drenaje ácido.

La oxidación máxima de la pirita ocurre entre pH 2.4 y 3.6 y decrece rápidamente por encima de este intervalo de pH. El pH del medio también puede influir en el equilibrio del sistema hierro ferroso/hierro férrico, ya que a pH bajo, el hierro férrico actúa como un oxidante poderoso, el cual sucesivamente, puede atacar otros minerales sulfurados, incrementando la velocidad de oxidación del sulfuro y la generación de productos de oxidación.

Las aguas y los desechos de roca continentales, contienen poblaciones bacteriales que utilizan la energía producida, a través de la oxidación de compuestos reducidos de azufre, o de iones metálicos, y así pueden acelerar la velocidad con la cual ocurren algunas reacciones, incrementando con ello la velocidad de generación de ácido y la velocidad de lixiviación de metales pesados. Estas bacterias se desarrollan en los residuos a un cierto valor de pH y de T°. La oxidación continua consiste en la producción de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>) y la consiguiente disminución del pH, hasta un valor adecuado para las bacterias que oxidan el sulfato y el hierro ferroso; la producción de hierro férrico

y el aumento de temperatura debido al proceso de oxidación exotérmico, da por resultado condiciones ideales para el desarrollo de colonias de estas bacterias.

Dentro de las principales bacterias que participan en acelerar la oxidación de los compuestos de azufre reducidos se encuentra la *Thiobacillus ferrooxidans*, denominada actualmente *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Bacteria acidófila sulfo-oxidante y ferro-oxidante mesófila. Puede vivir en cualquier ambiente natural (incluso en condiciones muy ácidas), excepto en ambientes salinos. Para oxidar sulfuros es aeróbica y anaeróbica facultativa. Aumenta 106 veces la velocidad de oxidación de la pirita, oxidando el hierro ferroso a hierro férrico (que actúa como un poderoso oxidante). Actúa por contacto directo y mientras más fino sea el residuo, mayor es el número de sitios donde la bacteria puede fijarse. Se desarrollan luego que el pH desciende a valores < 3.5. Condiciones óptimas pH entre 1.5 y 5 y temperatura entre 25° y 45°C.

#### 2.4 POSIBLES IMPACTOS Y EFECTOS DEL DRENAJE ÁCIDO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

El agua ácida generada en las faenas mineras, acompañada generalmente de metales pesados disueltos, ha provocado históricamente en el mundo casos de acidificación de suelos, ríos y lagos y con ello un sin número de efectos ecológicos, en gran medida desconocidos en Chile. Entre ellos se incluyen alteraciones en la tasa de lixiviación de los nutrientes del suelo, cambios en las relaciones predador-presa, eliminación física de especies vegetales y animales, etc. La preocupación fundamental en cuanto al drenaje ácido se debe a su potencial impacto adverso sobre la flora y la fauna del ambiente receptor y, además, a los posibles riesgos indirectos para la salud humana. Los peces y otros organismos acuáticos son más sensibles que los seres humanos a los niveles elevados de la mayoría de metales. Pero, es importante destacar que si los metales se encuentran en el agua, generalmente son asimilados por los organismos vivos, se acumulan en los sedimentos y de esta manera pueden ingresar en la cadena alimenticia.

Los posibles impactos sobre el medio ambiente pueden ser:

- Afectar ecosistemas acuáticos, como resultado de la acidez y metales disueltos en las aguas.
- Inhibir el crecimiento de comunidades vegetales aledañas a los canales de drenaje, debido a que la acumulación de hierro y de sulfuros en la superficie de los suelos dificulta la penetración de las raíces. También, el ácido sulfúrico afecta la tasa de crecimiento de las plantas.
- Afectar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (acuíferos poco profundos), lo cual podría afectar a la comunidad por limitar o impedir utilizar las aguas para algunos usos como riego o recreación.

El agua ácida puede producir también efectos sobre la operación minera:

- El alto contenido de sulfatos en las aguas ácidas, puede deteriorar la calidad del agua de mina, limitando su uso en el proceso; y creando problemas de corrosión en las instalaciones y equipos de faenas mineras.
- Dificultar procesos de revegetación y estabilización de los residuos mineros, ya que la generación de ácido obstaculiza el establecimiento de una capa vegetal.

Es importante reconocer que la acidez y el pH bajo no son en sí los factores más críticos en relación al drenaje ácido. Más bien, la preocupación fundamental la constituyen los elevados niveles de metales disueltos. Es así como el drenaje que proviene de la oxidación de minerales sulfurados de una roca que además contiene carbonatos puede ser casi neutro, pero puede contener niveles elevados de metales solubles en pH neutro o alcalino, tales como el zinc, el arsénico o el molibdeno cuya solubilidad no disminuye linealmente con el pH<sup>1,2</sup>; y puede precipitar a los iones solubles de hierro férrico (Fe<sup>3+</sup>), produciendo hidróxido férrico (Fe(OH)<sub>3</sub>) como precipitado, también llamado "yellow boy". El hidróxido férrico es un sólido desagradable, fangoso, de color amarillo o naranja, que puede cubrir el lecho de un riachuelo y decolorar el agua aumentando la turbidez (Figura 2). Es considerado un impacto negativo sobre los organismos vivos en el río y también desde el punto de vista estético.



Figura 2.- "Yellow Boy" Efecto devastador sobre la ecología de corrientes de agua dulce.

1. Es posible encontrar altos niveles de As, Mo, o Zn aun en aguas con alto pH, especialmente en aguas de relaves.  
2. El plomo tiene muy baja solubilidad en agua, excepto el nitrato y el acetato de plomo. Cuando el pH es <5, aumenta su solubilidad.

### 2.5 DRENAJE ÁCIDO EN CHILE

A lo largo de Chile hay una gran variabilidad de climas y condiciones geológicas, lo que impide hacer una generalización representativa en cuanto a la magnitud de la generación de drenaje ácido en Chile. Como se indicará más adelante, en el capítulo 3, existen una serie de factores geológicos, hidrologicos y mineros que influyen en la generación, transporte y efectos del drenaje ácido al llegar al medioambiente receptor. Sin embargo, las principales condiciones para que se genere drenaje ácido son:

- Presencia de minerales sulfurados
- Agua
- Oxígeno
- Bacterias catalizadoras de las reacciones de oxidación.

De estas cuatro condiciones, la primera es la más variable con el tipo de yacimiento y su ubicación geográfica, y las otras tres generalmente siempre están. La gran mayoría de los yacimientos de cobre actualmente en explotación en Chile son pórfidos cupríferos<sup>3</sup>. Las menas de estos yacimientos, pueden consistir en roca fracturada atravesada por numerosas guías de sulfuros, especialmente

calcopirita o en grandes masas de roca que contienen diseminación de sulfuros.

Los principales pórfidos cupríferos se distribuyen en una franja de dirección media norte-sur, algo sinuosa, que se extiende desde el límite con el Perú por el norte, hasta los 38° 45' por el sur, vale decir por unos 2.300 Km de extensión longitudinal. El ancho medio de la franja es de 30 Km y se distribuye algo al oriente del eje central del país, en algunas partes en el pie occidental del macizo Andino, en otras en el eje de Los Andes y, finalmente, en otras, más alejado hacia el oeste del macizo. Se puede decir, que este cinturón, dependiendo del balance hídrico, de la disponibilidad de oxígeno y de las bacterias presentes va a ser una zona susceptible de generar drenaje ácido.

Si bien la actividad minera puede acelerar o incrementar el fenómeno de drenaje ácido, éste es un fenómeno natural y su evidencia se encuentra en la geología de yacimientos naturales y se refleja también en la calidad de algunos cursos de agua naturales que atraviesan áreas en la que no ha existido nunca actividad minera.

Es importante destacar que debido a las condiciones geológicas e hidrologicas de Chile,

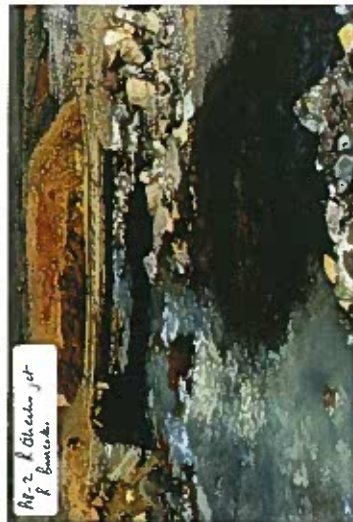


Figura 3. Foto del Rio Estrecho (a la derecha) uniéndose con Q. Barreales. Pascua-Lama

3. Si bien existen otros tipos de yacimientos en Chile, sólo se mencionan los pórfidos cupríferos por ser los más comunes en Chile.



Figuras 4 y 5. Fotos del Drenaje Ácido en una Mina Subterránea.

que serán mencionadas más adelante, existirán varias zonas generando drenaje ácido que aún no han sido descubiertas, por encontrarse en sus primeras etapas de desarrollo, o porque aún no han sido detectados sus efectos.

Un ejemplo de aguas ácidas que son tratadas y aprovechadas con fines económicos, es el drenaje ácido producido en El Teniente CODELCO, el cual se encuentra dentro de la faja principal de pórfidos cupríferos en la latitud 34° 6' sur. (Ver ejemplo de aplicabilidad en el punto c. del ítem 5.1.3.2 Tratamiento activo).

Con el fin de prevenir la futura generación de drenaje ácido, se detectó el potencial generador de aguas ácidas en cuerpos mineralizados y en lastre en el botadero de Los Juncos, Proyecto Fachinal, yacimiento de Los Bronces ubicado en la latitud 33° 9' sur, también dentro de la faja principal de pórfidos cupríferos. (Ver ejemplo de aplicabilidad en el ítem 4.1.1.2 Ensayos estáticos). La Figura 3 muestra la presencia de drenaje ácido en una zona del norte de Chile, y las Figuras 4 y 5, corresponden a dos fotos que muestran la presencia de drenaje ácido en una mina subterránea de El Teniente.

### 3. Factores Relacionados con la Dinámica del DAR.

La dinámica del drenaje ácido en el medioambiente es compleja y se puede entender como parte de los ciclos biogeoquímicos. En yacimientos y depósitos de residuos mineros como tranques de relaves y botaderos de estériles, en que pueden existir contenidos variables de sulfuros metálicos, ocurren una gama de procesos fisicoquímicos y biológicos (naturales y antropogénicos), que potencialmente pueden influir en la generación, el transporte y los efectos del drenaje ácido en el medio ambiente. El drenaje ácido, se puede producir en la fuente u origen debido a varios factores (minerales sulfurados, oxígeno atmosférico, agua, etc.); luego éste puede ser transportado en el medio ambiente por medio de las infiltraciones de aguas lluvia y/o por las escorrentías, acidificándose y/o neutralizándose a la vez y finalmente puede llegar al medioambiente receptor (cuerpos de agua superficiales y subterráneas, flora y fauna) causando posibles impactos (Figura 6).



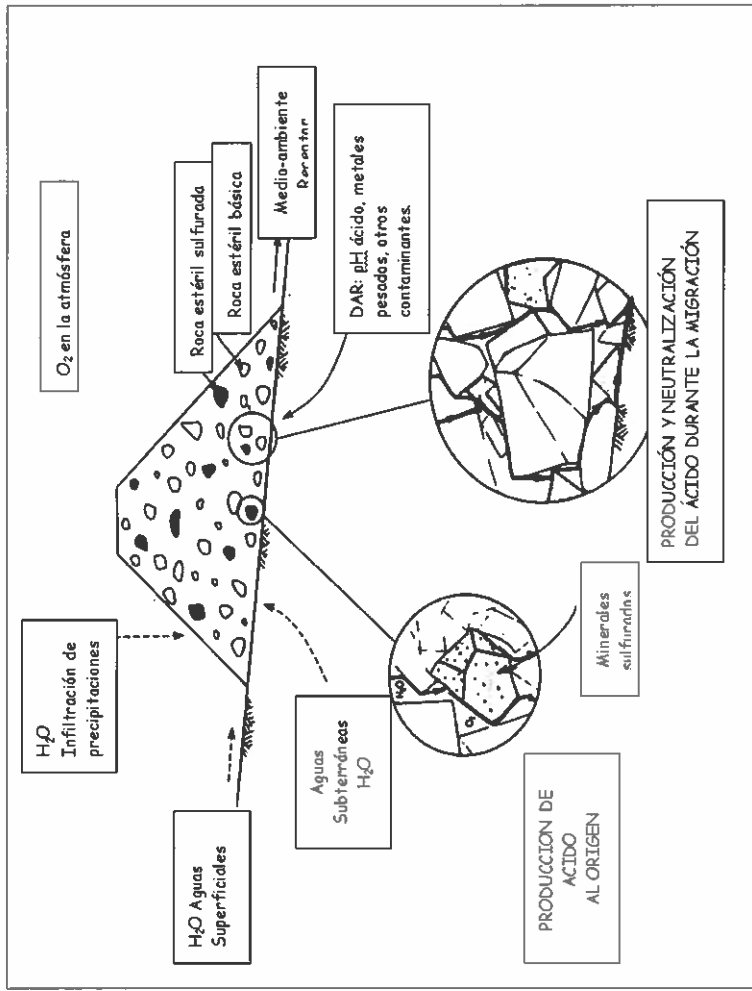


Figura 6.- Dinámica del drenaje ácido en el medioambiente

El fenómeno del drenaje ácido, presenta en general características similares en todos los lugares donde se presenta, pero tanto las condiciones que favorecen su generación, como las características y particularidades de cada faena minera son por lo general disímiles, e influyen sobre el fenómeno, y directamente en la naturaleza de la cinética de las reacciones de generación de ácido. Por lo tanto, el potencial y naturaleza del drenaje ácido de una mina, será específico del sitio y en función del tipo de yacimiento del mineral.

Los principales factores que inciden en la generación, transporte y efectos de este fenómeno, pueden ser agrupados en factores primarios, secundarios y terciarios (Ferguson & Erickson), y a su vez se pueden sub-agrupar en factores geológicos, hidroclimáticos y mineros.

#### FACTORES HIDROCLIMÁTICOS

Los factores hidroclimáticos actúan tanto en la generación del drenaje ácido en la fuente, como en el transporte y en los efectos que pueden producir sobre el medio ambiente:

##### 1. Factores hidroclimáticos primarios

1.a. **Disponibilidad de agua:** Es uno de los factores de mayor importancia en la oxidación de minerales sulfurados y está relacionado con el porcentaje (%) de saturación de agua que contengan los residuos de roca y los residuos mineros en forma natural. También depende directamente de las condiciones climáticas, que son descritas en el factor (3-a).

1.b. **pH inicial del agua "background";** i.e. Equilibrio hierro férrico/ferroso y I.d. Actividad microbiológica presente en las aguas: Estos tres factores están directamente relacionados y fueron previamente explicados en el ítem 2.3.

##### 2. Factores hidroclimáticos secundarios

2.a. **Especiación y concentración de elementos disueltos en el agua de drenaje:** El drenaje ácido genera una solución de alta reactividad, que puede lixiviar metales desde un amplio rango de minerales primarios y secundarios, y por tanto aumentar los sólidos disueltos, o puede precipitar metales, por neutralización en el punto de origen, antes del proceso de migración.

Los sólidos disueltos en aguas naturales pueden existir en varias formas químicas, o especies, cada una de ellas tiene diferente movilidad, características químicas y solubilidad. A su vez, cada especie tiene su propio campo de estabilidad controlado por el pH y por el potencial redox (Eh), es decir, por la termodinámica del sistema.

La alta concentración de cloruro en las aguas del norte de Chile, genera una química completamente distinta en la generación de drenaje ácido, porque por ejemplo la solubilidad del cloruro férrico es más alta que el sulfato férrico.

##### 3. Factores hidroclimáticos terciarios

3.a. **Factores climáticos:** Los factores climáticos se refieren a las variables consideradas en un largo plazo (valores promedio y valores extremos), e involucran mucho más que los valores de las

precipitaciones (pluviales y nivales). Incluyen además, la evaporación y sublimación, la fusión de hielo y nieve, la humedad y el caudal. Estos factores se agrupan dentro del nombre de "balance hídrico", que es la diferencia entre los beneficios y las pérdidas de agua en una cuenca hidroclimática de tamaño local o regional (Dirección General de Aguas). El agua es un elemento dinámico de importante reactividad química, que se encuentra en constante movimiento en el ambiente natural en busca del balance hídrico.

La precipitación puede suceder en forma de nieve o lluvia. En Chile, importantes yacimientos de la gran minería se explotan en altura, donde predominan las precipitaciones en forma de nieve. Es importante, conocer el equivalente en agua de nieve, la altura de nieve y tener un registro histórico de datos, es decir, que abarque un período de tiempo largo.<sup>4</sup>

La tasa de evaporación de la localidad puede ser medida por diferentes métodos, siendo el más simple el de medición directa en un estanque normalizado de evaporación automática, US Tipo A.

Se debe tomar en cuenta la relación de funcionalidad existente entre precipitación y evaporación, y los cambios en esta relación de funcionalidad asociados a la estación del año (verano e invierno), para finalmente determinar el balance hidroclimático. En relación a esto, se ha establecido que:

Si la precipitación/evaporación > 1 ⇒ Disolución de sales solubles  
Si la precipitación/evaporación < 1 ⇒ Acumulación de sales solubles

4. Información sobre niveles de precipitaciones en distintas zonas de Chile: Dirección General de Aguas (DGA).



La fusión de hielo y de la nieve (deshielos de glaciares y cordilleras) es la fuente de recarga de agua más importante.

La humedad, por lo general, no es un parámetro que limite la reacción de oxidación; sin embargo, en climas más húmedos, el control del drenaje ácido puede permitir la dilución adecuada de los productos de reacción realizados en aguas receptoras; de esta manera se minimizan los efectos potenciales sobre los ecosistemas acuáticos. En climas más secos, a pesar de que la oxidación de los minerales sulfurados puede estar ocurriendo en los residuos mineros, el balance hidrológico es tal que sólo existe el transporte mínimo de productos de oxidación. La baja frecuencia de las lluvias puede resultar en la acumulación de productos de oxidación en los residuos durante largos períodos secos y su liberación al ambiente puede estar controlada por procesos geoquímicos.

Sin embargo, incluso en estas circunstancias los productos de oxidación pueden acumularse en la superficie, causando problemas de revegetación sobre los suelos contaminados con los productos de la oxidación.

En primera instancia, se podría pensar que en Chile, el drenaje ácido no es un problema relevante porque no hay una alta frecuencia de lluvias, que origine un proceso de infiltración y de lixiviación; pero en un clima donde existen las lluvias intermitentes y dada la alta pendiente del territorio nacional a causa del fuerte desnivel existente entre la Cordillera de los Andes y el Océano Pacífico no se producen inundaciones, y por lo tanto hay mayor interacción entre las fases líquida (agua), gaseosa (oxígeno) y sólida (sulfuros), potenciándose el problema del drenaje ácido.

**3.b. Potencial de migración o transporte de contaminantes en el medio ambiente receptor:** Este factor consiste en que los contaminantes presentes en el drenaje ácido, pueden migrar a través del caudal aguas arriba y aguas abajo de la

fuente, pueden penetrar el suelo a través del proceso de percolación, transportarse a través de las napas subterráneas por infiltración, y/o escurrir a otro medio ambiente receptor.

El caudal (Q) aguas arriba y aguas abajo de la fuente, influye en la velocidad del transporte y en la dilución del drenaje ácido en un cuerpo de agua. Este factor, es muy importante para conocer la calidad del agua, para ello se utilizan los caudales derivados, junto con los datos de los parámetros químicos para pronosticar "cargas" químicas de las aguas. El fundamento teórico de la medición del caudal en forma manual es la ley de Darcy.<sup>5</sup>

Las mediciones en terreno pueden ser:

- Manuales: Mensuales, semanales/promedio o diarias.
- Automáticas: Se elige el intervalo de tiempo en que se quiere la medición.

La superficie de escurrimiento e infiltración resultante de la pluviosidad, y fusión de hielo y nieve (deshielo de glaciares y cordilleras) son los mecanismos principales de transporte de los productos de oxidación y contaminantes en el medio ambiente. Las aguas lluvia penetran el suelo, lo que genera el fenómeno de percolación de las aguas a través del material y pueden transportarse a través del perfil del suelo, para incorporarse a la napa de aguas subterráneas. Las aguas lluvia también pueden escurrir y formar parte de los cuerpos de agua superficiales.

El agua subterránea se encuentra a lo largo del perfil del suelo repartida entre la zona saturada y la zona no saturada. La zona no saturada se extiende desde la superficie del suelo hasta la columna de agua. La zona saturada se extiende desde la columna de agua hasta las aguas freáticas. En general, los caudales en botaderos, pilas de lixiviación y tranques de relaves son controlados por caudales no saturados más que saturados.

Las unidades del perfil del suelo donde pueden ser transportados los contaminantes del drenaje ácido son: acuífero, acuitado y acuícluido.

- Acuífero: Unidad de roca consolidada o no consolidada con una transmisividad suficiente para transmitir agua subterránea en cantidades significativas. Está constituida principalmente por arena y grava (permeabilidad de la arena:  $10^{-5} - 10^{-3}$  m/seg; permeabilidad de la grava:  $10^{-4} - 10^{-2}$  m/seg).

- Acuitado: Una unidad de roca que limita el flujo de agua subterránea, por su baja permeabilidad.

- Acuícluido: Unidad de roca que tiene muy baja permeabilidad la cual no permite el flujo de agua subterránea bajo gradientes hidráulicos normales. Está constituida principalmente por arcilla (permeabilidad arcilla:  $10^{-11} - 10^{-8}$  m/seg).

Los mecanismos de transporte de contaminantes en las aguas subterráneas definen la dirección en la que se transportarán los contaminantes lixiviados y son:

- Advección: Transporte dominante de iones disueltos o partículas, debido al flujo de agua subterránea.
- Difusión: Movimiento de un soluto de un área de mayor a un área de menor concentración (generado por un gradiente de concentración).
- Dispersión Hidrodinámica: Proceso de mezcla de fluidos, debido a la variación de velocidad por la heterogeneidad de la ruta de flujo o "flow path".

**3.c. Hidrogeología del yacimiento:** Este factor incluye las porosidades, las permeabilidades y la transmisividad de las rocas huéspedes, como factores fundamentales de la velocidad del proceso, ya que el agua es un componente crítico del proceso de oxidación de los sulfuros.

La permeabilidad o conductividad hidráulica es la capacidad de una roca o un medio para transmitir un fluido como el agua. Los distintos medios porosos, tales como la arcilla, el limo, la

arena fina, la arena y la grava, tienen diferentes valores de permeabilidad. Para la arcilla, que es el material más impermeable de los señalados anteriormente, los valores están ubicados en el intervalo de  $10^{-11} - 10^{-8}$  m/s. Para la grava, que es el material más permeable de los señalados anteriormente, los valores están ubicados en el intervalo de  $10^{-4} - 10^{-2}$  m/s.

La permeabilidad no saturada (K(u)), es función del contenido de agua y succión, es más complicada de determinar y es de menor valor que la permeabilidad saturada (K(sat)).

La transmisividad es la tasa a la que el agua está siendo transmitida a través de un acuífero de un ancho determinado, bajo un cierto gradiente hidráulico. Es equivalente a la permeabilidad, multiplicada por la altura saturada del acuífero.

La porosidad total es el espacio total de poros. El flujo de agua no ocupa toda la porosidad, un porcentaje de la porosidad no es interconectada. La porosidad efectiva es el porcentaje de porosidad interconectada que contribuye al flujo de agua. El acuícluido (baja permeabilidad) está constituido principalmente por arcilla, cuyo valor de porosidad está en el intervalo: 0,4 - 0,6).

Algunas rocas tales como los granitos, los basaltos o la caliza, por lo general no tienen porosidad intergranular. El mayor porcentaje de su porosidad es por fracturas. El tamaño de su fractura es muy importante, para la evaluación del transporte de contaminantes. Muchos de los acuíferos de Chile son fracturados.

**3.d. Química natural y caudal de dilución de los cuerpos de agua receptores:** Es un factor que influye en el consumo de los productos de oxidación y en la determinación del impacto del drenaje ácido, una vez que éste interactúa con ríos, arroyos y lagos.

La química del drenaje ácido, no es sólo función de los procesos de oxidación y neutralización en la fuente de contaminación. Después de la

5. Mayor información sobre la Ley de Darcy en Perry's Chemical Engineer's Handbook. Mac Graw Hill, 1999.

producción de acidez y movilización de metales hay una serie de factores que controlan su evolución. Las concentraciones de metales que transporta el drenaje ácido, pueden ser atenuadas por varios procesos:

- **Sorción:** Incluye adsorción, sorción química. Es determinado por ensayos de laboratorio que miden la cantidad de soluto retenido por un suelo. La mayoría de los metales son fuertemente retardados por este proceso.
- **Precipitación química:** La toxicidad de los metales en el agua puede ser afectada por la dureza del agua o la cantidad de alcalinidad contenida en el agua. Donde las aguas sean alcalinas ésta tenderá a neutralizar el drenaje ácido y promover la precipitación de metales a formas con menor biodisponibilidad.
- **Intercambio catiónico.**
- **Biodegradación:** La materia orgánica disuelta puede complejar metales en solución, afectando la toxicidad o biodisponibilidad para los organismos acuáticos.

La zona no saturada es la barrera de mayor importancia contra la contaminación de aguas subterráneas, el flujo es lento y controlado por la infiltración, mientras que las condiciones químicas son aeróbicas y neutroalcalinas.

## FACTORES GEOLÓGICOS

La geología en Chile queda fundamentalmente determinada por la existencia de una extensa zona de subducción a lo largo de la costa del Océano Pacífico. La importante actividad en esta zona de subducción da origen a fenómenos volcánicos y magmáticos. La gran mayoría de los yacimientos metálicos chilenos se relacionan directa o indirectamente con la actividad tectónica. A estos fenómenos ligados a la tectónica de placas se

sobreponen procesos de erosión y alteración.

La geomorfología de Chile presenta un enorme gradiente de altura a lo ancho de todo el país, la zona cordillerana presenta en algunos lugares alturas por sobre los 6000 m.s.n.m, lo que origina un transporte especial desde la cordillera al mar (desde el Este al Oeste).

Los factores geológicos ya sean primarios, secundarios o terciarios de producción de drenaje ácido, no involucran simplemente la cantidad de generadores y neutralizadores de acidez. Pueden incluir una serie de factores, tales como:

### 1. Factores geológicos primarios

**1.a. Tipo de yacimiento:** La gran mayoría de los yacimientos de cobre actualmente en explotación en Chile son pórfidos cupríferos<sup>6</sup>, los cuales se distribuyen en una franja longitudinal, de dirección media norte-sur, algo sinuosa que se extiende desde el límite con el Perú, por el norte, hasta los 38° 45' latitud sur por el sur, vale decir por una extensión longitudinal de 2.300 Km.

El origen de estos yacimientos, de acuerdo a la hipótesis más aceptada, se relaciona con la tectónica global, especialmente relacionada con los fenómenos de subducción y fusión parcial que se producen en las capas litosféricas.

Los pórfidos cupríferos corresponden al producto de la evolución de grandes sistemas hidrotermales, derivados de intrusiones de rocas hipabisales o pórfidos. El resultado ha sido la formación, en general, de grandes volúmenes de rocas alteradas y fracturadas en que la mineralización de sulfuros ocurre en forma diseminada y con pequeñas vetillas de sulfuros primarios como la calcopirita.

a la química del DAR), es la movilización de metales libres (excepto los sulfuros de arsénico). Los sulfuros del tipo MS pueden generar acidez por reacción con Fe<sup>+3</sup>.

Los sulfuros de estequiometría MS<sub>2</sub> (Pirita (FeS<sub>2</sub>)), generan más protones a través de los procesos de oxidación con todo tipo de oxidantes. La formación y precipitación de minerales del tipo MSO<sub>4</sub>, produce un depósito de material de alto potencial de ácido. Por cada mol de pirita oxidado, sólo el 33% del sulfato y H<sup>+</sup> disponible se moviliza. El balance forma un sulfato no-hidrolizado y parcialmente oxidado.

En el caso específico de los pórfidos cupríferos, tienen un alto contenido de sulfuros y/o sulfatos.

**1.d. Resistencia de sulfuros a la meteorización:**  
Las concentraciones y mineralogías de sulfuros controlan la generación de protones. Sin embargo, en yacimientos de sulfuros complejos, la contribución de protones relativa de cada fase por unidad de tiempo es un producto de (a) la química de las reacciones, y (b) las tasas relativas de ellas.

En el Cuadro 2, se presenta la resistencia de algunos minerales sulfurados a la meteorización. Con un valor bajo de resistencia, la meteorización es más rápida, y con un valor alto de resistencia, la meteorización es más lenta. En el caso de la pirita, se puede observar que es un mineral sulfurado con una mediana resistencia a la meteorización.

**1.e. Disponibilidad de oxígeno:** Este es un factor geológico primario, porque depende del tipo y alteración del mineral, para que el oxígeno presente en el aire pueda ingresar. Más adelante, se describe el tipo de alteración y las características del mineral (ítem 3.a).

Aunque todos los pórfidos cupríferos han sido incluidos en un mismo grupo, especialmente debido a la naturaleza diseminada y extensa de su mineralización, sin embargo éstos presentan diferencias notables entre sí, tanto en lo que se refiere a la edad y composición de los pórfidos, a la clase de roca intruida, como a la diferente evolución de los procesos de mineralización y alteración hidrotermal, algunos de ellos separados probablemente por un lapso apreciable. Debido a estas notables diferencias, los pórfidos cupríferos chilenos, no se adaptan estrictamente a un modelo geológico conocido.

Es importante destacar el origen de los yacimientos "exóticos", que son el producto de la migración de soluciones generadas en procesos de drenaje ácido y de su posterior contacto con rocas que consumen el ácido y permiten la precipitación de los metales disueltos. Las mineralizaciones típicas de estos yacimientos son: crisocola, copper pit y copper wad, etc. Estos yacimientos son una clara evidencia de procesos de generación de aguas ácidas. Ejemplos de este tipo de yacimiento los tenemos en la mina Exótica (contigua a Chuquicamata) y Huinquintipa, en la primera región.

**1.b. Marco Litológico:** Los pórfidos a que se atribuye la mineralización, tienen una composición que varía entre adamelitas y tonalitas, en el mayor número de éstos, las rocas intruidas son andesitas efusivas, pero en otros, como es el caso de Chuquicamata, las rocas intruidas son granodioritas.

**1.c. Cantidad y mineralogía de sulfuros:** Este es un factor geológico primario porque influye en la cantidad de ácido que se puede generar en un ambiente determinado. Los sulfuros de estequiometría MS, donde "M" representa el catión metálico y S el sulfuro, tales como el (ZnS, PbS, CuS), generalmente no producen drenaje ácido a través del mecanismo de oxidación por presencia de oxígeno molecular. La influencia más importante de tales reacciones (con respecto

6. Si bien existen otros tipos de yacimientos con diferentes características. Sólo se menciona los pórfidos cupríferos por ser los más comunes a lo largo de Chile.

Mineralogía	Tamaño	Textura	Impur. Trazos	Resistencia
Pirrotita	Fino	Framboidal	Alto	Bajo
Calcosina		Coliformo		
Galena				
Esfalerita				
Pirita	Medio	Masivo		
Enargita				
Marcasita				
Calcopirita				
Molibdenita	Grueso	Euhedral	Bajo	Alto

Cuadro 2. Resistencia de sulfuros a la meteorización

2. Factores geológicos secundarios

2.a. Disponibilidad, mineralogía y resistencia de especies químicas neutralizantes: Dentro de los factores geológicos secundarios están los minerales alcalinos en primer grado y en segundo grado los minerales silicatos y aluminosilicatos. Estos minerales dan una idea de la capacidad de una muestra para neutralizar ácido, es decir del potencial de neutralización de la muestra. En el caso específico de los pórfidos cupríferos tienen especies químicas neutralizantes con un potencial (bajo a medio) de neutralización.

Los carbonatos son los únicos minerales alcalinos que existen naturalmente en cantidades suficientes para ser considerados efectivos en el control y prevención del drenaje ácido. Algunos minerales silicatos y aluminosilicatos, tales como la mica y los minerales de arcilla, tienen la capacidad de consumir algo de ácido generado por el fenómeno de oxidación.

La cantidad de material alcalino en la roca puede ser suficiente como para compensar el potencial

de producción de ácido del material y el drenaje ácido no sucederá mientras las velocidades de reacción de los respectivos materiales sean similares. Sin embargo, en algunos casos las cinéticas de las reacciones son tales que los metales son movilizados aunque no existan condiciones ácidas. En estas situaciones, el sulfato y estos metales son indicadores de los procesos de oxidación y por ello, indicadores también de drenaje ácido.

En el siguiente Cuadro 3, se puede observar los distintos tipos de especies químicas neutralizantes, el pH del tampón que forman al reaccionar con el drenaje ácido, el rango de potencial de neutralización y su reactividad.<sup>7</sup>

A mayor potencial de neutralización (PN), mayor reactividad del neutralizante y mayor pH del tampón. Por esto, la calcita, la dolomita, la magnetita y la aragonita, que son carbonatos de calcio y magnesio, tienen el mayor potencial de neutralización y por tanto tienen la mayor reactividad para neutralizar el ácido y formar el

mayor pH del tampón. Es por esto que son los tipos de neutralizantes más utilizados para alcalinizar el drenaje ácido.

3. Factores geológicos terciarios

3.a. Tipo de alteración: Las rocas no alteradas o mineralizadas están menos expuestas a las condiciones atmosféricas, y el potencial de producción de ácido en términos cinéticos, es bajo. En cambio, si las rocas ya están alteradas, entonces existirá una mayor porosidad para el transporte de agua y oxígeno.

La minería y extracción de minerales que tienen sulfuro tienden a incrementar enormemente el potencial para drenaje ácido. Durante las operaciones de minería, el material de roca es fracturado generando pedazos, que aumentan la superficie específica de contacto (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), y de esta manera los minerales sulfurados son expuestos a procesos de erosión acelerados. Bajo estas condiciones, los minerales sulfurados se oxidan al reaccionar con el oxígeno atmosférico, el oxígeno disuelto en el agua, y el agua en variadas velocidades de reacción. La velocidad de oxidación de sulfuro determinará en gran parte si existe un potencial significativo para drenaje ácido.

Grupo	Minerales	pH tampón	PN*	Reactividad
1. Disoluble	Calcita, aragonita, dolomita, magnetita	6 - 11	7 - 10	1,0
2. Meteorización rápida	Anortita, olivino wolastonita	5,5 - 11	3 - 6	0,6
3. Meteorización media	Epidota, clorita, Actinolita, biotita	4,8 - 7,3	1,5 - 5	0,4
4. Meteorización lenta	Albita, vermiculita, Manganita, kaolinita, Goetita	2,4 - 5,1	0,5 - 3	0,02
5. Meteorización muy lenta	Muscovita, ferrihidrita	2,2 - 4,1	0,2 - 1	0,01
6. No reactivo	Cuarzo, rutilo	3,3 - 3,5	0,01	0,004

Cuadro 3. Resistencia de neutralizantes

\*PN: Potencial de neutralización: Calculado en base de equivalente de 10g/calcaita

7. Información adicional: (27) GUIDE TECHNIQUE PRÉLIMINAIRE SUR LE DRAINAGE ROCHEUX ACIDE.

El tipo de alteración es un factor geológico terciario, ya que la velocidad de la generación de ácido es una función del área superficial de los sulfuros expuestos para la oxidación. Además el proceso de oxidación puede estar limitado a la superficie del comprimido, al granulado fino, las acumulaciones deterioradas, comparado con las acumulaciones compuestas de materiales gruesos, donde la acción del viento (gradientes de presión del aire) y la circulación del aire impulsado exotérmicamente permitirá la oxidación por toda la acumulación.

Las características físicas del material tales como porosidad del lecho, tamaño de la partícula, dureza y resistencia de sulfuros a la meteorización determinan el flujo de oxígeno y el flujo de agua (velocidades de percolación) a través de acumulaciones de residuos, las cuales posteriormente, determinan la velocidad de oxidación y la velocidad de generación del lixiviado.

La alteración supérgena es común en los yacimientos de pórfidos de Chile y afecta fuertemente las características geo-químicas de tales yacimientos.

Los procesos de enriquecimiento supérgeno involucran:

- Oxidación profunda del yacimiento
- Lixiviación de productos de oxidación por la zona no saturada

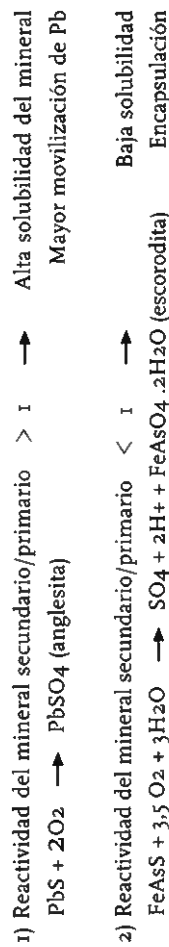
• Precipitación de sulfuros secundarios en una zona de reducción, que usualmente coincide con la columna de agua.

Los sulfuros secundarios incluyen usualmente covelina (CuS) y calcocita (Cu<sub>2</sub>S). Estos reemplazan los sulfuros primarios de Fe, Zn y Pb.

Este proceso disminuye el potencial de acidez (PA) del yacimiento, a través de la sustitución de los sulfuros con el potencial más alto de generación de drenaje ácido.

**3-b. Mineralogía de los productos de alteración:**  
La meteorización de los yacimientos de sulfuros, a través de los procesos de interacción con las aguas subterráneas, las aguas superficiales y la atmósfera, produce un rango amplio de minerales secundarios, tales como óxidos, sulfatos, carbonatos y arsenatos.

Los minerales secundarios, usualmente encapsulan los sulfuros primarios. En base a sus solubilidades (relativo al sulfuro primario), pueden aumentar o disminuir las tasas de migración de los contaminantes del yacimiento. Es así que se tiene una funcionalidad entre la relación existente entre la reactividad del mineral secundario/primario y el grado de solubilidad del mineral:



Controlando las condiciones de pH/Eh, se puede controlar la producción de minerales secundarios.

**3-c. Comportamiento electroquímico de los sulfuros:** En los yacimientos que contienen varias especies de sulfuros, se forman celdas electroquímicas de protección/corrosión galvánica (protección catódica/disolución anódica), que afectan las tasas relativas de oxidación de las especies químicas contenidas en las fases involucradas.

Una fase de potencial eléctrico alto forma un cátodo, mientras que una fase de potencial eléctrico más bajo forma un ánodo.

El resultado es la oxidación del ánodo y la reducción del cátodo. Por lo tanto, el proceso galvánico aumenta la oxidación del ánodo y disminuye la meteorización del cátodo.

#### FACTORES MINEROS

Los factores mineros, pueden influir también en la cantidad de ácido que se va a generar, en la cantidad de ácido que se va a neutralizar y en la velocidad de transporte del drenaje ácido. La calidad de las aguas de minas y/o lixiviados de desechos está controlada por factores antropogénicos, incluyendo los métodos de beneficio de minerales.

Es muy importante identificar todas y cada una de las fuentes potenciales de drenaje ácido de mina, tanto en el diseño como en la operación de cada faena minera, y comprender las diferencias en los factores físicos y químicos del drenaje ácido, para cada una de las fuentes identificadas.

#### 1. Factores mineros primarios

**1.a. Ubicación del yacimiento:** La altura donde se encuentre la mina a tajo abierto, la labor subterránea, el relave o el botadero de desmonte; influye directamente en la disponibilidad y concentración de oxígeno; en la temperatura

atmosférica y del agua; en la velocidad de oxidación bacteriana, y por consiguiente en la velocidad de oxidación de los sulfuros.

La presión atmosférica influye directamente en la presión parcial del oxígeno en la atmósfera y en el gradiente disponible como fuerza impulsora del aire hacia el interior de un botadero. Además la presión atmosférica y la temperatura varían con la altura donde esté ubicada la fuente, (a «altura»  $T^{\circ} < [O_2]$ ) y por lo tanto afectan a la actividad biológica de las bacterias catalizadoras de la oxidación de sulfuros y del ión ferroso. Las cinéticas de las reacciones químicas son siempre función de la temperatura y la concentración (bacterias,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N$ ,  $P$ ,  $SO_4$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ ) y su velocidad depende de mecanismos de transporte asociados a gradientes de momento, temperatura y concentraciones, además de la geometría, la distribución, la superficie de contacto y la fase o fases donde ocurren las reacciones y los mecanismos de transporte (sólido, líquido, gas).

Respecto a la temperatura, es lógico pensar que existe un flujo calorífico entre el ambiente y el material, el cual aumenta o disminuye según la velocidad del viento y según la temperatura del aire (por mecanismo de convección). Esta transferencia de calor hará que la temperatura superficial e interna del material varíe. Los gradientes de temperatura, tanto ambientales, como resultado de las reacciones exotérmicas de oxidación, también pueden promover el flujo de aire.

En cuanto a la entrada de aire (aporte de oxígeno) en un botadero de desmontes, éste ingresa desde la cima, los lados y a lo largo de la base, y fluye libremente a través de las rutas de flujo advectivas. En un botadero o desmonte no saturado, la oxidación rápida puede generar temperaturas elevadas y convección térmica, asimismo pueden desarrollarse efectos de chimenea a través de éste.



La temperatura de los sólidos en los relaves permanece relativamente constante, controlada en gran medida por el contenido de humedad de los sólidos.

Por otro lado el efecto del viento, puede generar un efecto de aireación al ir renovando constantemente el oxígeno disponible para los procesos de reacción. La velocidad media del viento puede producir un efecto significativo, en cuanto a la profundidad que se puede internalizar en un botadero de cierta porosidad.

**i.b. Actividad microbiológica presente en rípios de lixiviación:** Las bacterias presentes en desechos de minas abandonadas de diferentes sulfuros metálicos, en desmontes de procesos mineros y en el interior de los relaves, aceleran la velocidad de generación de ácido y de lixiviación de metales pesados. Este proceso se denomina "enfermedad bacteriana" de los residuos mineros.<sup>8</sup>

La más conocida de estas bacterias es la *Thiobacillus ferrooxidans* (*Acidithiobacillus ferrooxidans*), la cual se emplea actualmente en procesos de biolixiviación de minerales, luego del descubrimiento de su capacidad para disolver minerales sulfurados.<sup>9</sup> Esta tecnología reduce el impacto ambiental respecto a la tecnología clásica de la pirometalurgia, pero su lado oscuro es la generación del drenaje ácido.

Las posibles aplicaciones de la biolixiviación son:

- Lixiviación de minerales de baja ley en botaderos.
- Lixiviación de concentrados de cobre o refractarios de oro en reactores.
- Lixiviación en pilas de sulfuros secundarios de cobre (calcosina, covelina).
- Lixiviación in situ de la roca.

**i.c. Cantidad de sulfuros en los residuos o instalaciones mineras:** Es un factor que va a depender del tipo de residuo. El desmonte o roca de mina, que tiene una proporción entre tonelaje de material estéril (<0.2 % Cu) y tonelaje de mineral (>0.4 % Cu) de 2:1 o 3:1, puede contener una fracción significativa de sulfuros. De este modo, cualquier mineral sulfuroso reactivo queda expuesto a la atmósfera y a las precipitaciones que pasan por el botadero, inmediatamente después de haber sido depositado allí.

Las reacciones de generación de ácido pueden iniciarse en cualquier lugar del botadero, y generalmente se producen en varios sitios. Los botaderos de desmonte son las principales fuentes potenciales del DAR.

Los relaves producidos por procesos de flotación y cianuración pueden llevar sulfuros, pero se caracterizan por su alta alcalinidad inicial. La explotación minera subterránea (block caving) genera una intensa fracturación en la zona subyacente. Toda roca sulfurosa fracturada, como parte de las labores subterráneas, como resultado del colapso y hundimiento de las labores antiguas, o debido al relleno, puede producir DAR. Se produce una lixiviación "natural" reforzada por el aire que se infiltra desde las galerías inferiores. Sin embargo, generalmente las zonas fracturadas representan grandes volúmenes con un bajo contenido de sulfuros.

**2. Factores mineros secundarios**

**2.a. Química del agua de drenaje a lo largo de la ruta de flujo:** Es un factor que influye en la cantidad de ácido que pueda ser neutralizada en un ambiente determinado.

La química del agua de drenaje proveniente del botadero dependerá tanto de la mineralogía de la roca en la fuente del drenaje ácido, como también de las reacciones con las diferentes rocas a lo largo de la ruta de flujo. Dado que toda la pila de rocas o botadero puede estar compuesta por una mezcla de tipos de rocas con contenidos de sulfuros ampliamente variables, puede surgir agua con una calidad muy diferente, de cada una de las diferentes áreas del mismo botadero.

El desarrollo del drenaje ácido en un embalse de relaves es generalmente muy limitado durante la operación y evoluciona lentamente a lo largo del tiempo, una vez que haya cesado la acumulación en el embalse. La oxidación se inicia en la capa superficial expuesta, después que ha culminado la disposición de pulpas frescas de relaves alcalinos (no durante la operación) y progresa en profundidad a medida que los relaves drenan y la napa freática se mueve hacia el fondo del depósito. La oxidación también se produce en las resquebrajaduras verticales de los depósitos subaéteos.

Las operaciones en mina a tajo abierto, generalmente no descargan agua durante su operación, excepto durante el secado y bombeo de la mina, pero es más sencillo controlar la calidad del agua de descarga de minas a tajo abierto que de las labores subterráneas.

La predicción de la carga contaminante de las paredes de la mina y de cualquier roca adicional colocada dentro de ella, exige comprender la magnitud de la generación de ácido y de la lixiviación/almacenamiento de metales dentro de la roca.

**3. Factores mineros terciarios**

**3.a. Características físicas del material de residuo minero:** En el caso del desmonte, que es la sobrecapa y las rocas que deben extraerse para ganar acceso al mineral. La mayor parte del desmonte se produce en la explotación de minas a tajo abierto, pero a partir del desarrollo de

las obras subterráneas, se pueden producir menor cantidad de desmontes o escombros. Generalmente, esta roca es almacenada en la superficie en grandes pilas o botaderos de desmontes. Estos botaderos son mezcla de material proveniente de diferentes áreas de explotación o desarrollo minero, están constituidos por rocas gruesas y se almacenan sobre la napa freática. La mineralogía de la roca, la geoquímica y las propiedades físicas del material difieren a lo largo del botadero, con una distribución que depende del tamaño de las partículas, de la ocurrencia mineralógica y del método de construcción del botadero. En este punto, entra a tomar una importancia significativa la definición de las unidades geológicas en los residuos de roca, para organizar su deposición en el botadero.

En cuanto al tamaño de las partículas que componen el botadero de desmontes, la roca de mina de tamaño D50 (diámetro de la partícula promedio determinado por peso) es usualmente mayor que 20 cm, por lo que los minerales sulfurosos y alcalinos en un botadero de desmonte pueden estar físicamente separados por distancias sustanciales.

Los relaves de flotación se depositan generalmente en forma de pulpa con un alto contenido de agua. También presentan una baja permeabilidad por lo que el proceso de oxidación es muy lento.

En los relaves, el procesamiento del mineral en estado estacionario origina una masa fina, comparativamente homogénea en todo el depósito. En cuanto al tamaño de las partículas que componen los relaves, el 100% de la distribución granulométrica está por debajo de 0.2 mm de diámetro característico. En cuanto a la entrada de aire (oxígeno), en los relaves se produce desde la superficie a través de los poros y resquebrajaduras, a una velocidad limitada por la forma en que el aire se difunde a través de estos materiales.

Las labores subterráneas pueden ser una fuente considerable del drenaje ácido, especialmente en las labores antiguas. Las paredes expuestas se

8. Información adicional: "La enfermedad de los relaves". Biotecnología. Induambiente, 1996

9. Información adicional: "Recicladores Invisibles". Induambiente, 1995

encuentran usualmente en áreas mineralizadas y, por lo tanto, tienen contenidos de metal más elevados que el desmonte.

**3.b. Factores hidrogeológicos del material de residuo:** Es un factor minero terciario e incluyen la porosidad y permeabilidad del material de residuo.

En el caso de un botadero de desmonte, el drenaje ácido puede detectarse después de horas o días de una lluvia, mediante el desarrollo de rutas de flujo de infiltración preferenciales.

En los relaves, la infiltración se mueve muy lenta y uniformemente hacia abajo, a medida que el

agua intersticial dreña del embalse y es gradualmente desplazada por el agua contaminada con drenaje ácido, generada en la superficie. Es por esto que pueden pasar años o décadas antes de que la filtración contaminada migre o sea detectada a través de la masa de relaves y aparezca como filtración de la base.

La fuente de agua de las labores subterráneas es usualmente una combinación de agua subterránea e infiltración de la superficie. Las minas a tajo abierto, los ductos de ventilación o las construcciones subterráneas, tales como de extracción tipo embudo, pueden originar la continua inundación de las obras.



Las siguientes secciones proveen el fundamento de los métodos estándar y las metodologías para predecir la probabilidad de generación de drenaje ácido y la calidad del drenaje ácido.

monitoreo del drenaje, pruebas de laboratorio estáticas, pruebas de laboratorio cinéticas y pruebas de campo en el sitio minero. La selección del método más apropiado, los materiales de muestra y la interpretación de los datos, debería basarse en las necesidades del proyecto y en los requisitos específicos del sitio (geoquímica y mineralogía del depósito, entorno regulatorio y ambiental del lugar y métodos de manejo y control en uso o planificados).

#### 4.1 PREDICCIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO

La base del concepto de predicción es tratar de utilizar la información recopilada en la actualidad para predecir no sólo lo que ocurrirá dentro de 1 año, ni de 10, sino de los próximos 100 años. La identificación prematura de los materiales potencialmente generadores de ácido, mediante métodos confiables y exactos, puede reducir considerablemente los problemas ambientales de largo plazo y los costos de las medidas correctivas.

Cabe destacar que a través de la predicción del DAR, se intenta determinar el comportamiento de sistemas complejos y naturales, que varían de faena en faena y hasta de tipo de roca a tipo de roca dentro de una misma faena minera. Por lo tanto, no existe un único conjunto de pruebas, o número de muestras, que garantice una predicción absoluta del DAR. No obstante, con una comprensión cabal de los factores físicos y químicos que controlan el DAR, y con la aplicación práctica y científica de las técnicas que se van a discutir más adelante, se podrá identificar el potencial de generación de ácido y estimar la calidad del agua del drenaje, a corto y largo plazo.

Los objetivos específicos de un programa de pruebas de predicción dependen principalmente del tipo de mina y de su etapa de operación y son:

- La caracterización geoquímica de la roca, para identificar el potencial de generación de ácido y/o de lixiviación; y
- La predicción de la calidad y características del agua de drenaje.

La predicción puede ser realizada a una gran variedad de materiales y a través de distintos métodos, tales como estudios mineralógicos detallados, comparaciones con otros sitios,

En general en Chile, para predecir el drenaje ácido, se utilizan ensayos estáticos de Balance Ácido Base (BAB) y pH en pasta, básicamente porque dan la capacidad de generación de acidez en muy corto tiempo, son relativamente baratos, son fáciles de interpretar y de comparar con resultados en otras partes del mundo. Usualmente, estos ensayos se combinan con el ensayo de extracción o toxicidad SPLP, el cual dura máximo 24 horas y será descrito más adelante en el ítem 4.1.1.4.

En Chile, el uso de pruebas cinéticas es poco frecuente, debido a que los ensayos duran como mínimo 20 semanas y por tanto son más caros. A pesar de estas limitaciones se recomienda el uso de estas pruebas para determinar específicamente la cinética de las reacciones de oxidación, neutralización y de lixiviación de metales.

Un programa de predicción bien diseñado puede medir, no sólo la magnitud de un problema de migración de contaminantes ya existente, sino que basado en los resultados de los tests, y utilizando modelos matemáticos puede predecir el potencial y la velocidad futura de la contaminación. Esta información es necesaria para la determinación de los requerimientos de cierre y sus costos, así como para mejorar los programas de control.

Conducir un programa de predicción por etapas, desarrollando cada conjunto de pruebas a partir de los resultados del conjunto previo, es más eficiente, ya que permite que el investigador

## 4. Evaluación de Riesgos

La evaluación de riesgos es el proceso por el cual los riesgos son analizados en cuanto a los costos y los beneficios asociados con una situación y actividad particular y son evaluados en términos de aceptabilidad del riesgo, la consideración de las necesidades, el problema, y el nivel de preocupación. El riesgo, es la posibilidad de sufrir pérdidas en función de la probabilidad de ocurrencia del suceso peligroso y la magnitud de las consecuencias, tales como los efectos adversos sobre la salud, la propiedad, el medio ambiente u otras cosas de valor.

En cambio, el peligro es un proceso con potencia a generar pérdida o daño, que ocurre naturalmente o por intervención humana. La identificación del peligro, se define como la determinación de la capacidad inherente o potencial de los agentes químicos, físicos y biológicos para causar efectos adversos a los seres humanos y al ambiente. Es únicamente el primer paso en la evaluación de los riesgos y por ende no es una base apropiada sobre la cual se pueda tomar una decisión respecto al manejo de riesgos. Sin embargo, es el paso más importante del análisis; puesto que cualquier riesgo cuya identificación sea omitida, no puede ser objeto de estudio.

El nivel de detalle requerido en la predicción del drenaje ácido puede ser determinado por el uso de una evaluación de riesgo cualitativa. El uso sistemático de la información para identificar los peligros asociados con el drenaje ácido y para estimar la severidad de los impactos sobre individuos, comunidades, propiedad, el medio ambiente u otros objetos de valor determina el nivel de esfuerzo requerido para predecir el drenaje ácido.

Al evaluar el riesgo, se debe tener en cuenta la naturaleza específica de cada sitio minero y de cada cuerpo mineral. En algunas circunstancias, la evaluación cualitativa puede ser apoyada con un mínimo de pruebas de trabajo, mientras otras ubicaciones se pueden requerir evaluaciones cuantitativas con pruebas de trabajo detalladas para determinar cuando la generación de ácido podría ocurrir, y el efecto sobre la calidad del agua y receptores.

identifique los problemas específicos y que focalice sus pruebas, en vez de recolectar un gran número de muestras y preparar un gran número de pruebas que pueden no ser necesarias.

#### 4.1.1 Métodos de laboratorio

El uso de métodos de laboratorio es dependiente de la naturaleza, de las condiciones del cuerpo mineral y del medio ambiente que lo rodea. La elección de estos métodos está determinada en el desarrollo de un plan de predicción de drenaje ácido, como será descrito en el siguiente diagrama (Figura 7) y el uso de las pruebas es usualmente específico del sitio.

El enfoque actual en la predicción de la calidad del drenaje es semiempírico; se utilizan pruebas de laboratorio utilizando procedimientos estándar, tales como métodos de muestreo, ensayos estáticos, ensayos cinéticos y pruebas de extracción; para simular las reacciones de generación de ácido en un botadero de desmonte o para estimar la calidad del drenaje en muestras representativas de roca. Usualmente, estas pruebas no pretenden simular todas las condiciones de campo. Sin embargo, estos datos son extrapolados a las condiciones de campo, sobre la base de una interpretación de la relación entre valores de pruebas de laboratorio y condiciones de campo, y los factores físicos y químicos que conducen el DAR.

Estas pruebas son realizadas a través de una variedad de laboratorios de análisis químicos y universidades en Chile.

#### 4.1.1.1 Métodos de muestreo

El programa de muestreo es tal vez la etapa más crítica en un programa de pruebas de predicción. El programa inicial de muestreo debería incluir

un rango representativo de todas las unidades geoquímicas y tipos de muestras relevantes, tales como: relaves, minerales y residuos de roca, aguas y gases de poro, tratamiento de lodos, sedimentos, agua superficial y subterránea, y peces y organismos bentónicos (conjunto de organismos que viven en las profundidades de las aguas) y de las cantidades relativas de cada tipo de material, sobre las cuáles se conducen pruebas estáticas baratas y relativamente simples.

El material en el cual se centra este programa es el material con contenido mineral, pudiendo requerir más perforación para definir el potencial DAR de la roca submarginal. La siguiente etapa del muestreo debería centrarse en unidades que demostraron alta variabilidad en el muestreo original (y que, por tanto, no son claramente generadoras o consumidoras de ácido), así como en los materiales sobre los cuáles se requiere una mejor definición. Las etapas subsiguientes de muestreo y pruebas cinéticas deben centrarse en muestras que son potencialmente generadoras o consumidoras de ácido, a partir de los resultados de las pruebas estáticas.

El tamaño y número de muestras deben reflejar la cantidad de cada unidad, la acumulación propuesta de material y el "nivel de preocupación" respecto al mineral. Para determinar el número de muestras requeridas para caracterizar las unidades geológicas, existe una curva hipotética.<sup>10</sup> En la Figura 8, se presenta los pasos más importantes en un programa de muestreo.

#### 4.1.1.2 Ensayos estáticos

Los ensayos estáticos, son el primer paso de todo programa de pruebas de predicción de drenaje ácido, a los que se recurre con el fin de tomar decisiones en lo concerniente al potencial de generación de ácido de diversos materiales sobre

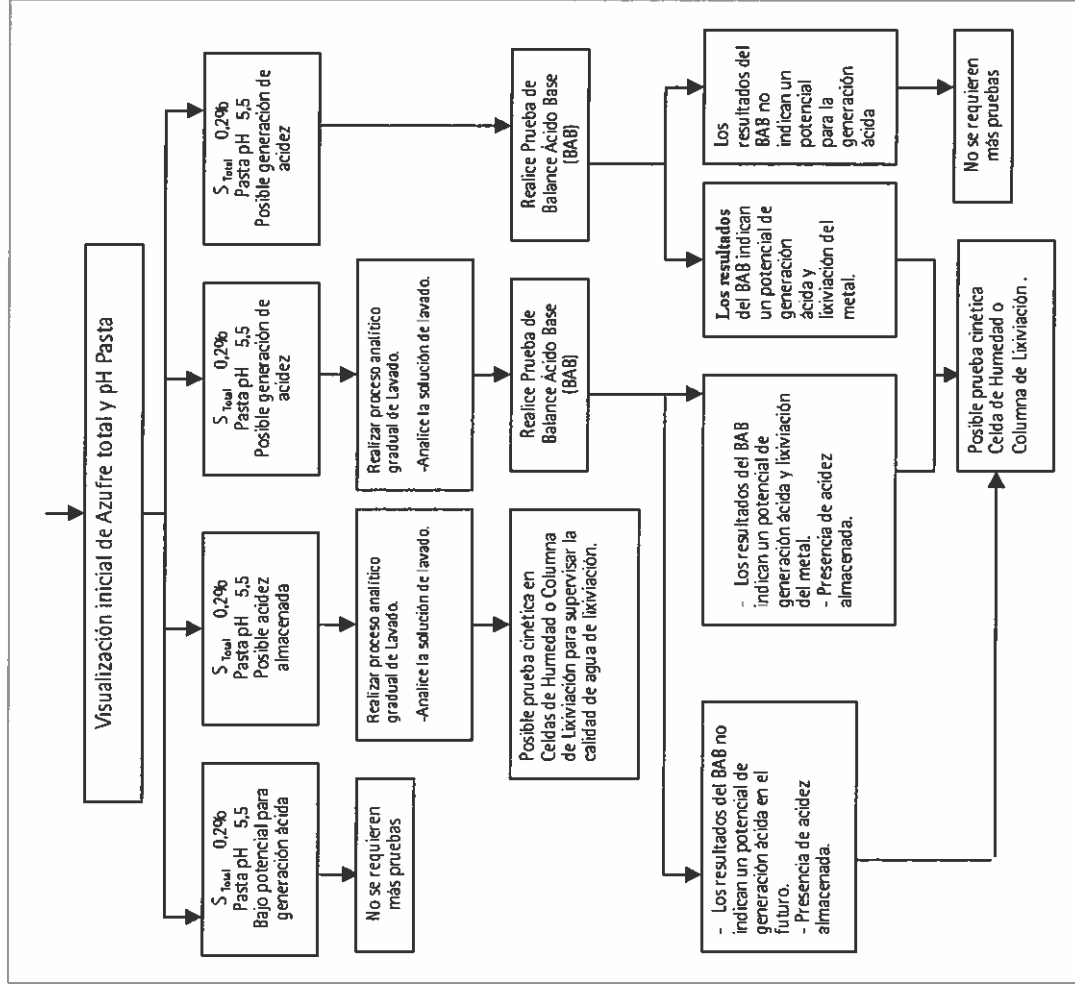


Figura 7.- Diagrama de un Programa de Predicción de DAR utilizando métodos de laboratorio.

10. Curva hipotética como guía para determinar el número de muestras requeridas para caracterizar unidades geológicas, desarrollada por Steffen Roberston and Kirsten et al., 1989.



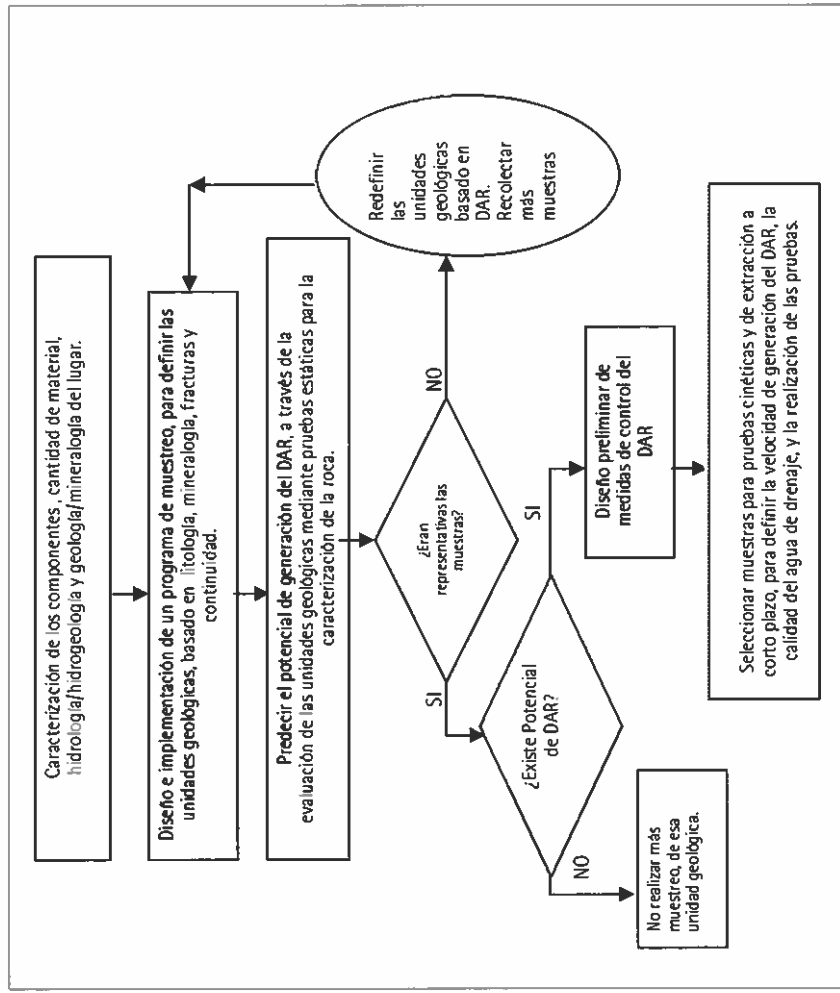


Figura 8.- Diagrama de las etapas de muestreo.

los que no se tiene documentación sustentatoria. A través de la interpretación de resultados, el test Son ensayos químicos simples, baratos y rápidos, estático permite categorizar los materiales en tres que determinan las propiedades geoquímicas del grupos: material, mediante la caracterización del potencial de generación de ácido de una muestra. El bajo costo permite el análisis de un gran número de muestras, proporcionando así un muestreo más completo para la caracterización del lugar. La mayoría de los ensayos estáticos definen el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido (minerales sulfurosos reactivos) y aquellos potencialmente consumidores de ácido en la muestra (carbonatos, hidróxidos, silicatos y arcillas). Así, una muestra será generadora neta de ácido sólo si su potencial para la generación de ácido (PA) excede a su potencial de neutralización (PN).

Este tipo de ensayos es útil sólo para predicciones cualitativas del potencial de DAR, no puede utilizarse para predecir la calidad de agua de drenaje. Otra limitación de las pruebas estáticas, es que son instantáneas, es decir no proveen información directa sobre las velocidades de los procesos o las velocidades de liberación de productos de meteorización. Los resultados pueden ser utilizados conjuntamente con otras pruebas para evaluar los procesos cinéticos. La mayoría de las investigaciones han sido llevadas a cabo sobre tipo de materiales de residuos de roca, pero los métodos son igualmente aplicables a relaves.

Existen tres tipos de pruebas estáticas, las cuáles son utilizadas actualmente en Chile, dependiendo de la situación específica.

1.- Balance ácido base (BAB)

pH en pasta y Conductividad (CE) - Dan una idea preliminar del pH in situ del material de residuo minero y de la reactividad inmediata de los minerales sulfurados y neutralizadores de acidez presentes en la muestra. Además indican la acidez total almacenada en la muestra y la extensión en que ha ocurrido la oxidación antes del análisis.

- Potencial de acidez a partir del contenido de azufre total (horno tipo Leco), sulfato y azufre sulfuro (APHA 1985).
- Potencial de neutralización.
- Contenido de carbonato.

2.- Contenido de elementos traza

Concentración soluble (para materiales meteorizados y oxidados): La oxidación de sulfuro puede aumentar la solubilidad de los componentes metálicos en el residuo. Concentración total: Aumenta significativamente la movilidad de los metales pesados y la

concentración total de metal disuelto en el drenaje ácido.

3.- Mineralogía y otras propiedades geológicas

Estudio petrográfico y sub-microscópico. Los ensayos estáticos más utilizados para determinar el balance entre los componentes de las muestras que producen ácido y los que los consumen son: BAB estándar, BAB modificado, Prueba inicial de investigación B.C., Prueba de generación neta de acidez (GNA). La evaluación mineralógica o petrográfica de las muestras, es utilizada para apoyar los resultados del método de balance ácido base. Generalmente, es realizada a través de microscopía de luz reflejada y transmitida y varias técnicas de difracción de rayos X (DRX). El Electron Probe Microanalysis (EPMA), el Scanning Electron Microscopy (SEM) y otras técnicas más especializadas, son utilizadas particularmente en la determinación de la composición química de los productos de oxidación de sulfuros, tales como bordes, inclusiones y especies amorfas (no-cristalinas). A través de estas técnicas, es posible determinar el contenido de carbono orgánico total (COT), de elementos traza a través de técnicas de digestión; y de características físicas como tamaño de la partícula, área superficial, etc.<sup>11</sup> Actualmente en Chile, las pruebas de mineralogía y otras propiedades geológicas se realizan, pero sus resultados no se interpretan en relación a la generación de drenaje ácido.

Aplicabilidad de ensayos estáticos en Chile

Ejemplo de aplicabilidad en Chile de ensayos estáticos de predicción. Predicción de generación de aguas ácidas en el botadero Los Juncos del Proyecto FACHAL. Con el fin de analizar un ejemplo de aplicabilidad en Chile de los ensayos estáticos de predicción, se menciona un extracto del Estudio de Impacto

11. Mayor información sobre Pruebas complementarias al ensayo ABA: Manual MEND Prediction, Canadá.

Ambiental del Proyecto Fachinal de la Cia. Minera CDE Chilean Mining Corporation. El trabajo tuvo por objeto efectuar una caracterización del potencial de acidificación de rocas generadoras de ácido en los distintos cuerpos mineralizados y en las principales unidades de rocas encajadoras, con el fin de prevenir un problema de generación de drenaje ácido en el botadero Los Junco del Proyecto Fachinal.

Las muestras fueron definidas de tal forma de contar con al menos dos muestras por unidad litológica, las que fueron seleccionadas por geólogos desde la bodega de testigos de sondeaje. Las muestras extraídas llegaron a un total de 15, y fueron extraídas representativamente de cada uno de los principales cuerpos mineralizados (N.E. stockwork, Taitao Vein, Brecha Zone, Guanaco Vein y Temer Vein) y a diez muestras de las principales unidades de rocas encajadoras o lastre.

El análisis de laboratorio se desarrolló utilizando el test estático BAB estándar tanto para la zona mineralizada como para la roca encajadora. Cabe destacar que este procedimiento no hace distinción entre las especies de azufre reactivas generadoras de ácido de las especies de azufre no generadoras de ácido (sulfato), lo que puede llevar a sobreestimar los valores del potencial de acidificación. De esta manera, este test sólo indica si existe o no un potencial generador de aguas ácidas.

Los resultados del test fueron analizados bajo las siguientes reglas:

- Si el potencial neto de neutralización (PNN = PN - PA) excede 20 ton/1000ton (carbonato de calcio equivalente), indica un bajo potencial de generación de ácido.
- Para muestras con alto contenido de azufre, cuando la relación entre el potencial de neutralización y potencial de generación de ácido (PN/PA) es igual o mayor que 3, se considera que existe un bajo potencial de generación de ácido.

Como resultado se puede destacar que cuatro de las cinco muestras de cuerpos mineralizados indicaron que podía existir un potencial generador de aguas ácidas marginal.

La piritita (azufre) contenida en este material, se extraerá formando parte del concentrado, razón por la cual la roca mineralizada no debiera presentar problemas por generación de ácido. En las rocas encajadoras o lastre, el porcentaje de azufre presente fluctúa entre 0,35 % a 1,5%, representando un porcentaje de piritita variable entre 0,7 % y 3%. Dos de las diez muestras también indicaron la existencia de un potencial de generación de aguas ácidas marginal. Al igual que en los cuerpos mineralizados los valores del potencial neto de neutralización son bastante altos, lo que hace probable que también exista un sistema buffer en la zona de las rocas encajadoras.

Análisis realizados en marzo de 1992 presentaron valores suficientemente bajos de potencial neto de neutralización (negativos) y de la relación resultante de PN/PA. Este análisis es un indicador de que puede existir un alto potencial generador de ácido.

Finalmente, a partir de los resultados se puede inferir que el área al sur del pit de la unidad litológica Coigües presenta tendencias a ser un área potencialmente generadora de ácido, por lo que este material deberá tener un manejo especial. Para mayor detalle de este estudio, dirigirse al Estudio de Impacto Ambiental (CONAMA).

#### 4.1.1.3 Ensayos cinéticos

Las pruebas cinéticas geoquímicas consisten en someter las muestras a intemperismo, bajo condiciones controladas de laboratorio o de campo. Definen explícitamente las velocidades de reacción tanto para la disolución de metales, como para la generación y neutralización de ácido y lixiviación, a través del tiempo y bajo condiciones específicas, lo que determinará cuanto puede retrasarse una acción de control. Por esto son más costosas y de

mayor duración (desde semanas a meses o años), que las pruebas estáticas. Por esto, los objetivos y metas de las pruebas cinéticas deben definirse muy bien, con el fin de desarrollar un programa de pruebas eficiente y efectivo. Los objetivos para llevar a cabo una prueba cinética en una mina nueva, son distintos a los de una mina en operación. Para una mina nueva las pruebas cinéticas se llevan a cabo para:

- Validar los resultados de las pruebas estáticas.
- Comparar el comportamiento de lixiviación de diferentes tipos o clases de roca de mina.
- Predecir la calidad del agua de drenaje de tipos de roca y botaderos, a corto y largo plazo.
- Seleccionar o confirmar las opciones de disposición y control.
- Representar las condiciones del lugar para determinar los factores que controlan el DAR y proporcionar datos primarios para la confección del modelo.

Para una mina existente, el DAR con frecuencia está bien establecido y proporciona una clara demostración del comportamiento del material, así como de las cargas y concentraciones del contaminante hacia el ambiente. Las pruebas cinéticas se llevan a cabo para:

- Predecir el potencial de generación de contaminantes que podría ocasionar la explotación minera posterior.
- La extensión de la oxidación y los productos de oxidación almacenados en el botadero con la finalidad de estimar el potencial de lavado y liberación de contaminantes a largo plazo, incluso sin generación posterior de ácido y sin la incorporación de ninguna medida de control.
- La efectividad de las medidas de control.
- La calidad del agua del drenaje, a largo plazo.

Una vez que se hayan establecido los objetivos del programa, se pueden seleccionar las muestras para las pruebas cinéticas. Usualmente las muestras incluirán:

- Muestras que tienen un componente fácilmente soluble (según resultados de las pruebas de lixiviación estática o de corto plazo).
- Muestras con proporciones PN:PA entre 3:1 y 1:1, rango en el cual las muestras no se definen claramente como generadoras o consumidoras de ácido;
- Muestras consumidoras de ácido para probar el potencial de consumo de ácido; y
- Muestras generadoras de ácido seleccionadas para evaluar la liberación de contaminantes y las medidas de control.

Las pruebas cinéticas son más útiles que las pruebas estáticas con respecto a la estimación de tasas de oxidación y neutralización, pero las unidades de residuos reales pueden ser muy heterogéneas y anisótropas con respecto a las distribuciones de los tipos de mineral, tamaño de la partícula y condiciones hidroclimáticas. Así, mientras una prueba cinética dada puede aproximar bien el potencial para DAR en una porción de unidad de residuo, el resultado puede no ser representativo del potencial global para DAR.

Si bien, las pruebas cinéticas indican efectivamente el comportamiento geoquímico, dependiente del tiempo, de una muestra por un período de corta duración (semanas o meses) con respecto al período potencial de persistencia del DAR, la predicción de la calidad del agua deberá realizarse para un período de años en el futuro, con el fin de simular correctamente la evolución natural de los procesos de generación de ácido. Esto será posible a través de modelos matemáticos cuantitativos que puedan extrapolar con confiabilidad los resultados, más allá del momento de las pruebas. Existen varias pruebas cinéticas que se utilizan o cuyo uso se propone:

Prueba de Confirmación de Investigación B.C., prueba de intemperismo en frasco de agitación (shake flask), prueba de extracción soxhlet, pruebas de celda de humedad, pruebas de columna de humedad, pruebas de lixiviación en columna y parcelas de prueba de campo. Las últimas cuatro

pruebas son las más utilizadas. Las diferencias entre ellas están dadas por el tamaño de la prueba, la velocidad y la cantidad de agua utilizada para el acarreo. Cabe destacar que es recomendable hacer los ensayos cinéticos con el agua que realmente existe en la zona. Específicamente en el caso del Norte de Chile, se debe considerar que las aguas tienen alto contenido de sales.

Aunque no existen métodos estándar, en el anexo 2B se presenta un resumen de los tests más populares (Prueba Estándar de Celda de Humedad y Prueba de Lixiviación en Columna), que incluye una descripción breve del método, el objetivo, la fuente y origen, las ventajas y las limitaciones asociadas al método.

#### 4.1.1.4 Ensayos de extracción

Muchos tipos de rocas tienen constituyentes fácilmente solubles, disponibles para la lixiviación inmediata, totalmente independiente de cualquier generación de ácido que pudiera ocurrir. Para determinar estos constituyentes se utilizan las pruebas de corto plazo de extracción de lixiviado.

Las pruebas de extracción tienen como objetivo general, cuantificar la movilidad de los contaminantes y a partir de esto, permitir la clasificación del material con el fin de escoger el método adecuado de disposición y contención de desechos. Estas pruebas proporcionan una indicación de la carga fácilmente soluble en un material, así como la magnitud de la generación de ácido que ya ha ocurrido en la muestra. Esta carga, a corto plazo, constituiría un problema para la calidad del agua que se libera de la roca de mina inmediatamente después de colocarla en el botadero de desmonte y que está expuesta a lixiviación por precipitación.

La mayoría de los estudios que evalúan los méritos y la utilidad relativa de cada prueba se han concentrado en las aplicaciones para desechos peligrosos.

Las pruebas de extracción usadas más frecuentemente son:

- ASTM D3987 extracción con agua destilada
- Procedimiento Especial para Extracción de Desechos B.C. (SWEP), que utiliza ácido acético como extractante;
- U.S. EPA 1312, o prueba SPLP (Synthetic Precipitation Leach Procedure), procedimiento que utiliza ácido nítrico/sulfúrico como extractante, para determinar la movilidad de los analitos inorgánicos presentes en materiales de desechos bajo la influencia de lluvia ácida.
- U.S. EPA 1311 o prueba de lixiviado TCLP (Toxicity Characteristic Leachate Procedure), que utiliza extractante derivado del ácido acético, para determinar la movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos presentes en residuos mineros. Este método es utilizado para simular la lixiviación en un basural o relleno sanitario, donde los residuos industriales son depositados junto a los residuos sanitarios, por lo que no es muy adecuado aplicarlo a residuos mineros. El hecho de utilizar un ácido orgánico como extractante sobre o sub-estima el potencial de lixiviación en residuos mineros.
- La prueba EPA 1312 (diseñada para suelos y desmonte de la mina) y un procedimiento de extracción en frasco de agitación con agua del emplazamiento o agua destilada, similar a la ASTM 3987, son las pruebas de mayor uso.

#### 4.1.2 Métodos de campo

Como la mayoría de los estudios de generación de ácido y lixiviación de metal, implican ensayos de laboratorio llevados a cabo bajo condiciones ideales, (condiciones constantes conocidas), las cuales generalmente difieren sustancialmente de las condiciones del sitio; la observación del comportamiento de meteorización y pruebas bajo condiciones del sitio, pese a ser más caras y más demorosas, representan la realidad del comportamiento del residuo en el ambiente y son esenciales en la interpretación de los resultados del laboratorio.

Como dato práctico, un método aplicable a la evaluación de pilas de roca y su exposición natural, es la observación de las características del desgaste a pequeña y gran escala sobre fragmentos de roca incluyendo cubiertas de oxidación (color y tipo) y minerales eflorescentes. El Cuadro 4, da algunos ejemplos de cubiertas de oxidación comunes.<sup>12</sup>

#### 4.1.3 Modelación matemática de potencial de generación de acidez

Los métodos de campo pueden ser aplicados en relaves, pilas de residuos de roca y excavaciones de mina existentes expuestas a mineralización

Descripción de la cubierta	Mineral o compuesto químico	Interpretación
Amarillo asociado con sulfuro de hierro	Jarrosita	Productos de oxidación fuertemente ácidos
Anaranjado y café oscuro asociado con sulfuro de hierro	Limonita	Desgaste del ión sulfuro
Anaranjado claro como una cubierta de carbonatos	Limonita	Formado de carbonato de hierro
Café claro sobre superficies de roca	Limonita	Formado por desgaste lento de silicatos
Blanco asociado con pirita	Sulfato de hierro	Cubierta fuertemente ácida
Verde o azul	Carbonato de cobre básico o sulfato de cobre	Formada por desgaste de minerales de cobre en condiciones ácidas o alcalinas

Cuadro 4.- Interpretación de cubiertas de oxidación

Nota: La limonita es un término utilizado para describir una mezcla de los minerales, goetita, lepidocrocita y jarrosita.

12. Información adicional puede ser encontrada en Jambor y Blowes (1994).

producir drenaje ácido. Para superar las incertezas inherentes en pruebas de corto plazo, además de evitar los costos prohibitivos de las pruebas a largo plazo, algunos investigadores han desarrollado modelos matemáticos para ayudar en la predicción de los efectos a largo plazo en la calidad del agua de residuos generadores de ácido.

Existen modelos de DAR que no alcanzan el ideal. No obstante, estos modelos pueden proveer valiosa información para propósitos de planificación, diseño, operación y métodos de cierre que satisfagan mejor con los objetivos económicos y ambientales; y pueden tener un rol importante en el entendimiento y predicción de la extensión del potencial de generación de acidez, incluso antes de su aparición.

Es importante recordar que todos los modelos de DAR son simplificaciones de la realidad y por consiguiente están sujetos a un alto grado de incerteza, si las suposiciones realizadas resultan en la omisión de mecanismos causales importantes. Sin embargo, esta simplificación puede reducir sustancialmente el costo y el tiempo requerido para modelar el sistema bajo estudio. Entre las fuentes de incerteza están: invalidar la estructura del modelo, variabilidad natural de ciertos parámetros, falta de calibración del parámetro y verificación del modelo. Por ejemplo, el error de considerar la presencia de materiales de neutralización en un botadero de residuos podría resultar en una sobreestimación de la tasa de generación de ácido. Similarmenete, el error de considerar condiciones hidrogeoquímicas dentro de un botadero de residuos puede evitar la consideración de las reacciones de adsorción/precipitación involucrando metales, de ese modo calcular mal el potencial de carga de metales en corrientes efluentes. Ya que la importancia de cualquier factor controlador dado puede variar de sitio en sitio, la importancia de una suposición de simplificación para cualquier

esfuerzo de modelación particular debe de ser considerada cuidadosamente.

Varios enfoques distintos para la modelación de DAR han surgido hasta la fecha. En este capítulo se presenta una descripción general de los modelos empíricos y determinísticos, pero se debe destacar que en general, todos los modelos intentan describir el comportamiento dependiente del tiempo de uno o más variables de un sistema geoquímico de residuos de mina.

En el anexo 3, se presenta un resumen de algunos modelos de predicción matemática.<sup>13</sup>

#### 4.1.3.4 Modelos empíricos

Los modelos empíricos están basados en relaciones estadísticas, como el análisis de la correlación y la regresión entre parámetros de interés (p.e: concentraciones de metales en DAR) y otras variables tales como el tiempo. Extrapolan valores de oxidación de sulfuro de datos de laboratorio y campo existentes. El método de extrapolación implica usualmente la determinación de la mejor correlación lineal a través de puntos de datos de pruebas. Las ecuaciones derivadas de esa manera pueden proveer, por ejemplo, la tasa de generación de ácido de una unidad de residuo particular al mismo tiempo, en el futuro.

Este método requiere que una base de datos adecuada sea desarrollada. El objetivo en la evaluación estadística de los datos es identificar una variable clave que pueda ser relacionada con la calidad del DAR. Este método predictivo cuenta con mediciones de campo y puede no dar razón de interacciones geoquímicas complejas que afectan la calidad futura del DAR.

Utilizando la tasa de generación de ácido planificada como una entrada para un modelo hidrogeoquímico distinto que explique la

atenuación de componentes de infiltración en suelos y la dilución en aguas receptoras, las tasas de carga de componentes y la calidad del agua receptora consiguente en el tiempo T, pueden ser estimadas.

#### Limitaciones

Los modelos empíricos, generalmente no consideran explícitamente los mecanismos causales de conducción de la oxidación de sulfuros y la neutralización de infiltración. Al contrario, tales modelos suponen que la operación de tales factores es representada correctamente en los datos de prueba. Por lo tanto, la precisión de los modelos empíricos en la predicción de DAR depende mucho de la calidad de los datos de prueba utilizado en los modelos.

Es importante destacar, que los modelos empíricos, por su naturaleza, son específicos del sitio. Ya que los modelos cuentan con tendencias reales observadas en un sitio específico, al contrario que los mecanismos causales, la mejor correlación lineal para un sitio no puede ser adoptada a ser representativa para otro sitio. Además, cambios significativos en la composición de unidades de residuos, geometría, o controles en el tiempo pueden invalidar modelos empíricos de representatividad previa. Sin embargo, los modelos empíricos pueden proveer el costo-efectivo y bastantes estimaciones confiables a corto plazo de condiciones de DAR futuras para sitios con datos temporales y espaciales suficientes. Algunos modelos empíricos aplicables en la predicción de DAR en relaves son: WATAIL (MEND 2.13.3), RATAP (MEND 1.21.1) y MINTOX (MEND PA-2). Algunos modelos empíricos aplicables en la predicción de DAR en residuos de roca son: AMD - TIME, Ziemkiewicz (1994), MINTEQA2, Morin y Hutt (1994), Q-ROCK, SRK, Vancouver, BC ACIDROCK, SENES Consultants Ltd., Richmond Hill, ON, etc.

#### 4.1.3.2 Modelos determinísticos

Estos modelos están basados en las ecuaciones teóricas que han sido desarrolladas para describir

los procesos que controlan la producción de ácido. Aplican principios científicos tales como el de conservación de masa, momentum y energía. Resolviendo las ecuaciones teóricas, es necesario la simplificación de parámetros a través del uso de geometría simplificada, homogeneidad, condiciones iniciales idealizadas y condiciones límites. Los parámetros estimados (p.e. tasas de reacción química, coeficientes de transferencia de masa), tienen un rol crítico en la modelación mecánica, y a menudo están basados en estudios de laboratorio, modelos físicos y experimentos de campo en algunos casos.

La propuesta de simulación permite a los usuarios examinar la potencial tasa de oxidación de sulfuro y la calidad de infiltración resultante durante períodos de 10 a 100 años en el futuro, como su evolución durante el tiempo, bajo la influencia cambiante de los factores controladores de la tasa.

Dentro de los modelos determinísticos, se encuentran los modelos de equilibrio termodinámico, modelos de transferencia de masa y modelos de transferencia de masa asociados con modelos de flujos.

#### Limitaciones

Los modelos hidrológicos de predicción de caudales no saturados consideran normalmente instalaciones muy homogéneas, no pueden considerar otros mecanismos como la "recarga rápida", y necesitan muchos datos para disminuir las incertezas.

Entre las preocupaciones mayores que enfrenta la fiabilidad de los modelos determinísticos son la calibración y validación del modelo. Los parámetros del modelo deben ser ajustados para coincidir con las condiciones predominantes en un sitio real. Por lo tanto, características fiables de los residuos, datos hidrológicos y geoquímicos deben ser colectados e incorporados en la estructura del modelo.

La validación, requiere la comparación de las predicciones del modelo con los resultados de

13. Información adicional puede ser encontrada en MEND MANUAL Volume 3 - Prediction, MEND 5.4.2c.

muestreo reales de campo. Hasta la fecha la disponibilidad de los datos de campo para validación es muy limitada.

**Aplicabilidad de evaluación de riesgos en Chile. Evaluación y Gestión de Riesgo de Drenaje Ácido de Ripios, Mina El Abra, Chile. R.C.Ford, S.A. Pierce, M.D. Ankeny, J.Kelsey.**

Con el fin de analizar un ejemplo de aplicabilidad en Chile de una metodología de evaluación de riesgos, se menciona los objetivos, metodología y conclusiones de la "Evaluación y Gestión de Riesgo de Drenaje Ácido de ripios, Mina El Abra, Chile".

La Mina El Abra está localizada en el Desierto de Atacama, II Región en el Norte de Chile, aproximadamente 200 Km al noreste de Antofagasta. El Abra es una empresa que pertenece en igual porcentaje a Cyprus Amax Minerals Company y a la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO).

La mina explota un cuerpo mineral pórfido Cu-Mo y empezó operando en Agosto de 1996 con una tasa anual de aproximadamente 450.000 toneladas de cobre catódico.

La evaluación del riesgo de drenaje ácido de ripios (lixiviado) en zonas climáticas áridas consiste en dos componentes: (1) si los minerales secundarios y residuales liberarán ácido y metales cuando son expuestos a la lluvia, y (2) si es probable que la precipitación ambiental infiltre, y eventualmente impacte los recursos de agua subterránea o superficiales. El riesgo de drenaje ácido de ripios en El Abra fue evaluado utilizando métodos geoquímicos convencionales (tales como ensayos estáticos y de extracción) y modelos de flujo no saturados (tales como HELP y UNSAT-H2.O). A través de los resultados de estos métodos la probabilidad de generación de mala calidad de agua de ripios fue evaluada, junto con la

probabilidad de ocurrencia de filtración. Los resultados de las pruebas geoquímicas demuestran que cualquier filtración proveniente del ripio sería de mala calidad y requeriría varios volúmenes de agua de poros, antes que las concentraciones de metal fueran disminuidas significativamente.

Los resultados de la modelación de flujo no saturado esperan que el drenaje anual de acumulaciones de ripios en la Mina El Abra sea mínimo si el contenido de humedad residual de el material localizado es mantenido bajo 0.187 vol/vol. La modelación demuestra que la contribución de la precipitación a la filtración es mínima en un tiempo marco de 30 años y la filtración e infiltración son improbablemente dadas en condiciones climáticas áridas. A partir de esto, el contenido de humedad residual es monitoreado y mantenido bajo 0.187 para minimizar la probabilidad de filtración y por tanto el riesgo ambiental asociado con este material.<sup>14</sup>

## 5. Gestión de Riesgos

Las mejores prácticas ambientales en el manejo de residuos mineros sulfurados, deben involucrar la incorporación de una gestión de riesgos aplicada a la generación de drenaje ácido, que incluya:

**La identificación de riesgos o peligros.** El paso inicial en el control de la oxidación de sulfuros, es la comprensión de los factores físicos y químicos que influyen en la reacción de oxidación. Además, la pronta caracterización geoquímica de los materiales de más alto riesgo (productores de ácido por potencial de oxidación de sulfuros), y los materiales con potencial para el uso de medidas de remediación, permitirá clasificar y cuantificar el riesgo de generación de ácido de todos los residuos a ser desechados a lo largo de la vida útil de la operación, a través del desarrollo de un inventario, actualizado y perfeccionado.

**La evaluación del riesgo ambiental basado en los factores del sitio específico.** Se debe adaptar la evaluación del riesgo ambiental al sitio específico con sus recursos locales y con su medio ambiente local para producir la forma más apropiada de control.

**El balance costo-beneficio.** Antes de seleccionar una medida de control, la compañía minera debe hacer un análisis costo-beneficio de la aplicación de dicha medida. En el capítulo 7, sólo se mencionarán las consideraciones generales en la evaluación costo-beneficio de las medidas de control.

**La implementación de los principios de diseño de minas y prácticas de gestión de minas para evitar o minimizar los riesgos.** La estrategia de gestión más costo efectiva para la oxidación de sulfuro es la integración de controles hidrológicos y de oxidación a través de todos los estados de operación minera, desde la planificación hasta el cierre de la mina, y trabajar en una forma coordinada para minimizar el riesgo de desarrollo de drenaje ácido. Los principios de diseño y prácticas de gestión de minas, se describen en el ítem 5.11, 5.12 y 5.13.

14. Información adicional en: "Evaluation and Management of Acid Drainage Risk from Spent Ore, El Abra Mine, Chile".

**El monitoreo.** Es importante, el monitoreo para evaluar la ejecución de estrategias de remediación y la evaluación de la efectividad del monitoreo. Será descrito más adelante en el ítem 5.1.3.3.

**La revisión del nivel de seguridad.** La preparación de la fuerza de trabajo, para identificar y manejar estos materiales diferentes, y los protocolos de muestreo, son críticos para asegurar que los riesgos sean cuantificados con un alto nivel de confianza.

**5.1 MANEJO Y CONTROL DEL DRENAJE ÁCIDO**

El término "control", se utiliza para hacer referencia a las medidas tomadas para limitar la generación o migración de drenaje ácido contaminado que podría originar un impacto ambiental adverso.

La limitación de la generación y la migración del drenaje ácido, es un área técnicamente compleja, y requiere la participación de expertos de numerosas disciplinas técnicas. Los factores y condiciones específicos del sitio aumentan esta complejidad, y a menudo necesitan una investigación del sitio específico. Como resultado, las tecnologías de drenaje ácido no son aplicables universalmente. La aplicación de una tecnología particular a un sitio puede ser invalidada por

costos prohibitivos u otros factores que afectan la gestión de los residuos mineros.

Las distintas opciones de control, se aplican dependiendo de la etapa de desarrollo del DAR. El control primario se aplica antes de la generación del drenaje ácido y los controles secundario y terciario se aplican después de la generación o liberación de contaminantes del drenaje ácido (Figura 9).

Hasta la fecha, en Chile no se ha aplicado ninguna medida específica de control de la generación, transporte y posibles efectos del drenaje ácido en el medio ambiente, esto puede deberse a la falta de conciencia y de evaluación de la escala y de la duración de este fenómeno en cada caso. Además el hecho de que en el norte de Chile, las precipitaciones son intermitentes, esto hace que la generación de drenaje ácido sea poco frecuente. Sin embargo, el clima árido y las altas tasas de evaporación del norte de Chile, permite la acumulación de sulfatos, lo que frecuentemente corresponde a acidez almacenada, y conlleva a generaciones de drenaje ácido más agudas.

Las opciones técnicas para manejar el drenaje ácido son considerablemente mayores en los sitios mineros nuevos donde las estrategias de control pueden ser implementadas como parte del plan de desarrollo minero, para evitar estrategias de

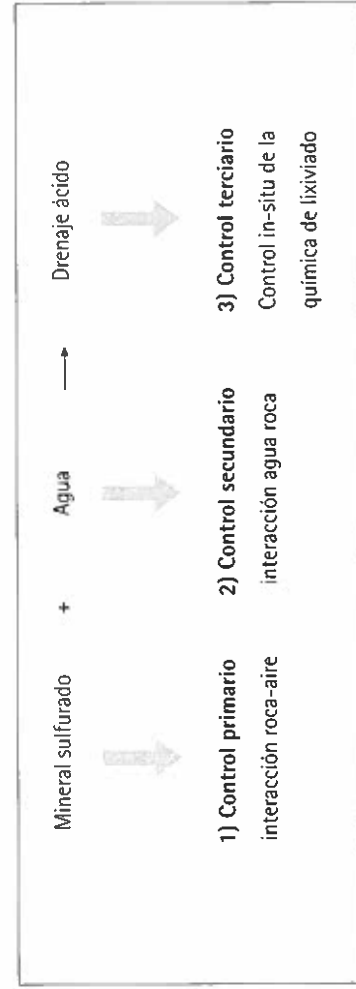


Figura 9.- Objetivos principales de las opciones de control.

remediación de alto costo. Con fuentes antiguas de drenaje ácido, las medidas de abatimiento pueden ser menores debido a las limitaciones económicas y a la gravedad de los impactos.

A continuación se presentan los tres tipos de control (primario, secundario y terciario), ordenados en función a la etapa de desarrollo del drenaje ácido.

**5.1.1 Control primario: Reacciones de oxidación**

El control primario, es el control de la interacción roca-aire, con el fin de limitar o reducir las reacciones de oxidación de minerales sulfurados y por ende limitar o reducir la generación de ácido en la fuente. Se aplica antes de la generación del drenaje ácido in situ.

Es la opción más conveniente, ya que a través de la eliminación de uno o más de los componentes esenciales en la generación de drenaje ácido (principalmente eliminación de oxígeno), se inhibe la oxidación de sulfuros y por ende la generación de ácido no se manifestará, así el control secundario y terciario serán innecesarios. Sin embargo, en muchas faenas mineras en operación o en cierre en Chile, el potencial del drenaje ácido no fue reconocido en un inicio, por lo que estas medidas de control no podrán ser aplicadas, pero sí son una buena alternativa para la planificación de minas nuevas.

A continuación se describe brevemente las diferentes metodologías de control primario ordenadas en función a su potencial aplicabilidad en Chile.

**5.1.1.1 Cubiertas y sellos**

Las cubiertas y sellos han sido desarrolladas y utilizadas para diversos propósitos, tales como: controlar el flujo de oxígeno (generalmente no es

suficiente para evitar la oxidación), controlar la migración mediante la reducción de la infiltración y otros como: recuperación, revegetación, y control de polvo.

Este ítem sólo se referirá a las cubiertas y sellos para controlar el flujo de oxígeno (control primario), pero se debe destacar que son más adecuadas para controlar la infiltración y, por lo tanto, la migración de contaminantes.<sup>15</sup> Éstas, se pueden colocar en la superficie y lados de un embalse de relaves reactivos o botaderos, para restringir el acceso de oxígeno y, así inhibir la generación de ácido. Para limitar la entrada de oxígeno, la cubierta deberá tener muy baja permeabilidad a estos elementos y no tener agujeros o imperfecciones a través de los cuales puedan ingresar. No se considera una solución práctica excluir el agua, hasta el punto de que no se presente la generación de ácido, excepto en climas muy áridos, dado que las cubiertas y sellos contribuyen a inhibir la subsecuente migración de contaminantes.

Una de las preocupaciones a más largo plazo en relación con la integridad de las cubiertas está vinculada con la resistencia de la cubierta a las roturas, efectos horadantes de raíces y animales, la erosión y degradación debido al intemperismo y a la acción de las heladas.

**5.1.1.2 Desulfuración/manejo y aislamiento selectivo de residuos sulfurados**

El objetivo de la desulfuración es disminuir el potencial de acidez (PA) mediante la reducción del azufre a sulfuro. El manejo selectivo y aislamiento de residuos mineros sulfurados requiere la integración de prácticas de gestión en el programa de planificación minero, junto con la educación y preparación de la mano de obra para facilitar las prácticas operacionales en el manejo selectivo de materiales de alto riesgo.

15. En el ítem 5.1.2 del presente manual, se describen las cubiertas y sellos para controlar la infiltración.

Este método puede ser utilizado para disminuir el potencial de generación de ácido de los relaves, generalmente separando por flotación el concentrado sulfurado (pirita). Esta técnica, ha demostrado ser efectiva, aunque costosa para reducir el contenido de sulfuros de relaves antes de su disposición en un tranque.

Posteriormente sería necesario, el manejo y aislamiento selectivo de este concentrado, enviándolos bajo tierra con un terraplén en pasta. En algunas minas, este concentrado se combina con cemento y se utiliza como relleno en labores subterráneas.<sup>16</sup>

El método de desulfuración/manejo y aislamiento selectivo de residuos sulfurosos, también puede ser utilizado en minerales de baja ley. Pero, sólo si existe una zona específica, geológicamente distinta, de material sulfuroso. De otro modo, los operadores tendrán mucha dificultad para lograr exitosamente la identificación.

Los siguientes factores deberían ser considerados, en la aislación de residuos:

- La naturaleza del contacto entre los tipos de roca. La separación es práctica, sólo si puede ser realizada en forma limpia, es decir, si la roca benigna segregada está significativamente contaminada con roca reactiva, o hay presencia de inclusiones que no puedan ser separadas, el beneficio de la segregación es limitado.
- La separación es probablemente mejor aplicada, cuando está disponible un sistema de gestión, específicamente una opción de disposición que prevea o limite substancialmente la roca de generación de drenaje ácido, por ejemplo, disposición bajo agua.

La figura 10, muestra cómo los residuos sulfurados pueden ser aislados dentro de una pila de residuos.

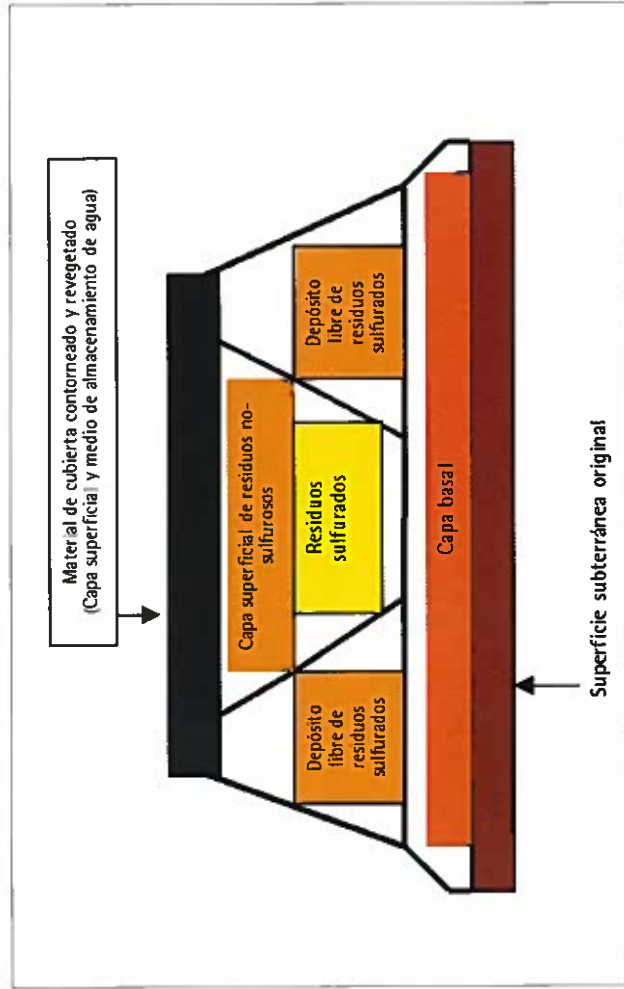


Figura 10. Esquema de estrategia de aislamiento dentro de una acumulación de residuo.

16. Esta técnica alternativa tiene varias ventajas. Información adicional en: Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas. Capítulo IV.

### 5.1.1.3 Micro-encapsulación o envoltura de la pirita

Este proceso consiste en cubrir ciertos residuos mineros, para prevenir la oxidación de la pirita. El mecanismo conlleva a la lixiviación de residuos con una solución fosfatada de (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) y acetato de sodio (NaAc) con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). La superficie de la pirita es oxidada por el peróxido para liberar óxidos de hierro, los cuales reaccionan con la solución fosfatada para formar un precipitado de fosfato (FePO<sub>4</sub>) que precipita en la superficie formando la envoltura.<sup>17</sup>

### 5.1.1.4 Mezcla o aditivos básicos

El método de mezcla, consiste en mezclar al menos dos tipos de residuos de roca, con potencial de generación de acidez variado, potencial de neutralización y contenido de metal para balancear el potencial de generación de acidez y alcalinidad y minimizar el riesgo de generación neta de ácido. Al mezclar o añadir material alcalino, se controla el pH en el rango cercano al neutro, se limita la oxidación química, y se previene el establecimiento de la oxidación bacteriamente catalizada. La probabilidad de que las condiciones alcalinas sean mantenidas alrededor de la oxidación de granos minerales de hierro azufre, depende de la cantidad de alcalinidad llevadas en solución y la cantidad, tipo y reactividad de los minerales sulfurosos existentes a lo largo del camino de flujo, hasta que la siguiente fuente de recarga de alcalinidad sea alcanzada.

La efectividad de la mezcla depende principalmente de la minuciosidad del mezclado, del movimiento de agua a través del sistema, la naturaleza del contacto de la roca o agua ácida con los aditivos neutralizantes o agua, la proporción de material neutro en exceso y, finalmente, el tipo y pureza del aditivo neutralizante.

### Aplicaciones

- La mezcla o adición alcalina pueden constituir alternativas factibles en cualquier residuo minero, con baja cantidad de material generador de ácido y con una fuente de alcalinos. Se puede añadir piedra caliza, cal e hidróxido de sodio a los relaves durante el procesamiento; o bien se puede colocar materiales alcalinos en capas dentro de la roca que genera ácido, durante la acumulación de estériles.

- La mezcla de rocas de mina es una forma de adición de base, en la que la roca con exceso de alcalinidad se mezcla con la roca generadora de ácido.

### Limitaciones

- Las principales limitaciones son los costos (debido al manejo del material), limitaciones de ejecución (posibilidad de concentraciones elevadas de metales en pH neutro), incertidumbre técnica (predicción del comportamiento geoquímico), y la necesidad de caracterización amplia del material con anterioridad a la construcción. Por estas razones el mezclado es un enfoque atractivo, pero aún no está bien definido.
- Para la mezcla adecuada de materiales alcalinos con desechos gruesos de roca se puede requerir la trituración y mezcla profunda.
- Se requiere de exhaustivas pruebas de laboratorio con el objeto de demostrar la efectividad de la mezcla.

- Hasta la fecha, no hay ejemplos de operación exitosos a largo plazo utilizando este método. Usualmente este método, es llevado a cabo en conjunto con otras estrategias de control tales como encapsulamiento y/o cubiertas de suelos.

### 5.1.1.5 Inhibición de las bacterias

Ciertas bacterias son conocidas por aumentar enormemente la tasa de producción de acidez de

17. Información adicional de esta técnica en: "Resumen de opciones ingenieriles para el manejo de drenaje ácido producido en botaderos y tranques de relaves, (después de Marszalek 1996).

materiales piríticos. Los bactericidas han sido desarrollados para inhibir el crecimiento de estos microorganismos. Su efecto primario es minimizar el rol catalítico, de las bacterias que permiten convertir el hierro ferroso en hierro férrico, bajo condiciones ácidas (donde el hierro férrico es el principal oxidante), rompiendo las cadenas de reacciones bioquímicas que aumentan la tasa de oxidación de residuos mineros.

Se ha demostrado que el lauril sulfato de sodio y otros tensoactivos aniónicos son excelentes bactericidas para la *Thiobacillus ferrooxidans*. Esto llevó al desarrollo de un sistema de tratamiento que consiste en una pulverización de la zona afectada, para lograr un efecto inmediato. La aplicación del biocida debe ser en forma de un producto granulado de liberación lenta, para mantener una concentración activa del biocida en el tiempo, a pesar de la biodegradación y el lavado que se produce por acción del agua. Este método es fácil de aplicar, económico, predeciblemente efectivo y se puede aplicar durante las operaciones activas mineras y durante la recuperación de suelos.

Debido a que es sólo una solución a corto plazo y parcialmente efectiva, los bactericidas necesitan ser parte de un planteamiento integral para el manejo de residuos sulfurados. La mayoría de ellos, son frecuentemente aplicados a acumulaciones de minerales temporales o a acumulaciones de residuos de roca para retrasar el comienzo de condiciones ácidas, o para reducir los costos de tratamientos secundarios tales como dosificación de cal a drenaje/aguas de escurrimiento, mientras otras soluciones más permanentes son implementadas.

Hasta la fecha esta tecnología, ha sido utilizada principalmente en la industria de carbón de Estados Unidos, en la etapa de rehabilitación, que permita generar una cubierta de vegetación activa antes del comienzo de la generación de drenaje ácido, ya que se ha demostrado que la aplicación de bactericidas previenen la formación de ácido

y la lixiviación de metales, disminuyen drásticamente la presencia de Acidithiobacillus ferrooxidans, incrementando paralelamente el desarrollo de bacterias heterotróficas que son beneficiosas para el suelo y ayudan a la reforestación de los suelos.

Como inhibidor bacterial también se puede utilizar cloruro. Esto es teórico, ya que hasta la fecha no se ha conocido una aplicación a escala completa. En este caso, se debe destacar que las aguas del Norte de Chile tienen alto contenido de cloruro, lo que genera una química completamente distinta a la de las aguas de otros países, e interesante de investigar.

#### 5.1.1.6 Cubiertas de agua y descarga subacuática

Las cubiertas de agua proveen el control más efectivo del flujo de oxígeno y por tanto de las tasas de oxidación de sulfuro, actuando como una barrera para la difusión de oxígeno desde la atmósfera a los sulfuros sumergidos. La velocidad de oxidación de sulfuro es considerablemente más baja en la fase acuosa (agua), que en la fase gaseosa (aire), en por lo menos cuatro órdenes de magnitud. Debido a que el coeficiente de difusión de oxígeno es menor en agua, la máxima concentración de oxígeno disuelto en aguas naturales es aproximadamente 25.000 veces menor que la encontrada en la atmósfera. Una vez que el oxígeno disponible en el agua es consumido, la tasa de reacción es reducida ya que su tasa de reposición es relativamente lenta.

Las formas de establecer una cubierta de agua es a través de:

- Acumulación en un cuerpo de agua existente; el lago, como una estrategia de gestión a largo plazo, es atractivo, ya que los sedimentos tienden a ser un medio ambiente estable para los sulfuros. Además de la baja concentración de oxígeno disponible, los sedimentos tienen una tendencia natural de llegar a ser reductores químicamente, debido a los altos niveles de

materia orgánica y actividad biológica;
 

- Acumulación e inundación en una mina de tajo abierto o labores subterráneas;
- Acumulación en un depósito construido, como el tranque de relaves o lago artificial, y mantenimiento de una cubierta de agua.

Los factores que deberán considerarse en el diseño de una instalación de descarga subacuática, son los siguientes:

- Mantenimiento de una cubierta de agua (balance hidrológico). Es recomendable una cubierta de agua de al menos 0,5 m de agua permanente.
- Movimiento de agua. Se deberá considerar efectos, tales como; olas, transporte de hielo, convección y cambios estacionales en los lagos, perturbación de la superficie sólida, etc.
- Contaminantes solubles. Se deberá considerar el potencial de disolución de contaminantes fácilmente solubles.

- Impacto ambiental. Se puede evaluar el efecto de la descarga de relaves y rocas de desechos en agua fresca o en ambientes marinos o terrestres.

La selección del método más apropiado dependerá de factores específicos para cada faena, incluyendo la naturaleza y cantidad de roca de mina y/o relaves, la topografía del lugar y la disponibilidad de cuerpos de agua existentes, los objetivos de uso y mejoramiento de tierras y lagos, los factores hidrológicos del sitio minero y, finalmente, los requisitos normativos y la aceptación pública. Se deberán realizar pruebas para demostrar los beneficios y limitaciones técnicas, así como los impactos ambientales, durante la construcción y a largo plazo. Por algún tiempo, también se requerirá efectuar el control de la estabilidad física y química.

#### Aplicaciones

- Las cubiertas de agua son logradadas más fácilmente en climas templados.
- Mientras el uso de lagos naturales o artificiales, como depósito de residuos de mina, puede comprometer otros usos beneficiosos para estos

cuerpos de agua, en algunas instancias ésta puede ser la mejor opción.

- A largo plazo, la inundación probablemente constituirá el mejor mecanismo de control de la generación adicional de ácido.

#### Limitaciones

- Las cubiertas de agua han sido aplicadas en muchos sitios, pero no son aplicables universalmente. Factores del sitio específico, la capacidad para mantener una cobertura de agua durante el largo plazo, la integridad de las estructuras de contención, lugar y riesgos potenciales del sitio específico debido a eventos sísmicos, eventos de tormenta severa, la geoquímica o reactividad del material, etc, pueden invalidar el uso de esta técnica.
- En Chile, la mayoría de las faenas mineras se encuentran en el norte donde las condiciones climáticas son demasiado secas para que ésta sea una alternativa factible. Sin embargo, bajo condiciones adecuadas, el estado de conocimiento actual es suficiente para contar con un diseño responsable de operación y cierre de instalaciones de gestión de residuos utilizando cubiertas de agua para relaves y residuos frescos y oxidados.

#### 5.1.1.7 Saturación

Las cubiertas de suelo pueden sólo alcanzar la eficiencia de las cubiertas de agua cuando una proporción del material de cubierta permanece saturado, a través de una capa de napa freática suspendida o una capa superficial saturada, con cubierta de cieno. Este forma de cubierta de agua, reduce la tasa de difusión de oxígeno a través de la cubierta y provee la base para el uso de espacios de poros saturados de humedad en relaves, como medio de reducción del flujo de oxígeno desde la atmósfera a través de los espacios de poros de relaves a minerales sulfurados.

El uso de una columna de agua elevada, por sí mismo no previene la generación de ácido, ya que pueden existir zonas cercanas a la superficie y



relaves drenados que permanecen disponibles para la oxidación.<sup>18</sup> Sin embargo, puede ser ventajoso en costo cuando son aplicados en conjunto con otros enfoques para controlar la generación de ácido.

#### Aplicaciones

Otros métodos para asegurar la saturación pueden ser necesarios en climas más secos, por ejemplo, establecer tierra húmeda permanente sobre superficies de estanques de relaves, o diseñar una cubierta de capa compleja para atrapar precipitación sobre la superficie de los relaves e inhibir la evaporación. Por otro lado, las columnas de agua han sido incluidas en las estrategias de cierre de tranques de relaves, pero sólo han llegado a ser recientemente propuestos o aplicados como una base principal de plan de manejo.

#### Limitaciones

Generalmente, la saturación de espacios de poros, en pilas de residuos de roca como un medio de control de la generación de ácido, no es una opción.

#### 5.1.2 Control secundario: Migración de contaminantes

Controla principalmente la interacción agua-roca, para eliminar la migración o movilización de contaminantes a través de la infiltración y escurrimiento.

Debido a que en la mayoría de los sitios mineros, el potencial del drenaje ácido no es identificado antes de la operación, sino que después de la generación, la medida más efectiva de control es evitar la migración de contaminantes, los cuáles pueden ser transportados al ambiente receptor, ya sea por el agua superficial como subterránea. Así el control de la migración se obtiene con el control del flujo aguas arriba del agua superficial

o subterránea y/o con el control de la infiltración en la superficie de la instalación.

A continuación se describe brevemente las diferentes metodologías de control secundario, ordenadas en función a su potencial aplicabilidad en Chile.

#### 5.1.2.1 Reducción de infiltración

La principal fuente de agua que contribuye al transporte de contaminantes es la infiltración de lluvias, donde el método más práctico para controlarla son las cubiertas y sellos secos o de baja permeabilidad. Los objetivos de los sistemas de cubiertas secas son minimizar la afluencia de agua y proveer una barrera para la difusión de oxígeno. Además, se espera que las cubiertas secas sean resistentes a la erosión y provean apoyo para la vegetación. Los casos de estudios en Australia y Canadá, demuestran claramente el potencial de las cubiertas secas como un método de control a largo plazo. Se considera las cubiertas simples, la metodología con mayor potencial de aplicabilidad, especialmente en la zona norte de Chile. La selección de materiales para cubierta, depende de los objetivos de la colocación de éstas, es decir, el grado de reducción de infiltración, tanto de oxígeno como de agua que se requiere, de los materiales de cubierta potenciales en el sitio y de la duración necesaria del control. Además, depende de las condiciones climáticas del sitio, en vez de las condiciones climáticas regionales.

Existe un potencial para cualquier sistema de cubierta seca, a fracasar y permitir entrar infiltración contaminada al medio ambiente natural. Los sistemas de cubierta mal diseñados pueden fallar durante un periodo de 10 a 50 años o incluso arriba de 100 años después de su construcción. La clave es prevenir el sistema de cubierta seca de fallas en el corto plazo.

18. Como técnica alternativa, se puede utilizar relaves de pasta o espesado, para reducir significativamente las existencias de relaves sulfurados disponibles para la oxidación.

Todos los tipos de cubierta requieren de control y mantenimiento de largo plazo aunque la proporción de ellos puede diferir sustancialmente entre los diferentes tipos. Entre los tipos de cubiertas tenemos:

#### a) Cubiertas simples de suelo

Las cubiertas simples se construyen con una sola capa de suelo, puede utilizarse un suelo de grano fino, como arcilla, ciénaga o morrena (materiales arrancados, transportados y después depositados por un glaciar).

La experiencia demuestra que las cubiertas simples pueden reducir la infiltración hasta en un 50%, dependiendo del patrón de infiltración (es decir, mientras mayor sea la tasa de precipitación, mayor será el grado de escorrential). Sin embargo, están sujetas al resquebrajamiento por heladas, erosión del viento y el agua, sedimentación, acción horadante de raíces y animales y desecación, como consecuencia de las grandes variaciones estacionales en el contenido de humedad, que pueden originar un aumento de permeabilidad, conductividad hidráulica y la infiltración a través del tiempo.

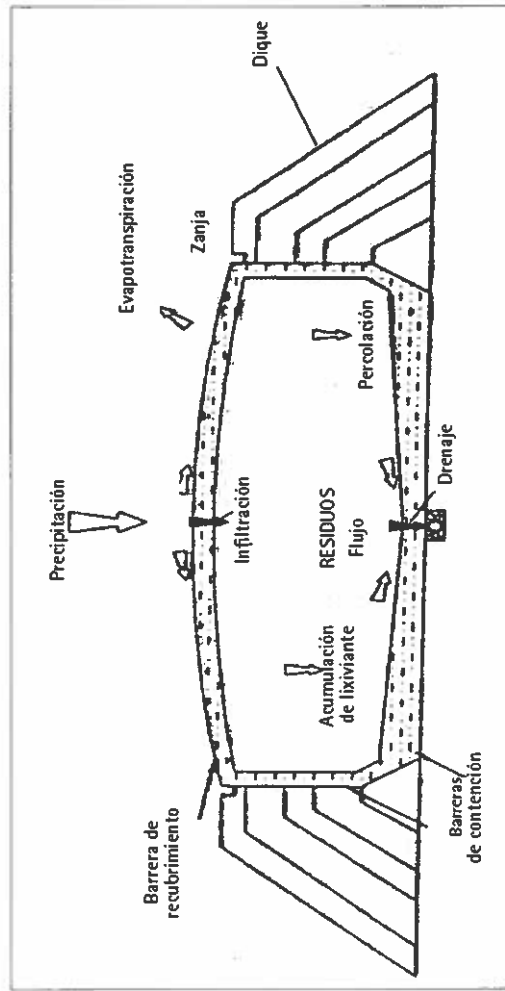


Figura 11.- Cubierta simple de suelo.

Las cubiertas de una sola capa de suelo probablemente no reduzcan de manera suficiente la infiltración, como para disminuir la carga de contaminantes que emana del botadero. A continuación, se presenta un esquema de un botadero con una cubierta simple (Figura 11).

#### b) Cubiertas sintéticas

En la industria minera están siendo consideradas muchas cubiertas de muy baja permeabilidad, de materiales sintéticos desarrolladas en otras aplicaciones industriales. El tipo más común de estas cubiertas es una especie de geomembrana, tales como: Geomembrana Bentónica (Somex),

Membrana HDPE (Poirier) y Encapsulación (Weedon).

Además, existen programas de investigación de otras cubiertas sintéticas, incluyendo los selladores asfálticos y por rociado, tales como el asfalto, el concreto, la epoxia, el poliéster, el polisulfuro, la silicona, el caucho sintético, etc. En general los geopolímeros, que son compuestos de minerales, principalmente sílice, fosfato y oxígeno, se unen para formar un producto de tipo cerámico y pueden aplicarse sobre una superficie adecuadamente nivelada y preparada, para formar una barrera contra la infiltración y la difusión de

oxígeno, pero la aplicación de éstos en las cubiertas de desechos mineros aún no ha sido demostrada. El torcretó, con un aditivo de humo de sílice y un refuerzo de fibra de polipropileno, puede ser efectivo para controlar las resquebrajaduras.<sup>19</sup>

**Aplicaciones**

La colocación de materiales geosintéticos como capas impermeables, es una tecnología usada por años en aplicaciones como la lixiviación en pilas y rellenado. En los últimos años, la industria minera ha considerado el uso de estas membranas "impermeables" como cubiertas contra la generación de ácido para limitar el flujo tanto de oxígeno como de agua, (es decir, como control tanto de la generación de ácido como de la migración de contaminantes

**Limitaciones**

La colocación de cubiertas puede complicarse por las dificultades que suponen las condiciones de la superficie, tales como pendientes y el acceso y estabilidades de las superficies sobre las cuales se colocarán. Estas dificultades, con frecuencia,

hacen que un tipo particular de cubierta no sea funcional o, prohibitivo, en términos de costos. En el caso de los botaderos, la colocación de cualquier tipo de cubierta superficial, con excepción de la de agua, generalmente es sencilla, ya que la parte superior de éste, generalmente es de fácil acceso y tránsito y casi plana. En el caso de los relaves, la colocación de cubiertas está limitada por el grado de saturación, tamaño de partícula y estabilidad física resultante de la superficie de sólidos.

**c) Cubiertas complejas**

Las cubiertas complejas se construyen con varias capas de diferentes características, y funciones específicas, con el fin de mejorar significativamente la exclusión del agua y oxígeno, la estabilidad a largo plazo y por ende la efectividad de reducción de infiltración. El diseño y composición de la cubierta determinan la permeabilidad de la misma al agua y al aire, así como el posible flujo que atraviese hasta la roca subyacente.

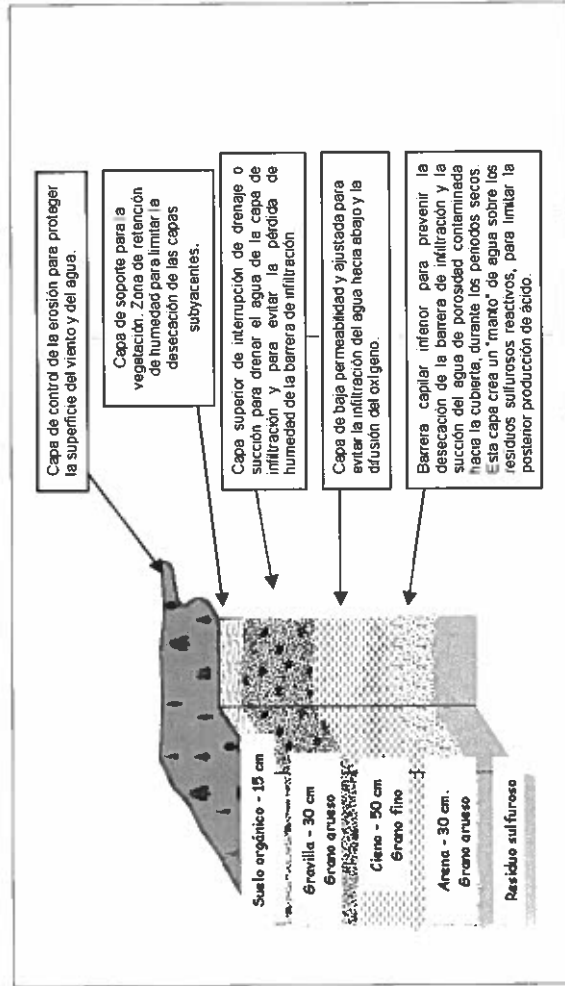


Figura 12.- Componentes y materiales de una cubierta compleja

19. Información adicional de las ventajas y limitaciones del torcretó en la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas. Dirección General de Asuntos Ambientales, República del Perú, Ministerio de Energía y Minas, Capítulo IV Control.

Las cubiertas complejas están constituidas usualmente de una combinación de distintos componentes y materiales (Figura 12). Pueden también construirse con suelos y/o materiales sintéticos o con una combinación de éstos. Los principales componentes que afectan el balance total de agua de la cubierta son: precipitación, evapotranspiración, escorrentía y filtración. Sin cubierta, casi toda la precipitación se infiltra en el botadero, pudiendo emerger luego como filtración. Una cubierta provista de una capa de membrana sintética es, sin duda, la barrera de infiltración más efectiva; sin embargo, la selección de una cubierta adecuada dependerá de las condiciones del sitio y del nivel de control que se requiera y la efectividad de éstas, tendrá que ser determinada a partir del control del rendimiento de las cubiertas reales en el campo.

En cuanto a la aplicación de estas cubiertas, en Europa existen dos minas que han construido cubiertas complejas sobre la roca de mina generadora de ácido para mantener una capa de permeabilidad baja y reducir, de esta manera, la entrada de oxígeno y el flujo de agua a niveles muy bajos. La mina Bersbo, en Suecia ha incorporado capas de arcilla y Cefyll (ceniza estabilizada con cemento), mientras que la mina Kjöli, en Noruega, ha instalado una cubierta compleja que incorpora una membrana HDPE sintética de 2 mm.

**5.1.2.2 Co-disposición de residuos de roca y relaves**

El concepto de co-disposición combina los residuos de roca y relaves en un único dispositivo de manejo de residuos. Las ventajas potenciales pueden incluir: un volumen reducido de residuos, ya que los relaves pueden ocupar el volumen vacío en los residuos de roca; eliminación de la necesidad de tranques de relaves o división de botaderos de residuos, disponibilidad de oxígeno reducida por mantener saturado o cercano a condiciones saturadas alrededor de los residuos de roca reactivos; reducida infiltración y producción de filtración de los residuos debido a la permeabilidad

reducida, más superficie de escurrimiento y más alta capacidad de retención de agua para aumentar las pérdidas evaporativas.

Para regiones donde los riesgos sísmicos son mayores, la co-disposición ofrece el beneficio potencial de mantener una masa co-mezclada que es insaturada y no es propensa a la licuefacción. El desafío en este tiempo es demostrar cómo esta masa sería situada y confirmar que el depósito co-mezclado retendrá las propiedades físicas y químicas en el largo plazo.

**Aplicaciones**

La co-disposición de relaves en una matriz de residuos de roca para producir un material de cubierta artificial no ha sido intentada, aunque ofrece una gran promesa, especialmente en regiones escasas de materiales de cubierta adecuados. El desafío es demostrar que estos materiales pueden ser económica y factiblemente formados, y aplicados sin producir problemas ambientales adicionales (procesos de pérdida de reactivo, erosión de refinios, problemas de estabilidad, etc). Sin embargo, se debe destacar que una de las limitaciones de este método es el alto costo para una exitosa aplicación.

**5.1.2.3 Desviación del agua superficial**

El agua superficial puede desviarse de la mayoría de las áreas de un sitio minero, en forma sencilla mediante el apilamiento de desmonte en forma de bermas y perfiles superficiales y también a través del empleo de zanjas.

**Aplicaciones**

Para el largo plazo, la medida de diseño más efectiva, en cuanto a costos, es la selección apropiada del sitio minero, con el fin de evitar canales de drenaje naturales y minimizar contacto con el desagüe de agua superficial. Los asientos favorables para la minimización del desagüe de agua superficial se encuentran en la cresta de los declives o en pequeñas mesetas, cerca del extremo de corriente, cuesta arriba de una fuente de agua.

**Limitaciones**

• Generalmente es difícil de conservar a largo plazo sin mantenimiento. Las zanjas y bermas requieren de un mantenimiento anual, particularmente en áreas donde la formación de hielo y los ciclos de hielo/deshielo perturban la integridad física de la estructura.

• La ubicación del sitio minero en la cresta de los declives o en pequeñas mesetas para controlar la migración, puede presentar implicancias desfavorables en cuanto a costos, por las distancias o la ubicación con respecto a la mina.

**5.1.2.4 Intercepción del agua subterránea**

El agua subterránea es interceptada con el fin de mantenerla a un nivel por debajo de las labores mineras, durante la operación de la mina. Sin embargo, después del cierre de ésta, la napa freática natural se reestablece, y el flujo de agua subterránea podría ser considerable en la faena.

La intercepción del agua subterránea puede ser, como alternativa, todo un reto técnico para el control del DAR; para ello se requiere de una detallada investigación con el propósito de definir el sistema de flujo subterráneo, tanto local como regional, los efectos del uso corriente debajo de cualquier intercepción de este sistema y, finalmente las alternativas técnicamente adecuadas para el control.<sup>20</sup>

**5.1.3 Control terciario: Recolección y tratamiento de drenaje ácido**

La recolección y el tratamiento del drenaje ácido es el control in-situ de la química de los lixiviados, el cual es implementado después de la generación o liberación de contaminantes. Este tipo de control se puede realizar a través de métodos de tratamiento químico activo, que involucran el tratamiento en una planta química; y métodos de

tratamiento pasivo que se basan en el tratamiento "natural", a través de pantanos. El primero requiere atención y control continuo, mientras que el segundo funciona sin mantenimiento ni control riguroso.

El tratamiento químico implica tecnología, la cual está bien implementada y es utilizada, en varias operaciones mineras, ofreciendo un método seguro a corto plazo de protección ambiental, es decir para faenas en operación, pero no constituye una solución costo efectiva a largo plazo, especialmente en minas donde el drenaje ácido sigue generándose, por décadas después del cierre de la mina.

A medida que crece el nivel de obligaciones de una adecuado cierre y rehabilitación de un sitio minero, las consideraciones técnicas y financieras por mantener a perpetuidad una planta de tratamiento químico han aumentado el interés por desarrollar opciones efectivas de tratamiento pasivo.

A continuación se describen técnicas de control terciario del drenaje ácido ordenadas en función de su utilización a lo largo de la vida útil de una operación minera.

**5.1.3.1 Recolección**

Este proceso se realiza a través de un sistema que recolecta las filtraciones y drenajes, minimizando también el volumen destinado al tratamiento. La recolección de las soluciones (escorrentía), se logra mediante un zanjado superficial, mientras que los flujos subterráneos pueden requerir la instalación de surcos colectores, pozos hacia los cuales se descarga la pluma del contaminante, o bien muros interceptadores para forzar el flujo de agua subterránea hacia la superficie para su recolección y tratamiento.

El diseño de los sistemas de recolección, es extremadamente específico para cada faena, y puede depender de la ubicación del flujo contaminante, la topografía, la geología y la hidrología del lugar. Se debe destacar que el diseño hidrológico es el tema clave que necesita ser evaluado.

El diseño de los sistemas tanto de intercepción (desviación), como de recolección dependerá de la descarga instantánea peak de estas tomas; y los

períodos de retorno del diseño dependerán del riesgo determinado de la descarga de una porción del efluente contaminado.

**5.1.3.2 Tratamiento activo**

El tratamiento activo del DAR es una tecnología ampliamente conocida y aceptada. La secuencia de operaciones unitarias en un tratamiento activo, se presentan en el siguiente diagrama de flujos (Figura 13).

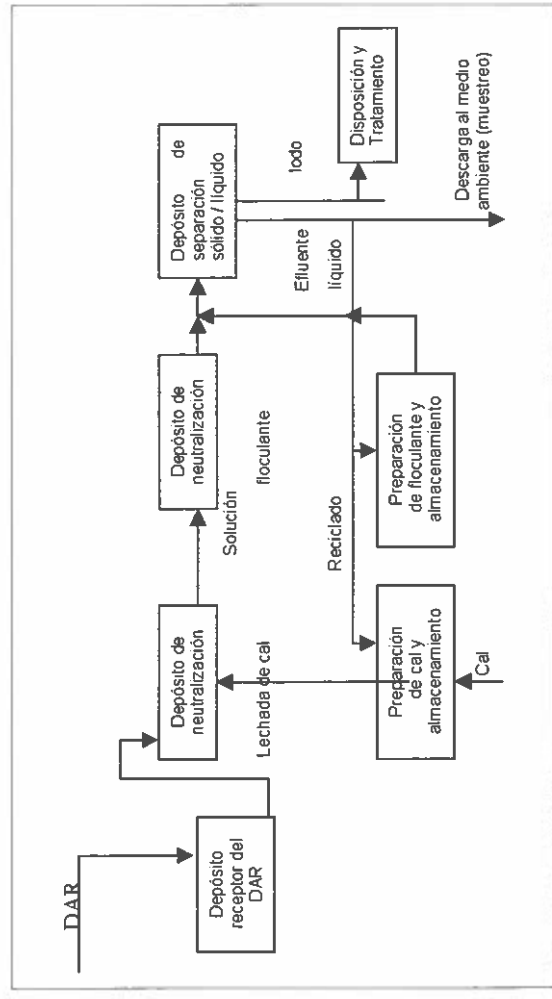


Figura 13.- Diagrama del Proceso convencional de Tratamiento activo de drenaje ácido.

A continuación se presenta una breve descripción de los tres principales tipos de tratamiento activo de drenaje ácido: Neutralización química, Disposición y Tratamiento de lodos y Recuperación de Metales.

**a) Neutralización química**

La neutralización del DAR es el método más común, ya que es de operación simple, de bajo

costo, y puede operar en forma continua y automática. Sin embargo, genera gran cantidad de precipitados y se tiene dificultades para separar los iones complejos. La química consiste en un circuito de neutralización química para extraer de una solución:

20. Las técnicas de intercepción de agua subterránea son: Colocación selectiva, Paredes de Pulpa, Cortinas de inyecciones, Zanjas profundas para drenaje y Perforaciones o excavaciones con descarga de bombeo controlada.

- La acidez - por neutralización. Ejm:  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   
cal apagada yeso

- Los metales pesados - por hidrólisis y precipitación.



- Otros contaminantes como sólidos suspendidos, arseniatos, antimonio por formación de complejos, seguido de una precipitación.

Ej: Precipitación de aniones con hierro férrico; por ejemplo arsénico



Si la calidad del efluente final no cumple aún la normativa ambiental existente, algunos métodos complementarios tales como, la precipitación de sulfuros; la adsorción o métodos de intercambio iónico pueden ser aplicados como un paso adicional.

La extracción de iones metálicos de soluciones contaminadas por precipitación como sulfuros tiene muchas ventajas sobre la precipitación de hidróxidos, ya que las solubilidades de los sulfuros son varios órdenes de magnitud más bajas que las correspondientes a hidróxidos. Por lo tanto, este proceso tiene el potencial para reducir la concentración de metales disueltos a niveles extremadamente bajos (< 1 mg/L en el rango de pH 3-7). Los sulfuros metálicos se forman más rápidamente y tienen mucha menor solubilidad que los hidróxidos. Sin embargo, ellos son propensos a la oxidación y resolubilización bajo la acción de agua y oxígeno. Por lo tanto los lodos sulfurados deben ser almacenados cuidadosamente. La posibilidad de reciclar los precipitados de sulfuro para recuperar metal es una clara posibilidad, que será discutida en el siguiente ítem.

Luego del tratamiento de neutralización, la precipitación de los hidróxidos correspondiente a los metales, dejan en solución la concentración

densidad (2-5 % p/p sólidos). Sin embargo, en los últimos años ha comenzado a utilizarse el Proceso de Lodo de Alta Densidad (HDS), que es una modificación del proceso básico incorporando el reciclamiento del lodo en el reactor de neutralización para lograr un lodo final de densidad de 10-25% de sólidos.

Uno de los aspectos más difíciles del tratamiento químico es la descarga del lodo de tratamiento, el cual contiene la acidez extraída y metales en los precipitados de óxidos e hidróxidos metálicos y yeso. Usualmente, existe un lodo de grano fino, que es de difícil filtración o sedimentación, lodos de las plantas de tratamiento que tienen entre 10 a 15% de sólidos por peso.

Además, se debe mantener la estabilidad química del lodo con el fin de evitar la redisolución de los contaminantes metálicos. Por lo general, los lodos deben depositarse en un área preparada para limitar el posible lavado y/o mantención de condiciones alcalinas. La práctica actual en algunas faenas, consiste en incluir los lodos de las plantas de tratamiento con los sólidos de relaves alcalinos, o bien depositarlos en un área de depósito bajo el agua. En este sentido, la descarga de lodos constituye un área de investigación activa, que requiere de una cuidadosa planificación como parte del diseño de la planta.

### c) Recuperación de metales

Cuando se presentan metales disueltos en el DAR a una concentración que puede tener un interés económico, la recuperación del metal a través de la extracción por solventes y la electro-obtención u otras tecnologías de extracción puede ser una alternativa económicamente viable.

Bajo algunas circunstancias puede ser rentable acelerar la oxidación de una gran cantidad de residuos para proveer un efluente rico en iones metálicos y mejorar la viabilidad del proceso. La lixiviación, la extracción por solventes y la electro-obtención, permiten recuperar el cobre contenido en la solución ácida en forma de cátodo, pero a su vez generar un residuo (refino), que

puede ser más ácido que el drenaje ácido convencional, conteniendo esencialmente los mismos componentes menos el metal destinado a la recuperación, lo que no constituye una solución final al problema ambiental. Es por esto, que generalmente es necesario utilizar tecnologías de tratamiento alcalino convencional para neutralizar tales efluentes después que el metal ha sido extraído.

### Aplicabilidad en Chile de Recuperación de Metales en El Teniente

#### Planta de Hidrometalurgia en la División El Teniente (Codelco-Chile)

El origen de las aguas ácidas en la división El Teniente se debe a tres factores propios de una explotación minera subterránea:

- Sectores abandonados en el interior de la mina (cráter), producto del avance de la explotación.
- La sobrecarga mineralizada de baja ley presente entre el término de la explotación del blok y la superficie.
- Las precipitaciones, principalmente el derretimiento de la nieve acumulada en los cráteres formados por el término de la explotación.

El derretimiento de la nieve sobre el mineral de sobrecarga, produce la lixiviación natural del mineral expuesto en la superficie, dando como resultado aguas ácidas con un contenido de cobre que oscila entre 1,5 y 2,5 g/L y pH entre 2 y 3, la cual es recolectada por los sectores abandonados. Por lo motivos mencionados anteriormente es posible aseverar que siempre habrá presencia de agua ácida o al menos mientras dure la operación mina y se agote el mineral expuesto a la superficie en sectores abandonados.

El tratamiento de las aguas ácidas se realiza en una planta de Sx-Ew, que puede operar en paralelo (flujo de: 170 L/seg), o en serie (flujo de: 250 L/seg); para producir cátodos de 99,9% Cu. La inversión total de este proyecto en el año 1984 fue de 17.350 KUSD\$.

21. Información adicional: Stumm and Morgan, 1981.

El tratamiento de aguas ácidas a través de una Planta Cu Sx-Ew se puede entender a través del siguiente esquema (Figura 14):

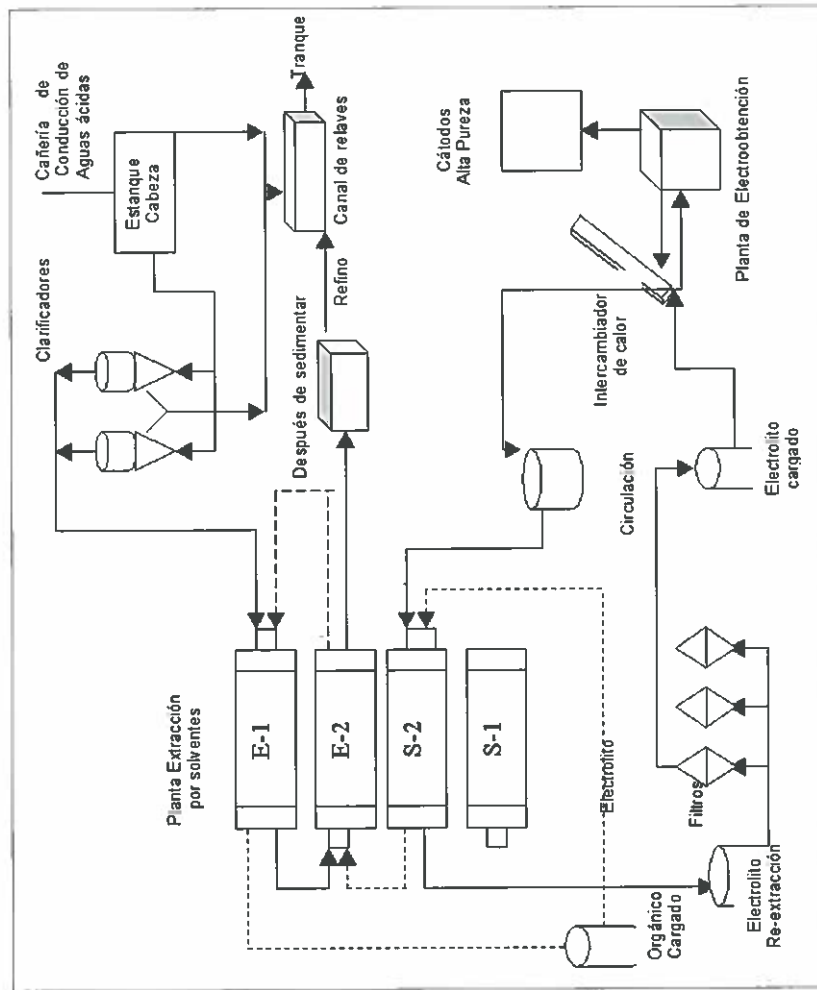


Figura 14.- Diagrama de la Planta Cu Sx-Ew.

5.1.3 Tratamiento pasivo

Éste es uno de los avances más prometedores en el tratamiento del DAR, ya que los procesos naturales cumplen un rol fundamental en la eliminación de la acidez, sulfatos y metales de las aguas de drenaje ácido. Ellos pueden ser utilizados durante la operación de la mina, como también después del cierre de esta. Sin embargo, generalmente son utilizados para faenas en cierre.

Aplicaciones

- Pueden ser utilizados en forma efectiva para aumentar los niveles de alcalinidad en aguas de infiltración de residuos sulfurados.

- En comparación con un tratamiento convencional, tienen un menor costo de capital, energía y consumo de reactivos, y necesitan menos atención operacional y mantenimiento.

Limitaciones

- Están diseñados para introducir alcalinidad en aguas de drenaje con flujos relativamente bajos y acidez baja.
- A alturas superiores a 3000 m, el tratamiento pasivo, sería una buena opción, pero el problema es que requieren de un área más extensa y más plana, en comparación con los tratamientos convencionales.
- La aplicación de estos métodos a gran escala

como un reemplazo de los métodos de tratamiento por neutralización tradicional, aún no es viable.

a) Canal de caliza anóxico (CCA)

Es un sistema de pre-tratamiento utilizado antes que el drenaje ácido pase por un pantano anaeróbico. Este sistema se construye e instala en el punto de descarga para interceptar flujos de agua de mina subterránea y son cubiertos con arcilla o suelo compactado para evitar el contacto del drenaje ácido con el oxígeno atmosférico (bajo condiciones anaeróbicas), lo que minimiza la precipitación de los hidróxidos de metal dentro del canal y sobre las partículas de caliza. El agua ácida que fluye a través del canal construido de grava de caliza gruesa, disuelve la caliza y libera alcalinidad como bicarbonato. El efluente es descargado en un estanque de sedimentación, donde una aireación posterior y estancamiento de la descarga del canal da como resultado la neutralización del ácido, ajuste del pH, y la precipitación del metal en la laguna de decantación

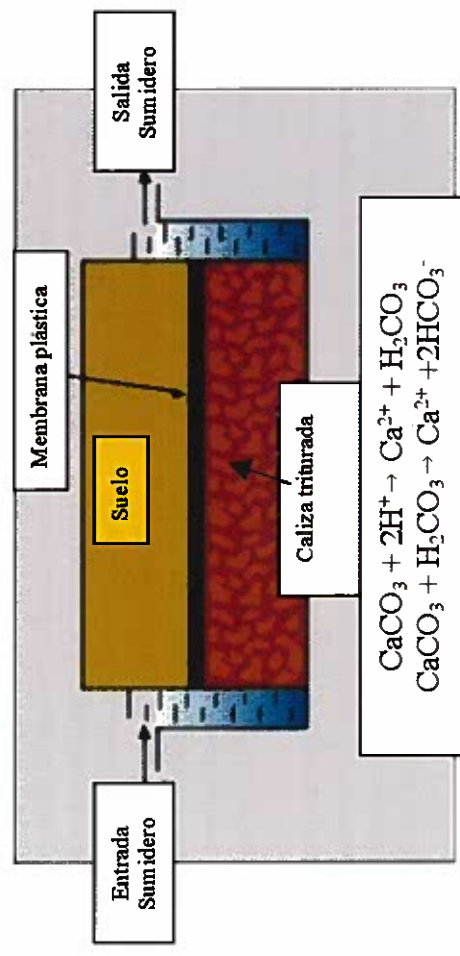


Figura 15- Sección transversal de un canal de caliza anóxico.

Generalmente los canales de caliza anóxico tienen una vida efectiva relativamente corta ya que los materiales alcalinos en el canal serán consumidos requiriendo alguna mantención en curso del sistema, pero ellos no cesan la función repentinamente, sino que su eficiencia se reduce a través del tiempo.<sup>22</sup>

**b) Canales de caliza óxicos**

Este sistema puede ser el método más simple de tratamiento pasivo. Se utiliza cuando el DAR debe ser transportado por alguna distancia antes de o durante el tratamiento y ha mostrado ser un mecanismo efectivo para la remoción de Fe y para la generación de pequeñas cantidades de alcalinidad.

Estos sistemas pueden ser construidos, ya sea en una zanja de desagüe de caliza que recolecta el agua de drenaje ácido contaminada, o colocando fragmentos de caliza directamente en una corriente contaminada.

La disolución de la caliza permite aumentar el pH, sin embargo la cobertura de la caliza por  $Fe(CO_3)$  y  $Fe(OH)_3$  producida por la neutralización reduce la generación de alcalinidad, requiriendo de esta forma grandes cantidades de caliza para asegurar el éxito a largo plazo.

Estos sistemas son más efectivos cuando son localizados sobre pendientes mayores que 20%, ya que los flujos de alta velocidad y la turbulencia mejoran el rendimiento de los canales por su acción abrasiva, manteniendo el precipitado en suspensión y desplazando la cobertura del Fe sobre la caliza.

Algunas veces son utilizados forros impermeables bajo la caliza para prevenir la infiltración del DAR en la columna de agua subterránea.

**c) Sistemas de flujo vertical**

Estos sistemas combinan los mecanismos de tratamiento de pantanos anaeróbicos y los canales de caliza anóxico en un intento por compensar las limitaciones de ambos. Los elementos básicos de estos sistemas son similares al de los pantanos anaeróbicos (capa de caliza y capa orgánica), pero además se añade un sistema de desagüe dentro de la capa de caliza con el objeto que el DAR entre en contacto con la caliza y la materia orgánica (Figura 16).

Este sistema se construye en una cuenca de agua hermética, donde el sistema de desagüe es construido con una columna de agua para regular las profundidades del agua y asegurar que las capas orgánicas y de caliza permanezcan sumergidas.

Como las aguas del DAR fluyen hacia abajo a través de la capa orgánica, se realizan dos funciones esenciales: el oxígeno disuelto en el DAR es removido por las bacterias aeróbicas que utilizan compuestos orgánicos biodegradables como fuentes de energía y la bacteria reductora de sulfato en la zona anaeróbica de la capa orgánica genera alcalinidad.

En la capa de caliza, el  $CaCO_3$  es disuelto por las aguas anóxicas y ácidas que se transportan hacia abajo por el sistema de desagüe, produciendo alcalinidad adicional. El efluente final es descargado desde el sistema de desagüe de la columna reguladora de agua a un estanque de sedimentación para permitir la neutralización del ácido y la precipitación de metales antes de la última descarga.

Para las descargas de DAR críticas, varios sistemas de flujo vertical pueden ser conectadas en serie para generar alcalinidad sucesiva hasta que los objetivos del tratamiento sean alcanzados.<sup>23</sup>

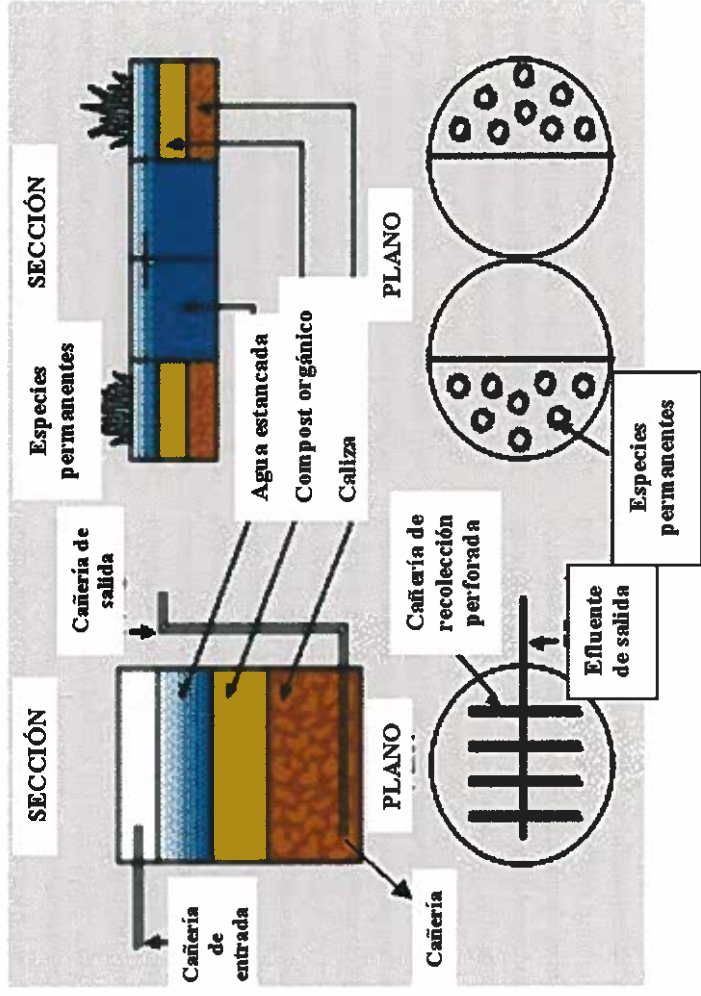


Figura 16.- Sistema de flujo vertical.

**d) Pantanos e inundaciones**

Los pantanos proveen una alternativa de sistema de tratamiento pasivo de baja mantención que puede ser combinada provechosamente con otros sistemas de tratamiento, tales como canales de caliza anóxicos o sistemas de flujo vertical, como una etapa de tratamiento final al drenaje ácido.

Un pantano típico consta de una base con un substrato adecuado en el fondo para sostener una vegetación emergente. Actualmente, la *Typha latifolia* (cattails) es la vegetación más utilizada.

El drenaje ácido es dirigido en un modelo de flujo continuo a través del pantano, manteniendo una cubierta de agua de 10-50 cm sobre la base. Las condiciones de oxidación prevalecen en la superficie del pantano, llegando a ser progresivamente anaeróbica dentro del substrato.

Los pantanos cuentan con varios procesos químicos y biológicos para atenuar la acidez y los

metales, sin embargo, el efecto más simple es la remoción de metales que lleguen a estar acomplejados en el substrato, así como un aumento en el pH debido a los materiales alcalinos y/o reducción del sulfato. Otro mecanismo físico simple es la filtración de material suspendido.

**Aplicaciones**

Los pantanos también pueden ser establecidos sobre la superficie de tranques de relaves para mantener un medio ambiente reductor y saturado, de ese modo reducir la disponibilidad de oxígeno por debajo de materiales de residuos sulfurados.

En el sur de Chile, se forman naturalmente pantanos en varias zonas mineras y a alturas superiores a 3.500m, por el tipo de clima. Los pantanos artificiales tienen las mismas propiedades y ofrecen varios procesos para la neutralización y descontaminación del drenaje ácido.

22. Información adicional sobre el diseño y el tamaño del CCA: Hedim and Waiczlaf (1994), Hedim and others, 1994 a y en "Passive Treatment of Acid-Mine Drainage with Vertical Flow System".

23. Mayor información sobre Sistemas de Flujo Vertical: Passive Treatment of Acid-Mine Drainage with Vertical Flow System.

**Limitaciones**

Estos sistemas presentan dificultades en el tratamiento de grandes flujos, relieve físico y tierra disponible para grandes estanques de pantanos. Bajo algunas circunstancias el sustrato puede llegar a ser obstruido con lodos precipitados o saturado con metales, de ese modo el rendimiento de los pantanos se reduce con el tiempo. En estos casos el pantano puede ser drenado, los sedimentos removidos y el pantano re- establecido. Esto destaca la necesidad de gestión actual de pantanos utilizados para tales propósitos.

En general, a alturas superiores a 3000 m, los pantanos podrían ser aplicables, pero a esa altura en el norte de Chile, no hay suficiente espacio plano (5-10 ha).

Hay dos tipos de pantanos artificiales, que son utilizados actualmente en el sector minero de otros países: Pantanos aeróbicos y Pantanos anaeróbicos.

Los pantanos aeróbicos (Figura 17), son sistemas de flujo superficial utilizados efectivamente para el tratamiento de aguas alcalinas netas o pre-tratadas a través de un canal de caliza anóxica. Debido a esto, sirven únicamente para el tratamiento de aguas que contienen las especies de hierro, aluminio y manganeso en forma reducida.

Sus principales funciones son: (a) Aumentar bacteriamente la cinética de la precipitación de hierro férrico para producir hidróxido férrico sobre

la superficie del sustrato y (b) neutralizar la acidez a través de la oxidación de hierro ferroso.

Los metales precipitan principalmente en hidróxidos, en una secuencia controlada por sus concentraciones relativas y el pH. El pH de los sistemas, generalmente no es suficiente para la precipitación eficiente de elementos como Cd y Ni. Sin embargo, estos metales pueden ser removidos a través de procesos de sorción. La co-precipitación y adsorción sobre la superficie del hidróxido férrico también da como resultado la remoción parcial de otros iones (por ejemplo arsénico).

Estos sistemas son similares a los pantanos naturales. Constan de una cuenca o canal con un fondo relativamente impermeable para prevenir la filtración; de suelo u otro medio adecuado para soportar la vegetación y también contienen agua a un flujo de profundidad relativamente superficial (10-50 cm) sobre la superficie del suelo. Se caracterizan por una razón alta de superficie/volumen para maximizar la difusión de oxígeno.

Si fueran aplicados en el norte de Chile, tendrían como ventaja la alta tasa de evaporación de esta zona. En la mayoría de los lugares, es aplicable este tipo de pantano a 2.500 m de altura. La eficiencia se controla por el tiempo de residencia y el pH. Generalmente pueden inmovilizar 10g Fe/m<sup>2</sup> día.

Los pantanos anaeróbicos (Figura 18), son caracterizados por un flujo sub-superficial y son

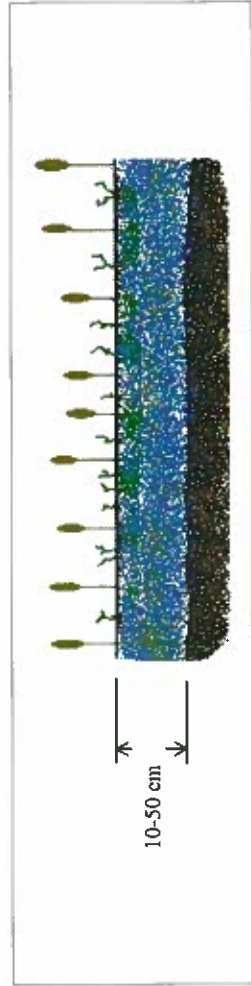


Figura 17.- Sección característica de un pantano aeróbico

adecuados para el tratamiento de aguas de mina con altos niveles de oxígeno disuelto, hierro férrico (Fe<sup>+3</sup>), metales (Me<sup>+2</sup>) y acidez meta.

En forma son similares a los pantanos aeróbicos, pero contienen una delgada capa de sustrato orgánico. Este sustrato promueve los procesos químicos y microbiológicos que generan alcalinidad y llevan a cabo la reducción del sulfato.

Los metales no se oxidan, sino que se precipitan en sulfuros o se complejan en el sustrato. Los materiales típicos que son utilizados como sustratos en estos pantanos incluyen productos orgánicos naturales de bajo costo y residuos tales como compost, estiércol de caballo y vaca, heno, turba, viruta de madera y polvo de sierra.

Uno de los principales procesos que ocurre en estos pantanos, es la reducción directa de sulfato a sulfuro de hidrógeno, que es producida por bacterias especializadas, (Desulfovibrio y Desulfotomaculum). Estas bacterias son organismos heterotróficos y tienen un metabolismo respiratorio en el que los sulfatos, sulfitos y/u otros componentes reducibles de azufre sirven como aceptores finales de electrones, con la consiguiente producción de sulfuro de hidrógeno; la subsecuente interacción y precipitación de los metales; y el aumento de alcalinidad que puede provocar la precipitación de metal como carbonato también. Estas bacterias se encuentran naturalmente en los pantanos y en los sedimentos y han sido utilizadas experimentalmente para tratar corrientes de drenaje ácido.

En lugar del voluminoso lodo de hidróxido férrico, el precipitado de sulfuro de hierro es más denso y se forma dentro del sustrato. Los sulfuros serán estables por el tiempo dentro del sustrato, con tal que las condiciones anóxicas se mantengan. Un problema que puede ser encontrado bajo condiciones anaeróbicas es el potencial reductor de disolución de (oxi)hidróxido férrico. Durante este proceso, los iones de metales pesados coprecipitados o adsorbidos sobre el hidróxido férrico serán liberados.

La reducción natural in situ de sulfatos ha sido reconocida en una mina subterránea en Noruega. Esta tecnología puede tener potencial para instalar un sistema de tratamiento biológico de relativamente bajo mantenimiento para minas subterráneas abandonadas, que no sólo modificará el pH en el efluente, sino que también extraerá el contenido de metales solubles como compuestos sulfurosos estables. Las condiciones reductoras bajo las cuales se depositan estos compuestos de sulfuros metálicos también proporcionan una instalación de almacenamiento ideal de largo plazo para la preservación de lodos de tratamiento. Este tipo de pantanos, deben ser saturados y mojados permanentemente, por lo que tienen mayor aplicabilidad a mayores alturas (>2.500m).

El proceso de decisión para seleccionar el sistema de tratamiento pasivo más adecuado para una descarga dada, se presenta en la siguiente figura 19.

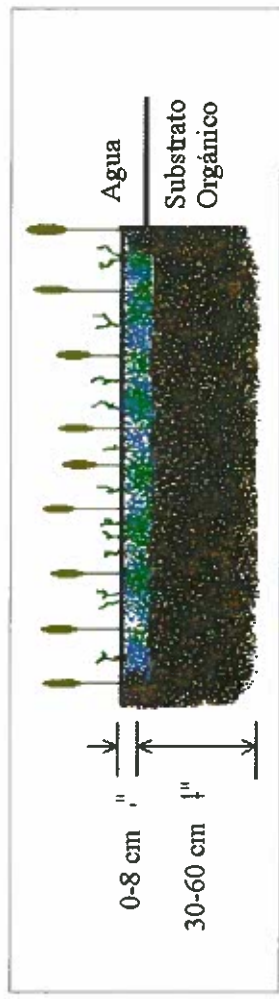


Figura 18.- Sección característica de un pantano anaeróbico

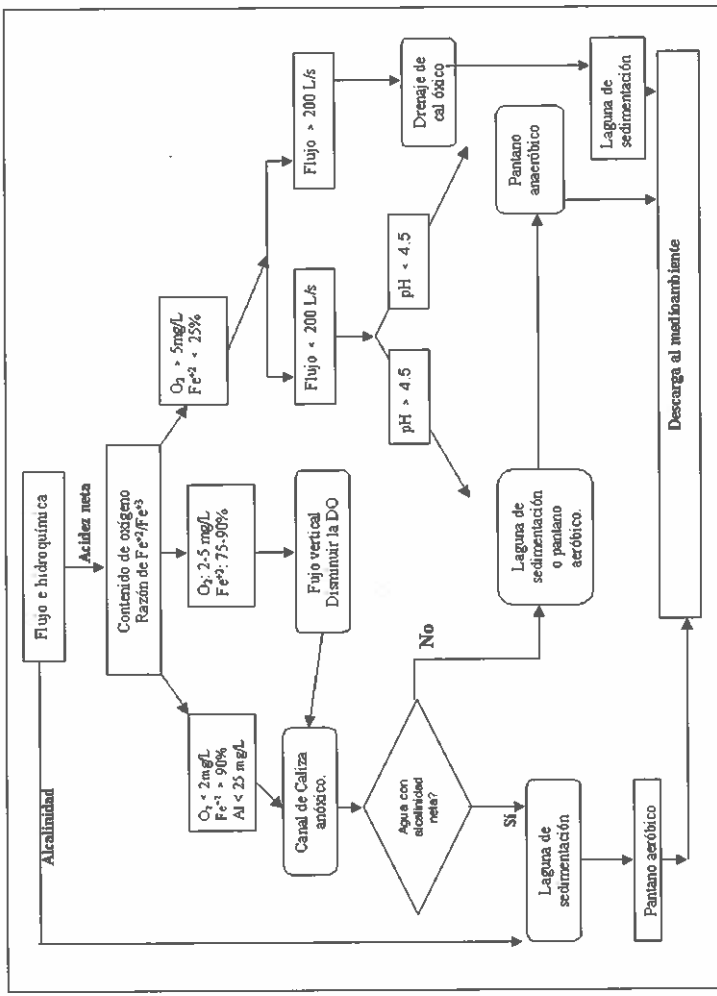


Figura 19.- Proceso de decisión para seleccionar métodos de tratamiento pasivos.

5.1.3.4 Monitoreo

El monitoreo es un componente esencial en la gestión de residuos sulfurados. La temprana detección de la oxidación significativa de sulfuro es crítica para la implementación exitosa de las estrategias de control y es parte de una mejor práctica de gestión de riesgo para abordar el problema. El programa de monitoreo debiera incluir los siguientes componentes esenciales:

- Detectar el inicio de la oxidación en la fuente, que pueda conducir al desarrollo del drenaje ácido y que lleva a decidir las opciones de control.
- Evaluar la efectividad de las medidas de control primarias, secundarias y terciarias aplicadas.
- Realizar estudios ambientales para identificar las variables ambientales que necesitan protección, incluyendo las características del ecosistema y calidad de las aguas.

- Clasificar todos los materiales durante las fases operacionales y de desarrollo de la mina para proveer información en la toma de decisiones de la gestión de residuos.

- Monitoreo de aguas estancadas y sistemas de aguas subterráneas aguas arriba y aguas abajo de las operaciones mineras, que permitan determinar la naturaleza y la escala de cualquiera de los impactos fuera del sitio y permitir el reconocimiento de tendencias a corto plazo y largo plazo.

- El desarrollo de un programa de monitoreo está basado en los resultados de los programas de caracterización y de evaluación de los impactos. Usualmente, el monitoreo es utilizado para evaluar el rendimiento de los métodos de control, y es desarrollado para detectar los problemas y las respuestas a las opciones de gestión. La frecuencia y los parámetros están basados en los resultados de la evaluación de riesgos, y en todos los casos es específico del sitio.

Algunas de las características que podrían ser incluidas en el monitoreo del DAR son:

- Los cambios químicos y físicos a lo largo del flujo que puedan alterar significativamente la química del agua de drenaje. El flujo del drenaje ácido a través de los minerales carbonatados puede aparecer en pH alcalino. Sin embargo, todavía existe oxidación y la generación de ácido se presenta en pH alcalino. En el futuro, la alcalinidad a lo largo del flujo puede ser consumida o no estar disponible por la precipitación de metales, y el agua de drenaje permanecerá ácida.

- Tanto los datos de flujo de volumen y concentración de la carga son necesarios para caracterizar el drenaje ácido y evaluar los impactos potenciales fuera del sitio. El indicador más común de oxidación de sulfuro es el sulfato (SO<sub>4</sub>). Otros posibles indicadores son el hierro, cobre, zinc, manganeso, plomo y cadmio, y iones principales tales como calcio, magnesio, aluminio, sodio y potasio. Concentraciones altas de sulfato en el drenaje y una reducción en la alcalinidad, incluso cuando el pH es aún neutro, permite determinar la oxidación de sulfuro. La disminución en el pH y el aumento en las concentraciones de metal puede retrasar el incremento en la concentración de sulfato debido a los procesos de tampón y neutralización. El monitoreo de los parámetros no susceptibles al control del pH, tales como los sulfatos y el zinc, o de los parámetros asociados con la disolución de los minerales alcalinos, tales como el calcio y el magnesio, puede proporcionar una indicación de la magnitud de la generación y neutralización del ácido.
- Variables específicas tales como el carbón total disuelto y la alcalinidad deberían ser determinadas en aguas receptoras para proveer información sobre su capacidad de tampón. Esta información es útil en la predicción del impacto real y potencial sobre aguas receptoras. Se debe tener en cuenta que los cambios estacionales en los flujos afectan la sensibilidad del ambiente receptor a la contaminación del DAR.

- El muestreo de frecuencia fija resulta inadecuado para definir la carga total de contaminante proveniente del DAR, y para la interpretación de datos. Esto se debe a que el desarrollo del DAR es un proceso dependiente del tiempo, por lo que la química del agua de drenaje puede cambiar cada año. Las variaciones más significativas (indicada por el coeficiente de variabilidad en una colección de datos) se observan en el cobre, hierro, aluminio, arsénico y sulfato. Las mayores concentraciones y cargas contaminantes generalmente se observan en los períodos de flujo alto, a los que les siguen inmediatamente períodos más secos de flujo bajo. Por lo tanto, el programa de monitoreo debe ser adaptado a los modelos de flujos con muestreo de mayor intensidad durante las condiciones variables.

El monitoreo de operaciones debería incluir un inventario detallado de todos los tipos de residuos, clasificación de materiales y niveles de producción, tales como:

- Datos de ensayos estáticos y cinéticos para clasificar residuos e identificar requerimientos de manejo selectivo.
- Volúmenes de producción de tipos de residuos de roca.
- Localización del almacenamiento y fecha de emplazamiento de residuos mineros identificados.

Los tipos de roca no productoras de ácido, y la presencia de carbonatos, deberían también ser registrados y evaluados para su utilización como materiales de cubierta, ya que ellos pueden ser útiles en estrategias de remediación.

El monitoreo de oxígeno y condiciones del flujo de agua puede ser requerido para evaluar el rendimiento de la estrategia de gestión. Donde las estrategias de rehabilitación incluyen el uso de cubiertas, el monitoreo del rendimiento de la cubierta puede incluir:





## 6.- Consideraciones para el Cierre de Faenas Mineras

El tema de los impactos que produce en el entorno una faena minera abandonada ha ido cobrando relevancia en Chile en los últimos años, tanto en las personas vinculadas a la minería y el gobierno, como también en las comunidades que habitan lugares cercanos o aguas abajo de faenas mineras y en la ciudadanía en general.

En el contexto nacional, Chile no cuenta aún con la legislación e institucionalidad adecuada, para abordar el cierre correcto de las faenas mineras, una vez que éstas han dejado de operar. Actualmente, una revisión de los aspectos técnicos del cierre de faenas mineras se encuentra en elaboración por el grupo Servicios Públicos-Consejo Minero "Cierre de Minas" dentro el contexto del AMPL. Una consideración fundamental en esta iniciativa, y que es apoyada por todos los sectores, se refiere a la obligación de cada operador minero de preparar un "Plan de Cierre" para asegurar el cierre seguro y estable en el largo plazo de la faena minera. El plan debería incluir una evaluación de los riesgos, medidas de mitigación si son necesarias, y un plan de monitoreo.

Los Planes de Cierre abordan una diversidad de aspectos, como remoción de instalaciones, rehabilitación de terrenos y otros, pero probablemente uno de los aspectos más críticos está relacionado con el potencial de generación de drenaje ácido. El cierre adecuado de minas que ya están generando drenaje ácido, o que pudieran generar en el futuro, puede constituir una tarea costosa y en cierto grado incierta. Sin embargo, también se reconoce que con una planificación "proactiva", anticipada, del cierre, y la oportuna identificación de todos los potenciales "problemas" asociados al drenaje ácido, se pueden diseñar e incorporar al diseño y operación de la mina los procedimientos de control y salvaguardas que faciliten el cierre y rehabilitación del área cuando llegue el momento.

El monitoreo a largo plazo, es una consideración importante ya que muchas formas terrestres mineras tales como, acumulaciones de residuos de roca, tranques de relaves o lagunas de decantación, pueden llegar a ser en forma permanente accidentes geográficos del paisaje, con potencial de impacto ambiental a largo plazo.

- Tasas de difusión de entrada de oxígeno determinada por el análisis de las presiones parciales de oxígeno dentro de la acumulación.
- Perfiles de temperatura a través de la acumulación que indica si están ocurriendo reacciones de oxidación exotérmicas.
- Flujo de agua a través de la acumulación, que puede ser determinado por lisímetros y/o piezómetros.
- Estabilidad física (rompimiento, erosión, etc.) de cualquier material de cubierta.

### 6.1 EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN EL CIERRE DE UNA FAENA

Los aspectos relacionados con la generación de drenaje ácido más relevantes a considerar en la evaluación del riesgo ambiental a largo plazo, en la planificación del cese de las operaciones y cierre de las instalaciones de una faena son:

- Las características geoquímicas de los minerales expuestos, tales como mineral, relaves, estériles y rípios de lixiviación según el caso.
- El balance hidrológico para las condiciones futuras; posterior al cierre las condiciones tales como el balance hidrológico son distintas y hay que considerar plazos más largos, (por ejemplo, períodos de retorno de 20-30 años).<sup>24</sup>
- La ubicación de las instalaciones en relación a cuerpos de agua. Las instalaciones principales con riesgo de generar DAR son los rajos, las labores subterráneas, botaderos de estériles y tranques de relaves o rípios de lixiviación según el caso. Su ubicación con respecto a cuerpos de agua receptores o con capacidad para transportar contaminantes es importante.

#### 6.2 PLAN DE CIERRE

El Plan de Cierre de la mina debería incorporar estrategias para minimizar el riesgo de los impactos a largo plazo del drenaje ácido sobre el medio ambiente. A través del Plan de Cierre, elaborado como parte integral del diseño y de la operación de la mina, se puede lograr que los problemas del DAR durante la operación y a largo plazo se reduzcan o eliminen. El cierre de una faena minera, no sólo se refiere al momento en el que termina toda actividad minera, sino también al cierre de todos los componentes que se encuentran en ella, y en particular, con relación al potencial de generación de drenaje ácido, los

más relevantes son las labores subterráneas y en superficie, las acumulaciones de Residuos Mineros Masivos que provienen de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales, tales como estériles, los minerales de baja ley, rípios de lixiviación, relaves y escorias. (Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos). Aunque de menores dimensiones, también deben considerarse otras instalaciones como pozas o piscinas de soluciones, plantas de procesamiento de minerales, instalaciones de almacenamiento y manejo de concentrados, y otros.

Para cada uno de estos componentes, se deben considerar los siguientes criterios:

- Estabilidad física: Las acumulaciones de materiales sólidos no deben deformarse o desplazarse de manera que pudieran poner en riesgo su integridad.
- Estabilidad química: Los contaminantes no deben lixiviarse ni migrar descontroladamente al medio ambiente.

También, aunque no existe uniformidad de criterios al respecto, pueden evaluarse consideraciones acerca del Uso Futuro del suelo y factores estéticos del terreno.

Los planes de cierre deben incorporar la tecnología que satisfaga los requerimientos de un adecuado control de los impactos ambientales posteriores al cese de operaciones y cierre y desmantelamiento de las instalaciones. En general, se evalúa utilizar la "mejor tecnología disponible económicamente factible". Ello implica seleccionar la metodología de control comprobada cuyo costo incremental con respecto a otra se justifique por el beneficio adicional en protección ambiental resultante, pero no signifique la limitación de la capacidad económica del titular.

24. Eventos extremos pueden ser consultados en la Dirección General de Aguas (DGA).

En un análisis de viabilidad de técnicas de prevención y control de drenaje ácido<sup>25</sup>, la única opción que sobrevivió fue el tratamiento de efluentes ácidos por neutralización, por su bajo costo en comparación con las otras técnicas. El drenaje ácido se produce durante muchos años, por lo que el costo de la medida de control es muy importante.

En base a las actividades a desarrollar posterior al cese de las operaciones, los Planes de Cierre pueden agruparse en tres tipos principales:

- Retirada: En este plan no se requiere de actividades adicionales de tratamiento o mantenimiento de largo plazo, después de que se ha llevado a cabo el trabajo de rehabilitación del terreno. Por ejemplo, al recubrir el tranque de relaves con una capa de tierra y plantar pastos, arbustos, etc.; de manera que el agua no penetre el relave. En este tipo de método es muy importante mantener resistencia del muro.
- Cuidado pasivo: Se logra cuando se establecen las condiciones para actividades que requieren un mínimo de intervención, incluyendo tratamiento, y existe una necesidad mínima de monitoreo ocasional y mantenimiento menor con poca frecuencia.

Ante la técnica de colocar un tapón de concreto en las galerías, se está evaluando soluciones alternativas que consideran agregar lechada de concreto para tapar las fisuras y recientemente se está estudiando la posibilidad de rellenar estas galerías con relaves o rípios para obstruir las fisuras.<sup>26</sup>

La inundación de la mina, luego del cierre, controlará finalmente toda generación adicional de ácido, a pesar de que pueda haber oxidación y drenaje durante el llenado de la cantera y,

nuevamente, pueda ocurrir un acarreamiento de productos solubles.

- Cuidado activo: Requiere una operación continua, mantenimiento y monitoreo periódico por largo tiempo en el futuro. Esta situación se aplicaría, usualmente, a la recolección y al tratamiento químico continuos del drenaje ácido o lixiviado proveniente de botaderos de desmonte, a los que no se ha aplicado alguna tecnología para evitar la generación de drenaje ácido. Este tipo de plan requiere el desarrollo de un plan de operación, una estructura, dotación y financiamiento permanente. El método de tratamiento activo más frecuente, es la neutralización de efluentes ácido con adición de álcali y generación de hidróxidos insolubles, por ser de operación simple, continua y de bajo costo. Este tipo de tratamiento ha sido utilizado en Japón en la Mina de Ashio y en la Mina Matsuo; sin embargo en Chile este tipo de tratamiento en una mina cerrada no es factible económicamente, ya que no hay nadie que financie este tratamiento.

### 6.3 MONITOREO

El cierre de la faena y sus instalaciones comprende monitorear, a través del muestreo del agua antes y después del tratamiento para comprobar la eficacia de las medidas de cierre implementadas de acuerdo al Plan, respecto de cada instalación sujeta al plan de cierre. El monitoreo, en cuanto a los parámetros a monitorear y su plazo, debiera ser específico de acuerdo a las características de cada instalación, de manera que toda medida de monitoreo debiera tener una duración específica ó establecer una condición específica para dar por terminado el monitoreo. Se deben establecer los puntos de medición de los lugares de aprovechamiento de la cuenca para el uso público

25. Curso Interno: Medio Ambiente y Minería. Tratamiento de Aguas Ácidas.

26. Información adicional en: Curso Interno: Medio Ambiente y Minería. Tratamiento de Aguas Ácidas.

y se deben realizar la toma de muestra y los análisis de calidad del agua.

El monitoreo debe estar contemplado en el Plan de Cierre, como parte integrante de las medidas o acciones de cierre, y una vez cumplido el plan de monitoreo de una instalación, debería terminar también la obligación de monitorear. Se asume

que los resultados de tales monitoreos muestran que no se producirá contaminación con posterioridad al término convenido. Si por cualquier motivo la comunidad está interesada en continuar el monitoreo con posterioridad a su término de acuerdo al Plan de Cierre, no debería imputarse su costo al operador.



## 7. Consideraciones Generales en la Evaluación de las Opciones de Control

El éxito de una medida de control radica en su capacidad para controlar el drenaje ácido y para limitar el impacto ambiental. La selección de las opciones de control más factibles técnica y económicamente implica una evaluación de diversos factores que inciden en los beneficios y costos de implementarlas. Para la mayoría de las situaciones, una simple determinación cualitativa puede servir para evaluar las opciones de control. Sin embargo, un sistema simple de asignación de calificaciones a los diversos factores puede facilitar la comparación de metodologías de control alternativas. Los factores que intervienen en la comparación de alternativas son típicamente los siguientes:

- Factibilidad técnica
- Efectividad
- Durabilidad o longevidad
- Seguridad o riesgo de fracaso
- Impactos ambientales como consecuencia tanto de la construcción como de la operación
- Requerimientos de operación, inspección y mantenimiento
- Costos

Cada factor puede ser calificado en un sistema simple de cinco puntos (bajo = 1, medio, alto = 5), de manera que pueda evaluarse la importancia relativa de los factores. Por ejemplo, en ciertas ubicaciones de acceso remoto, la longevidad y los requerimientos de mantenimiento constituirán factores significativos en la selección de una opción de control, en comparación a una instalación de fácil acceso. Estos factores pueden compararse con los costos de cada alternativa para seleccionar la opción que proporcione el mayor beneficio por el costo más razonable.

Generalmente los costos dependen de una diversidad de factores, y se han desarrollado modelos que pueden ayudar a estimar el costo de implementación, operación y mantenimiento de metodologías de control. El estudio: "ANÁLISIS DE PLANES DE CIERRE DE FAENAS MINERAS", encargado por el

Ministerio de Minería a la Universidad de Chile (Informe final: Enero de 2001), presenta un modelo para evaluar los costos de las medidas de control en el cierre de faenas y puede ser adaptado a la evaluación de costos para faenas en operación.<sup>27</sup>

Es importante destacar, que es mucho más económico y más eficiente prevenir la generación de drenaje ácido a través de metodologías de prevención o control primario, que tratarlo a través de metodologías de control terciario. Sin embargo, los costos de las medidas de control de generación y migración de drenaje ácido deben justificarse

por producir un ahorro equivalente o más en el costo de tratamiento del drenaje ácido y monitoreo en el corto y el largo plazo.

Además, es mucho más económico iniciar las medidas de control durante la explotación que más tarde (cierre de faena).

Se debe tener en cuenta la posibilidad de drenaje ácido desde las primeras etapas de planificación de la mina e incorporar los costos del control del drenaje ácido cuando se considere la viabilidad de una mina.

## 8. Glosario<sup>28</sup>

**Absorción:** Captación de un gas por un sólido o un líquido o de un líquido por un sólido. La absorción difiere de la adsorción en que las sustancias absorbidas impregna la mayor parte de la sustancia absorbente. También es utilizado para describir captación por plantas y animales.

**Acidez:** Una medida de la capacidad de una solución para neutralizar una base fuerte. Se determina analíticamente por titulación. La acidez de una solución generalmente aumenta a medida que su pH disminuye. Sin embargo, soluciones con valores de pH similares pueden tener acidez diferente.

**Adsorción:** Proceso por el cual átomos, moléculas o iones son retenidos sobre las superficies de sólidos por uniones físicas o químicas.

**Aeróbico:** En presencia de oxígeno.

**Alcalinidad:** Una medida de la capacidad de una solución para neutralizar un ácido fuerte. Es determinada analíticamente por titulación. La alcalinidad de una solución generalmente disminuye a medida que su pH disminuye. Sin embargo sustancias con valores de pH similares pueden tener muy diferentes alcalinidades.

**Alteración:** Cambios en la composición mineralógica o química de una roca, generalmente producido por erosión o soluciones hidrotermales.

**Anaeróbico o anóxico:** Medio ambiente sin oxígeno libre.

**Anisótropo:** Dícese de los cuerpos y objetos en los que las propiedades difieren según la dirección considerada.

**Antropogénico:** Formado o influenciado por el hombre.

27. Para mayor información sobre este estudio, consultar en la Unidad Ambiental del Ministerio de Minería.

28. Fuente: The International Network on Acid Prevention (INAP).

**Área de estancamiento:** Un área de recarga o cuenca del drenaje y todas las aguas que aportan agua a éste. El agua que aporta agua a un curso de agua particular; una cuenca.

**Azufre total:** Todo el azufre contenido en una muestra, en sus diferentes formas.

**Atenuar:** Reducir en magnitud. Reducciones en la carga resultante de procesos como precipitación, adsorción y absorción. Las reducciones en concentración, también resultan de la dilución.

**Balance de agua:** Un término utilizado en el contexto de la minería para describir un inventario de entradas y salidas de drenaje, volúmenes de agua y las tasas de flujo. El balance de agua debería ser proveído por cada componente de mina y para el sitio como un todo, en períodos seleccionados a través de la historia de la mina.

**Básico:** Un término utilizado para describir una solución de agua con un exceso de iones hidróxido y un valor de pH mucho mayor que 7.

**Beneficio:** Tratar un mineral para concentrar su metal valioso o contenido de mineral o de otra manera mejorar sus propiedades. El tratamiento puede utilizar una variedad de procesos tales como clasificación, concentración magnética, lavado y flotación.

**Bioacumulación:** Un proceso de concentración o acumulación dentro de la cadena alimenticia de los organismos. Usualmente utilizada con referencia a metales contaminantes, incluyendo Hg, Cd y Pb.

**Biolixiviación:** Un proceso en el que los metales son disueltos con la ayuda de las bacterias. Utilizado para recuperar metales desde materiales refractarios o minerales de baja ley.

**Biorremediación:** Un proceso para reducir los niveles de contaminantes en suelos o aguas utilizando microorganismos o vegetación.

**Botadero:** Una pila artificial, montón o acumulación de mineral fracturado, roca. Término comúnmente utilizado para acumulaciones de residuos de roca.

**Calidad del agua:** Las propiedades físicas y químicas definidas por atributos medidos del agua, sedimentos y vida acuática.

**Canal de Caliza:** Caliza localizada en un canal de drenaje o canal construido para recolectar y neutralizar drenaje ácido.

**Capacidad de Neutralización de Acidez:** Ver Potencial de Neutralización de Acidez.

**Capacidad Tampón:** Capacidad de una sustancia para resistir un aumento o disminución en el pH.

**Carga:** Es la concentración multiplicada por el flujo siempre que la masa por unidad de tiempo fluya a través o desde un componente minero.

**Columna de agua o nivel freático:** La elevación a la cual la presión del fluido es igual a la presión atmosférica. La superficie separa la zona donde el agua es sostenida bajo tensión de la zona saturada (donde las presiones de los fluidos son mucho mayores que cero).

**Drenaje:** Las formas en que las aguas de un área existen y se mueven incluyendo corrientes superficiales y caminos de agua subterránea. Un término colectivo para todos los flujos de agua difusos y concentrados.

**Ecosistema:** Una comunidad de organismos y su medio ambiente biológico, físico y químico directo.

**Efluente:** Agua descargada en el medio ambiente desde una estructura artificial. Por ejemplo, el drenaje producto de una planta de tratamiento.

**Eh:** Un potencial electroquímico que es una medida del redox o potencial de óxido/reducción. Informado en unidades de milivolts (mV) relativo al electrodo de hidrógeno estándar u otro electrodo de referencia.

**Embalse:** Una estructura o localización utilizada para almacenamiento controlado. Los embalses son utilizados para retener drenaje, residuos de roca potencialmente generadores de DAR que deben ser almacenados en un estado inundado, materiales de textura fina como relaves y tratamiento de lodos. Lagos u otras depresiones naturales pueden servir como embalses naturales. Presas o diques son utilizados para construir embalses artificiales.

**Erosión:** La separación y posterior remoción de cualquier roca o material superficial por vientos, lluvias, acción de las olas, congelación, derretimiento y otros procesos.

**Escurrimiento:** La parte de la precipitación y nieve derretida que no se infiltra, pero se mueve como flujo sobre la tierra.

**Hidrología:** Estudio de todas las aguas en y sobre la tierra, incluyendo agua subterránea, agua superficial y precipitación.

**Hidrogeología:** El estudio del agua subterránea. Una rama de la hidrología.

**Hidrología:** El estudio de todas las aguas en y sobre la tierra, incluyendo el agua subterránea, agua superficial y precipitación. Cuando es utilizado en conjunto con el término hidrogeología es definido más restrictivamente como el estudio de la precipitación y aguas superficiales.

**Infiltración:** La entrada de agua en una sustancia porosa.

**Intrusión:** Un cuerpo de roca ígnea que invade uno más viejo.

**Límites de descarga:** Las concentraciones máximas permitidas de contaminantes y/o volúmenes de descarga.

**Lisímetro:** Un dispositivo para recolectar drenaje pasando a través del material que yace. El término

lisímetro es utilizado principalmente para aparatos de prueba de campo. Los lisímetros son instalados en los componentes de una mina o bajo plataformas de pruebas de campo para medir la calidad y/o cantidad de drenaje.

**Litología:** Un tipo de roca definida por un set de características físicas y mineralógicas.

**Lixiviación de metal:** La extracción de metales solubles por percolación de solventes. La lixiviación puede ser natural o inducida. La erosión de mineral primaria generalmente acelera la disolución del metal y la remoción en el drenaje del sitio minero.

**Lodo de Tratamiento:** Material sólido precipitado producido por un proceso de tratamiento.

**Manejo de material:** Un término utilizado para describir los procesos combinados de residuos de roca y excavación de mineral, transporte y deposición, incluyendo cualquier acumulación temporal, y tratamiento secundario.

**Medio ambiente:** Los componentes físicos, químicos, biológicos, sociales, espirituales y culturales interrelacionados que afectan el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos.

**Metales Base:** Un término general aplicado a los metales relativamente menos caros, tales como cobre, zinc, níquel, plomo, estaño, hierro y aluminio, que basado en el costo pueden ser distinguidos de los metales preciosos (oro, plata, platino y paladio). Los metales base son la fuente de la mayoría de los problemas de contaminación por metal.

**Metal Pesado:** Un término general aplicado para metales base tales como cobre, plomo y zinc que generalmente existen en contaminación industrial y urbana.

**Meteorización (Weathering):** Los procesos por el cual las partículas, rocas y minerales, son alteradas

por exposición a temperatura y presión superficial y a los agentes atmosféricos tales como aire, agua y actividad biológica.

**Mineral de Baja Ley:** Mineral de contenido en metales/minerales relativamente bajo y que no puede ser explotado económicamente. Un término generalmente utilizado para materiales que podrían ser minerales explotables bajo condiciones económicas favorables.

**Neutralización:** Alcanzar el pH de materiales ácidos o bajar el pH de materiales alcalinos para llegar a valores cercanos al pH neutro a través de una reacción en que el ión hidrógeno de un ácido y el ión hidroxilo de una base se combina para formar agua, siendo el otro producto una sal.

**Oxidación de sulfuro:** Oxidación exotérmica de sulfuro reducido químicamente (S<sub>2</sub>-2) a una forma parcialmente o completamente oxidada tal como sulfato (SO<sub>4</sub>-2). Un indicio de oxidación de sulfuro, es las concentraciones de sulfato elevadas en el drenaje del sitio minero.

**Pantano (Wetlands):** Terreno donde las tierras están saturadas con agua por un período de tiempo suficientemente prolongado tal que el exceso de agua y los niveles bajos de oxígeno del suelo resultantes son los determinantes principales de la vegetación y desarrollo del suelo.

**Percolación:** Flujo descendente de agua dentro de un medio poroso no saturado.

**Períodos de retorno:** El promedio de extensión de tiempo de separación de eventos de similar magnitud. Generalmente es determinado estadísticamente.

**Permeabilidad:** La capacidad de una roca o material no consolidado para transmitir un fluido.

**pH ácido:** En la definición química exacta, cualquier pH( 7 es considerado ácido. Pero, se puede decir que los valores de pH ácido

generalmente están determinados por el valor del pH en que existe un aumento importante en la solubilidad de los metales específicos del sitio (pH<4.5).

**pH alcalino:** En la definición química exacta, cualquier pH(7 es considerada básica (pH>8.5).

**Porcentaje de azufre (%S):** El azufre total menos todas las otras especies de azufre medidas tales como azufre sulfuro, azufre sulfato total y azufre orgánico. La porción de azufre total no es identificada por la mayoría de los análisis de azufre específicos llevados a cabo en el ensayo de Balance ácido/base.

**Pórfido:** Una roca ígnea de cualquier composición que contiene fenocristales sobresalientes en una matriz más finamente granulada.

**Potencial de Acidez (PA):** El máximo potencial de generación de acidez de una muestra. El cálculo del PA (o MPA) es una parte integral del Cuento Ácido /Base.

**Potencial de neutralización (PN):** Medida de laboratorio estática de la capacidad de una muestra para neutralizar ácido. Determinado por medio de pruebas químicas relativamente simples.

**Prueba Balance Ácido /Base (BAB):** Es el método estático más común utilizado en la predicción del drenaje ácido de roca. Consiste en una serie de análisis químicos y valores calculados que proveen una evaluación preliminar de las cantidades y balance relativo del potencial de generación de ácido y el potencial de neutralización de ácido de una muestra.

**Química del drenaje:** La concentración de componentes disueltos en el drenaje, incluyendo concentraciones de elementos, especies químicas y otros parámetros químicos acuosos.

**Rajo abierto:** Una depresión superficial creada por la excavación de minerales metálicos cercanos a la superficie, minerales industriales.

**Subacuoso:** Ocurriendo bajo el agua.

**Tampón:** Amortiguador, estabilizador, neutralizador del pH.

**Trabajos subterráneos:** Cualquier excavación subterránea antropogénica, incluyendo entradas inclinadas a una mina, cruces en una mina, pendientes, túneles horizontales, declives, cuevas y pozos de chimenea. También referidos como galerías en algunos países.

**Tratamiento Químico Activo:** Proceso en el cual compuestos químicos o naturales son añadidos al drenaje contaminado para mejorar la calidad del agua. El control puede variar desde una serie de tratamiento relativamente simple a una planta de tratamiento computarizada sofisticadamente con múltiples aditivos y procesos de control y monitoreo detallados.

**Volumen de muestra:** Una muestra grande de roca mineralizada, frecuentemente cientos o miles de toneladas, seleccionada de manera que sea representativa de las propiedades críticas del potencial cuerpo mineral.

**Yacimiento Pórfido:** Un yacimiento de mineral de uniforme y baja ley, de gran tonelaje.

**Relaves:** Desechos sólidos de tamaño entre arena y limo provenientes de los procesos de flotación, concentración gravitacional o cianuración y que son producidos, transportados y depositados en forma de lodo o pulpa.

**Relleno:** Material usado para llenar vacíos creados por extraer un cuerpo mineral o un depósito de carbón. Debido al volumen expandido sólo una porción del material excavado originalmente puede ser utilizado como relleno.

**Residuo de roca:** Rocas con cantidades insuficientes de elementos valiosos económicamente para justificar su extracción, pero que tienen que ser removidas para permitir el acceso físico al mineral. Son usualmente destruidos en partículas más pequeñas para permitir su eliminación con camiones y palas. La disposición ocurre en botaderos de superficie subaérea o subacuosa o relleno para rajas abiertos o trabajos subterráneos.

**Revegetación:** Una parte de la restauración, una actividad apuntada a reestablecer la vegetación sobre superficies despejadas.

**Subaéreo:** Ocurriendo sobre la superficie de la tierra.

