

UCH-FC
Q. Ambiental
D 852
C. 1

DRENAJE ÁCIDO DE ROCAS EN LA MINERÍA CHILENA



SEMINARIO DE TÍTULO
ENTREGADO A LA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE
EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUISITOS
PARA OPTAR AL TÍTULO DE

QUÍMICO AMBIENTAL

CARMEN GLORIA DUEÑAS CASTRO

DIRECTOR DEL SEMINARIO DE TÍTULO: Sr. Fernando Valenzuela Dávila

PROFESOR PATROCINANTE: Dr. Jacques Wiertz



AÑO 2002

**FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE**

**INFORME DE APROBACIÓN
SEMINARIO DE TÍTULO**

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias de la
Universidad de Chile que el Seminario de Título presentado por la
Alumna

Carmen Gloria Dueñas Castro

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación del Seminario de
Título como requisito para optar al Título de Químico Ambiental

Comisión:	Blanca Escobar
	Davor Cotoras.
Prof. Patrocinante:	Dr. Jacques Wiertz

“A mis padres Antonio y Carmen Gloria, a los que les debo todo lo que soy.

A Andrés, el amor de mi vida y mi mayor inspiración.

A mis amigas Paulina, Silvia y Stefie, por esa gran amistad que cultivamos y que estoy segura durará para siempre.

Por último, y no por eso menos importante a la Virgencita y a Dios, que me guían y acompañan todos los días de mi vida”.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jacques Wiertz, por su gran apoyo a lo largo de todo el trabajo, a través de material, consejos, observaciones. En especial, por compartir conmigo sus conocimientos, experiencia y especialmente por todo el tiempo dedicado.

Al Sr. Fernando Valenzuela, Disputada de Las Condes, por su tiempo, sus sugerencias oportunas y constructivas y por entregarme material de apoyo en todo el trabajo.

A Armando Valenzuela, COCHILCO, por su disposición de tiempo, consejos, observaciones, seminarios y gran cantidad de material de apoyo, a lo largo de todo el trabajo.

Al Consejo Minero y al Grupo de Trabajo de Potencial de Generación de Aguas Ácidas del Acuerdo Marco de Producción Limpia por su apoyo, confianza y la posibilidad dada de asistir a cursos y seminarios de capacitación.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Conceptos generales	3
1.1.1 Definición del drenaje ácido	3
1.1.2 Fuentes, mecanismos y etapas de generación de drenaje ácido.	4
1.1.3 Posibles impactos y efectos del drenaje ácido en el medio ambiente	8
1.1.4 Drenaje Ácido en Chile.	12
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Generales	16
1.2.2 Específicos	16
1.3 Metodología de Trabajo	16
II. FACTORES RELACIONADOS CON LA GENERACIÓN, TRANSPORTE Y EFECTOS DEL DRENAJE ÁCIDO	18
➤ Factores hidrológicos	21
➤ Factores geológicos	29
➤ Factores mineros	37
III. EVALUACIÓN DE RIESGOS	42
3.1 Predicción del drenaje ácido	43
3.1.1 Métodos de laboratorio	45
3.1.1.1 Métodos de muestreo	47
3.1.1.2 Ensayos estáticos	49
<i>Aplicabilidad en Chile de ensayos estáticos</i>	51
3.1.1.3 Ensayos cinéticos	52
3.1.1.4 Ensayos de extracción	55
3.1.2 Métodos de campo	56
3.1.3 Modelación Matemática	57
3.1.3.1 Modelos empíricos	58

3.1.3.2	Modelos determinísticos	60
	<i>Aplicabilidad de Evaluación de Riesgos en Chile</i>	63
IV.	GESTIÓN DE RIESGOS	65
4.1	Manejo y control del drenaje ácido	66
4.1.1	Control primario: Reacciones de oxidación	67
4.1.1.1	Cubiertas y Sellos	67
4.1.1.2	Desulfuración, Manejo y Aislamiento selectivo de residuos sulfurosos	68
4.1.1.3	Micro-encapsulación o envoltura de la pirita	69
4.1.1.4	Mezcla o aditivos básicos	70
4.1.1.5	Inhibición de las bacterias	72
4.1.1.6	Cubiertas de agua y descarga subacuática	73
4.1.1.7	Saturación	75
4.1.2	Control secundario: Migración de contaminantes	76
4.1.2.1	Reducción de infiltración	77
a)	Cubiertas simples de suelo	78
b)	Cubiertas sintéticas	79
c)	Cubiertas complejas	80
4.1.2.2	Co - disposición de residuos de roca y relaves	82
4.1.2.3	Desviación del agua superficial	83
4.1.2.4	Interceptación de agua subterránea	84
4.1.3	Control terciario: Recolección y Tratamiento del DAR	84
4.1.3.1	Recolección	85
4.1.3.2	Tratamiento Activo	85
a)	Neutralización Química	86
b)	Disposición y Tratamiento de Lodos	88
c)	Recuperación de Metales	88
	<i>Aplicabilidad de Recuperación de Metales en Chile</i>	89
4.1.3.3	Tratamiento Pasivo	93

a) Canal de caliza anóxico	93
b) Canal de caliza óxico	95
c) Sistemas de flujo vertical	96
d) Pantanos-Inundaciones	97
4.1.3.4 Monitoreo	103
V. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL CIERRE DE FAENA	106
5.1 Evaluación y gestión de Riesgos de generación de drenaje ácido en el cierre de una faena minera	107
5.2 Planes de Cierre	109
5.3 Monitoreo	111
VI. CONSIDERACIONES GENERALES EN LA EVALUACIÓN DE LAS OPCIONES DE CONTROL	113
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
VIII. GLOSARIO	i
IX. BIBLIOGRAFÍA	viii

ANEXOS

Anexo 1. Ensayos de Laboratorio

Anexo 1A. Ensayos Estáticos

Anexo 1B. Ensayos Cinéticos

Anexo 2. Métodos de campo

Anexo 3. Resumen de algunos modelos matemáticos de predicción de DAR

Anexo 4. Lista de ventajas y desventajas de los materiales de cubierta.

Anexo 5. Cuadro comparativo de neutralizantes para efluentes ácidos

INDICE DE CUADROS

	Páginas
Cuadro 1. Etapas y mecanismos de desarrollo del drenaje ácido.	6
Cuadro 2. Efectos tóxicos de algunos metales pesados sobre la flora y la fauna y la salud.	11
Cuadro 3. Factores primarios, secundarios y terciarios que influyen en el drenaje ácido.	20
Cuadro 4. Principales bacterias que participan en acelerar la oxidación de compuestos de azufre y de hierro reducidos Fe (II)..	23
Cuadro 5. Resistencia de sulfuros a la meteorización.	31
Cuadro 6. Resistencia de neutralizantes.	33
Cuadro 7. Interpretación de cubiertas de oxidación.	57
Cuadro 8. Consideraciones generales en la evaluación de riesgos de generación de ácido en instalaciones mineras.	108

ÍNDICE DE FIGURAS

		Páginas
Figura 1.	Diagrama simplificado de las alternativas del tratamiento de Cobre. Principales efluentes contaminantes.	2
Figura 2.	Drenaje ácido en Mina Abandonada, Bureau.	4
Figura 3.	Etapas en la formación del drenaje ácido.	7
Figura 4.	Drenaje ácido de una bocamina de un siglo de edad. Dundas, Western Tasmania.	10
Figura 5.	Precipitación de $Fe(OH)_3$, sobre el lecho de un riachuelo cubriendo plantas y organismos acuáticos. Efecto devastador sobre la ecología de corrientes de agua dulce.	10
Figura 6.	Foto del Río Estrecho al unirse con Q. Barreales. Pascua- Lama.	14
Figura 7.	Foto del Río Malo al unirse con Río Laguna. El Indio.	14
Figura 8.	Fotos de Drenaje Ácido en una Mina Subterránea en El Teniente.	15
Figura 9.	Dinámica del drenaje ácido en el medioambiente.	19
Figura 10.	Micrografías que ilustran la forma y apariencia de <i>T. ferrooxidans</i> .	22
Figura 11.	Diagrama de un programa de predicción de DAR.	46
Figura 12.	Diagrama de etapas de un programa de muestreo.	48
Figura 13.	Esquema de objetivos principales de las opciones de control.	66
Figura 14.	Esquema de estrategia de aislamiento dentro de una acumulación de residuo.	72
Figura 15.	Cubierta simple de suelo.	79
Figura 16.	Componentes y materiales de una cubierta compleja.	81
Figura 17.	Mezcla de estériles y residuos ácidos, donde la permeabilidad será más baja si hubiera habido solo estériles.	83
Figura 18.	Diagrama del Proceso convencional de Tratamiento activo de drenaje ácido.	86
Figura 19.	Esquema de la Planta Cu Sx-Ew.	91
Figura 20.	Cuneta de captación.	92

Figura 21.	Cañería de conducción exterior.	92
Figura 22.	Estanque cabeza Planta Cu Sx-Ew.	92
Figura 23.	Planta Cu Sx-Ew.	92
Figura 24.	Nave de electro-obtención.	92
Figura 25.	Cosecha de cátodos.	92
Figura 26.	Sección transversal a través de un canal de caliza anóxico.	95
Figura 27.	Sistema de flujo vertical.	97
Figura 28.	Sección característica de un pantano aeróbico.	99
Figura 29.	Sección característica de un pantano anaeróbico.	101
Figura 30.	Árbol de decisiones para seleccionar métodos de tratamiento pasivos.	102
Figura 31.	Factores a considerar para estimar el costo de una medida de control.	115

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviaturas	Equivalencias	
BAB		Balance Ácido Base
CE		Conductividad eléctrica
CNA	PN	Capacidad de Neutralización de Acidez
DAM		Drenaje Ácido de Mina
DAR		Drenaje Ácido de Roca
GA		Generador de ácido/Generador de DAR
GNA		Generación Neta de Acidez
LM		Lixiviación de Metal
NFA-AS	PNGA	No formador de acidez-Alto Sulfuro
NFA-BS	PNGA	No formador de acidez-Bajo Sulfuro
PA (Sulfuro)	PMA	Potencial de Acidez (procedimiento analítico S-sulfuro)
PCA		Potencialmente consumidor de acidez
PGA		Potencialmente generador de acidez
PMA	PA	Potencial Máximo de Acidez
PN (Sobek)	CNA	Potencial de Neutralización (procedimiento analítico eg. Sobek)
PNE		Potencial de Neutralización efectivo
PNGA		Potencialmente no generador de acidez
PNN		Potencial Neto de Neutralización
PPNA		Potencial de Producción Neto de acidez
RPN		Razón del Potencial de Neutralización

RESUMEN

La generación de drenaje ácido a partir de la oxidación natural de minerales sulfurados encontrados en acumulaciones de estériles, matriz de formaciones de roca, minerales o relaves expuestos al aire y al agua, es potencialmente uno de los peores problemas que enfrenta la minería a nivel mundial en la actualidad. Esto se debe al gran impacto ambiental y económico causado por la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos, además de los altos costos derivados del tratamiento de efluentes de minas, que pueden llegar a amenazar la viabilidad de una operación minera.

Este fenómeno de generación de aguas ácidas, si bien se produce en forma natural, es acelerado por la actividad minera, ya que en los procesos de explotación se fractura el mineral inicialmente ubicado en el ambiente subterráneo no reactivo, haciéndolo pasar a la superficie del suelo.

Chile es un país minero, principalmente productor de cobre desde 1904. La gran parte de las reservas chilenas de cobre corresponden a minerales sulfurados de relativamente bajas leyes (<2%). Por esto, la explotación de yacimientos conlleva a la producción de un volumen importante de residuos sulfurados depositados en botaderos y tranques de relaves, pasando a ser un elemento crítico en la industria minera.

Países como Australia y Canadá se han preocupado de este fenómeno desde hace ya muchos años atrás, destinando recursos para la investigación y capacitación. En cambio en Chile, no existe todavía una mayor conciencia de la escala espacial y temporal de este fenómeno, el cual generalmente se produce con un desfase importante. De esta manera, actualmente no se aplica ninguna metodología sistemática de control de drenaje ácido en las faenas mineras en Chile.

Se debe tener en cuenta que las faenas mineras a lo largo de Chile están localizadas en distintas áreas geográficas, que presentan una gran variedad de climas y condiciones geológicas/mineralógicas, 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 su generación, transporte y posibles impactos en el medioambiente.

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 lixiviación; pero en un clima donde existen 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.

Chile desarrolló una primera iniciativa importante en relación al drenaje ácido, el 27 de noviembre del 2000, al firmar un Acuerdo Marco de Producción Limpia (AMPL), entre los organismos públicos con competencia ambiental, coordinados por la Subsecretaría de Minería, y el Consejo Minero A.G., que agrupa a las principales empresas del sector de la gran minería, con el compromiso de estudiar seis temas de interés común, entre ellos el "Potencial de Generación de Aguas Ácidas en Chile".

Debido a esto, surge la necesidad de realizar el presente estudio, el cual contempla como objetivos principales, el análisis del problema del drenaje ácido en la Minería Chilena y la formulación de recomendaciones de medidas de predicción, control y tratamiento que puedan ser aplicadas en Chile. Aunque existen soluciones que son aplicables conceptualmente a la generalidad de los casos, se reconoce que no hay una única solución óptima y la evaluación y gestión de riesgos deben ser específicas para cada yacimiento.

Como producto de este estudio, se propuso la meta de elaborar un Manual de Buenas Prácticas: "Manual de Consulta de Drenaje Ácido en la Industria Minera Chilena", con el fin de contar con una herramienta que contenga toda la información necesaria para entender, predecir y modelar la generación del drenaje ácido en el tiempo y para el manejo adecuado de los residuos sulfurados y que resuma el "Know-how" tecnológico respecto al control de la generación, del transporte y de los posibles efectos del drenaje ácido. Este manual será publicado en octubre del presente año.

Las técnicas de control primario o preventivas son las más apropiadas, específicamente en la etapa de planificación en minas nuevas. En los casos en que el drenaje ácido está tomando lugar activamente, deben de ser aplicadas técnicas de control secundario o terciario que incluyen tecnologías de contención o tratamiento. En Chile, la tecnología de control secundario potencialmente más aplicable es la cubierta simple.

Por otro lado, en faenas mineras abandonadas, la tecnología más aplicable es la de tratamiento pasivo, debido a que no requiere mayor mantención y que los costos son mínimos.

Finalmente se recomienda destinar mayor cantidad de recursos a la investigación de este fenómeno en el contexto específico de la Minería Chilena.

I. INTRODUCCIÓN

La alta concentración de la actividad minera en Chile y los impactos ambientales propios de la actividad conllevan a desafíos importantes en cuanto a su sustentabilidad, que comprenden cómo extraer en forma eficiente los minerales de interés sin generar impactos ambientales mayores.

Una posible respuesta a este desafío, en el mediano plazo, es la implementación de Tecnologías Limpias en el desarrollo, la operación y el cierre de una faena minera, con el fin de reducir el impacto ambiental disminuyendo la cantidad de residuos generados (sólidos y líquidos) y su emisión al medio ambiente, mitigando la peligrosidad de ellos, recirculándolos al proceso productivo o reutilizándolos en otros procesos, para así mejorar la productividad, competitividad y sustentabilidad de la industria minera chilena. Sin embargo, generalmente la implementación de estas medidas conlleva a altos costos tanto en equipos como en horas de trabajo de investigación aplicada.

Actualmente, se reconoce la importancia del tema de generación de aguas ácidas por los efectos a largo plazo que el drenaje ácido ha presentado en diversos lugares del mundo, y la necesidad de que éste sea ponderado adecuadamente en Chile, sobre la base de un conocimiento científico sólido.

El objetivo actual de la industria del cobre es aplicar la mejor tecnología disponible para el tratamiento de efluentes industriales y/o desarrollar nuevos procesos metalúrgicos (innovación) para lograr una minimización de los residuos.

De acuerdo al tipo de mineral, oxidado o sulfurado, se utiliza una determinada tecnología para su procesamiento, generando diferentes residuos en cada caso (Figura 1). El tipo de residuo que nos interesa, en este trabajo es el que puede generar drenaje ácido, asociado principalmente a los procesos de extracción del mineral.

Diariamente la minería genera grandes volúmenes de residuos, que pueden ser potencialmente generadores de drenaje ácido. Para la obtención de una tonelada de cobre metálico, es necesario remover en promedio aproximadamente 350 ton de material estéril, 150 ton de mineral de baja ley, 66 ton de colas o relaves, 57 ton de residuos de lixiviación y 1 ton de escoria (24). Como la producción total de cobre en Chile en 1997 fue de 3.297.200

toneladas, esto da claramente una noción del alto impacto ambiental de esta actividad asociada al medio ambiente.

El drenaje ácido tiene una composición típica en muestras seleccionadas desde 21,8 ppm de Fe; 240 ppm SO_4^{-2} ; 0,15-0,5 ppm Cu; 0,04 As y un pH entre 1-2 (13). Los metales pueden alcanzar altas concentraciones, del orden de los g/L.

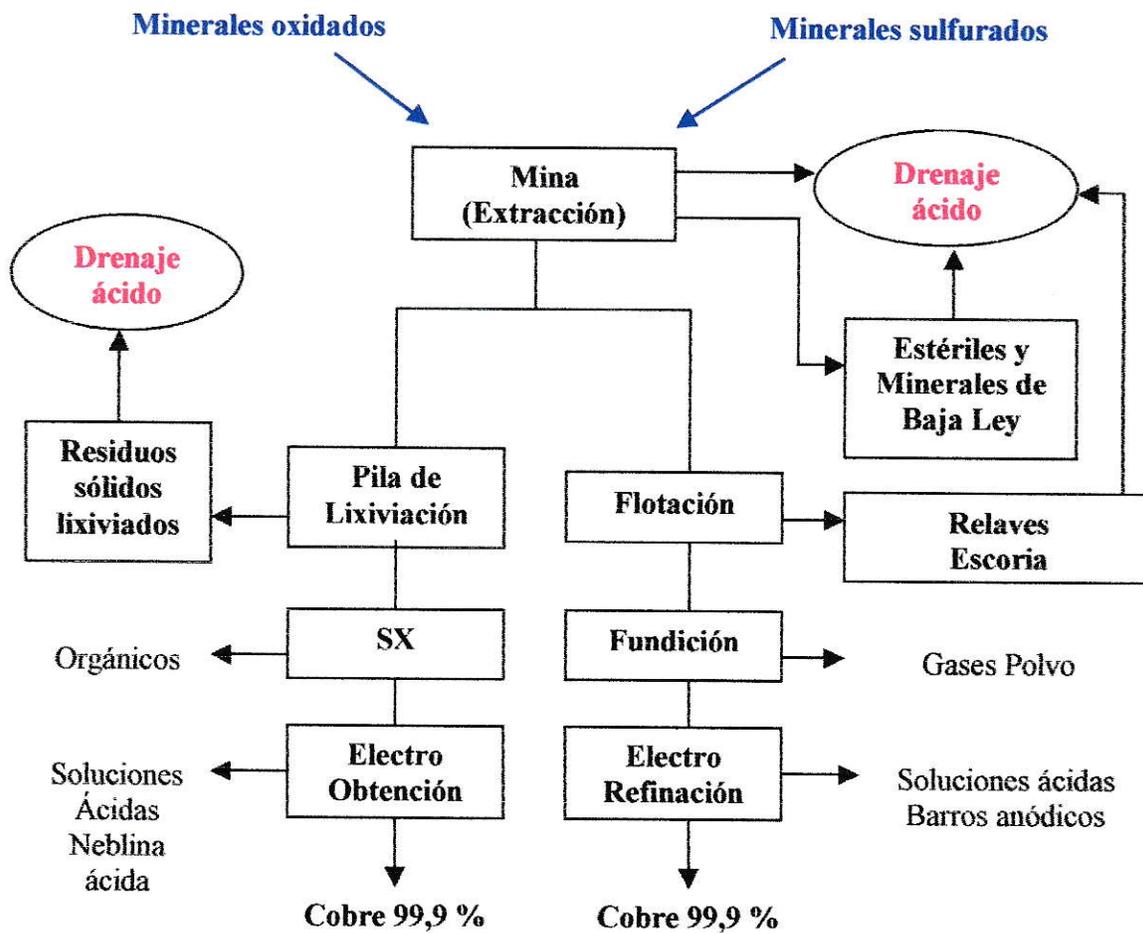


Figura 1.- Diagrama simplificado de las alternativas de tratamiento de Cobre. Principales efluentes contaminantes.

Fuente: Adaptado de (13, 24).

1.1 Conceptos generales

1.1.1 Definición del 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 (5). 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.

El Drenaje Ácido de Rocas (DAR), es el fenómeno de generación de aguas ácidas, producido por procesos de meteorización de rocas (principalmente oxidación de sulfuros) en cualquier ambiente o marco, es decir puede existir en el medioambiente sin actividad minera. En cambio, el Drenaje Ácido de Minas (DAM), es el fenómeno de generación de aguas ácidas, asociado a la explotación de yacimientos minerales, es decir a la actividad antropogénica. En este trabajo generalmente se utilizará el término DAR, ya que se considera más amplio porque puede generarse en un ambiente natural con o sin actividad minera.

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 (5).

Las soluciones de drenaje ácido frecuentemente presentan un color café rojizo, atribuido al ión Fe (III), Figura 2; 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. Generalmente, cuando el escurrimiento de drenaje ácido es aireado, se forman manchas café rojiza en los cauces y canales del drenaje (5).



Figura 2.- Drenaje ácido en Mina abandonada, Bureau.
Fuente: (29) Department of Environmental Protection Pennsylvania.

1.1.2 Fuentes, mecanismos y etapas de generación de drenaje ácido

Las fuentes principales del drenaje ácido son:

- Botaderos de material estéril ($< 0,2 \% \text{ Cu}$), y de sulfuros de baja ley ($0,2 \% < \text{Cu} < 0,4\%$). Actualmente en Chile se generan más de 3.000.000 ton/día de este tipo de material.
- 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 la enorme cantidad de 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. El Cuadro 1 representa las etapas del drenaje ácido y sus mecanismos de reacción:

Cuadro 1. Etapas y Mecanismos de desarrollo del drenaje ácido de roca.

Etapas	Mecanismos
Etapa I	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los minerales sulfurados, principalmente pirita (bisulfuro de hierro (FeS_2)), son oxidados químicamente por el oxígeno del aire, que es el oxidante principal. El producto de esta reacción de oxidación es sulfato, hierro ferroso y protones (H^+), los cuales generan acidez. ➤ En el rango normal del 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_3), presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez y originan la oxidación y precipitación del hierro como óxido o hidróxido. ➤ 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 DAR.
Etapa II	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En esta etapa el pH del microambiente ha disminuido hasta 4,5; por lo que ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas. ➤ Si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3,5. ➤ 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.
Etapa III	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Las reacciones de oxidación catalizadas por las bacterias aumentan. ➤ Se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente a hierro férrico, el cual se convierte en el oxidante dominante, reemplazando al oxígeno y el drenaje se vuelve aún más ácido producto de la oxidación de sulfuros metálicos (ZnS, PbS, etc), con mayores concentraciones de metales disueltos. ➤ 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.

Fuente: Información contenida en la tabla proviene de (5).

Estas tres etapas permiten comprender la evolución del DAR en el tiempo y su interpretación en el campo (Figura 3).

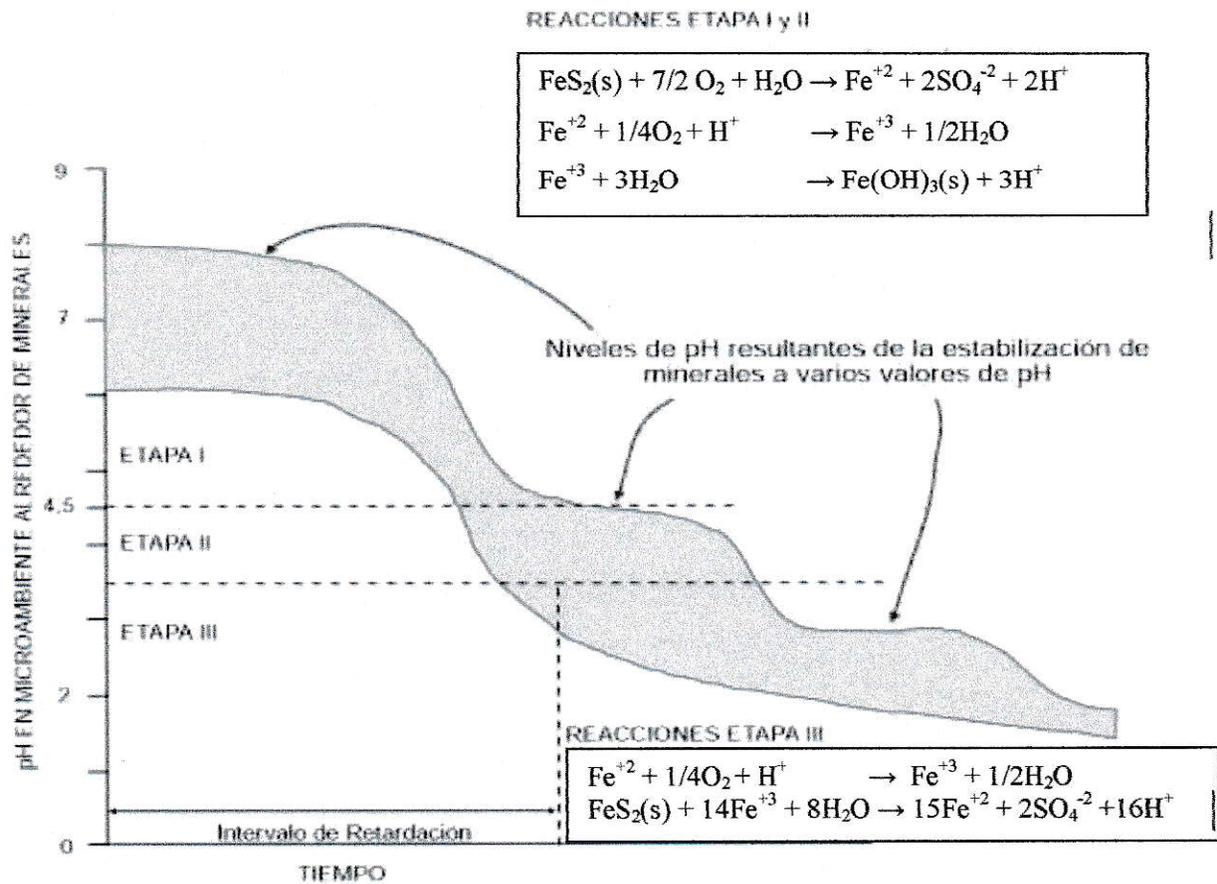


Figura 3.- Etapas en la formación del drenaje ácido.

Fuente: (5) Mendoza Juan, Mogrovejo José, Yataco Amado. Ministerio de Energía y Minas, República del Perú.

1.1.3 Posibles impactos y efectos del drenaje ácido sobre el medioambiente

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 nuestro país. 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 (15). La preocupación fundamental en cuanto al drenaje ácido, se debe a su potencial impacto, adverso sobre la flora y la fauna del ambiente receptor (Figura 4). Además, a los potenciales 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 (1, 5, 15) :

- 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 (1, 19):

- El alto contenido de sulfato 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 el pH bajo no es en sí el factor más crítico 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 neutra, pero puede contener niveles elevados de metales solubles en pH neutro o alcalino, tales como el zinc o el arsénico cuya solubilidad no disminuye linealmente con el aumento del pH. Además, puede precipitar a los iones solubles de hierro férrico (Fe^{+3}), produciendo hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) 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 (30), (Figura 5). Es considerado un impacto negativo sobre los organismos vivos en el río y también desde el punto de vista estético.

En el Cuadro 2, se presenta un resumen de los efectos tóxicos de los metales pesados más directamente asociados al drenaje ácido, en términos de ocurrencia sobre la flora, fauna y salud de las personas.¹

¹ El molibdeno muestra un aumento de solubilidad con el aumento del pH, por lo que no se encuentra en aguas ácidas, sino en aguas de relaves. El plomo tiene muy baja solubilidad en agua. Pero, cuando el pH es <5, aumenta su solubilidad.



Figura 4.- Drenaje ácido de una bocamina de 100 años de edad. Dundas Western Tasmania.

Fuente: (35) Environmental Australia

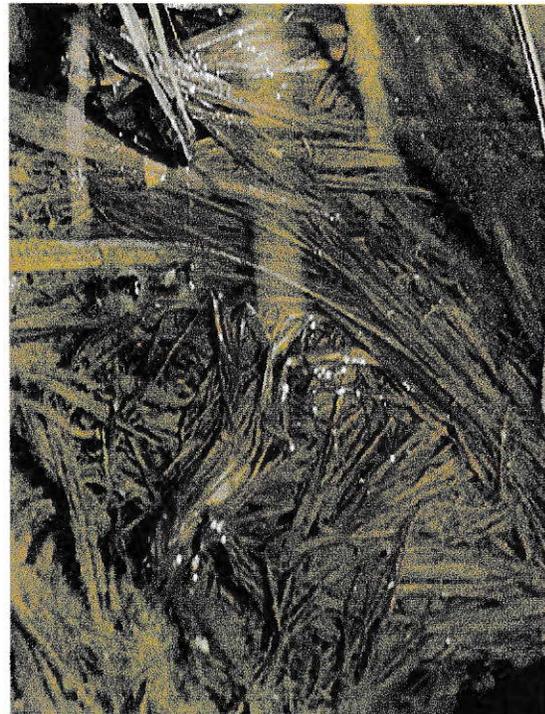
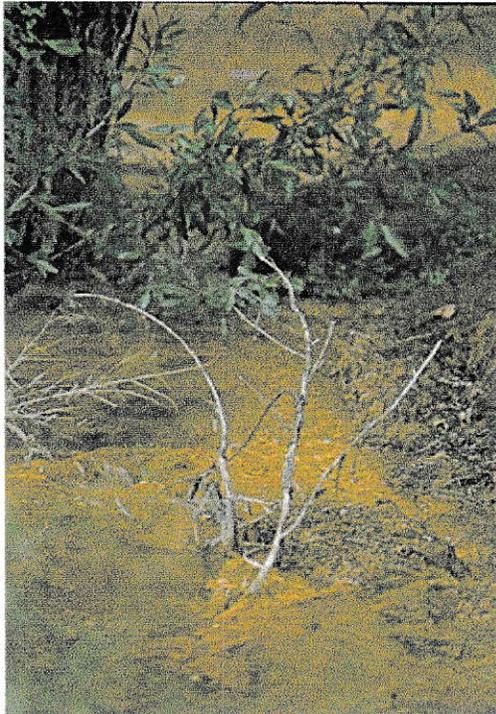


Figura 5.- Precipitación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, sobre el lecho de un riachuelo cubriendo plantas y organismos acuáticos. Efecto devastador del “yellow boy” sobre la ecología de corrientes de agua dulce. Fuente: (30) “Acid Mine Drainage Experiments”.

Cuadro 2. Efectos tóxicos de algunos metales pesados sobre la flora y la fauna

Metal	Toxicidad	Efectos sobre flora	Efectos sobre fauna	Efectos en la salud
Cobre	Baja-Media ²	<ul style="list-style-type: none"> - Micronutriente esencial, afecta la actividad enzimática. - Altas dosis provocan la disminución del crecimiento de las raíces, el follaje se pone amarillo y se reduce su crecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Micronutriente esencial, afecta la actividad enzimática. - Altas dosis provoca almacenamiento en el hígado, sin capacidad de eliminación. - Hemólisis. 	
Arsénico	Elevada	<ul style="list-style-type: none"> - Generalmente, no hay una captación importante, excepto en los rábanos y en los pastos o hierbas, que lo acumulan más activamente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede acumularse en los peces, en forma orgánica. - Efecto cancerígeno. 	<ul style="list-style-type: none"> - La exposición crónica al arsénico produce hiperarsenosis o arsenosis (decoloración de la piel y la aparición de pequeñas verrugas). - Envenenamiento por arsénico produce trastornos gastrointestinales, parálisis de miembros inferiores.
Zinc	Muy baja	<ul style="list-style-type: none"> - Micronutriente muy esencial en plantas por su rol en diversas enzimas. - Altas concentraciones en el suelo, reducen la producción de plantas y produce clorosis férrica. - Relativamente insoluble en suelos, pero su disponibilidad aumenta con el aumento del pH. 	<ul style="list-style-type: none"> - Micronutriente esencial en animales, por su rol en diversas enzimas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Afecta la actividad enzimática, el crecimiento y el apetito.
Cadmio	Elevada	<ul style="list-style-type: none"> - Captación de cadmio es especialmente alta en suelos ácidos. - Captación y acumulación de altas concentraciones en vegetales de hoja (espinaca y lechuga). 	<ul style="list-style-type: none"> - No tiene una función biológica esencial. - Puede ser absorbido por pescados y mariscos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se incorpora en todos los niveles de la cadena alimenticia, desde los microorganismos hasta los humanos. El consumo de vegetales de hoja, pescado, mariscos y agua potable es el método usual de entrada al cuerpo humano. Posiblemente carcinógeno y teratogénico. - La acumulación de Cd causa disfunción del riñón y las concentraciones mayores a 200 ppm son generalmente fatales.
Mercurio	Moderada	<ul style="list-style-type: none"> - Se tiende a concentrar en las capas orgánicas más cercanas a la superficie del suelo, especialmente en suelos de bajo pH. - La fitotoxicidad es baja y las raíces sirven como una barrera para la captación de Hg. 	<ul style="list-style-type: none"> - No tiene función biológica esencial. - Especialmente tóxico en animales. - El metilmercurio puede formarse naturalmente en el suelo en asociación con el ácido fúlvico complejo y tiene efectos mutagénicos, carcinógenos y teratogénicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muy tóxico en humanos. La exposición a altos niveles de especies inorgánicas producen alteraciones neurológicas (trastornos del sistema nervioso central), posible psicosis, daño en el riñón y en el desarrollo del feto.
Antimonio	Elevada	<ul style="list-style-type: none"> - A pesar de no ser esencial para las plantas, tiene una movilidad moderada. - Es fácilmente absorbido por raíces y experimenta bioacumulación en los suelos. 		
Plomo	Elevada	<ul style="list-style-type: none"> - Para las plantas parece poco tóxico pues no lo absorben fácilmente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Provoca permeabilidad de membranas. - En la sangre los eritrocitos son más frágiles y anormales. Afecta a los riñones y provoca pérdidas prematura de los dientes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alteraciones neurológicas (disminución del coeficiente intelectual infantil), nefrototoxicidad, anemia y cáncer de riñón.

Fuente: Tabla elaborada a partir de (5,10,15,19).

² El cobre es especialmente tóxico en aguas con bajo pH, para la flora y la fauna. Sin embargo, los efectos en la salud son muy sutiles.

1.1.4 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 generación de drenaje ácido en Chile. Como se indicará más adelante, en el capítulo 3, existen una serie de factores geológicos, hidrológicos 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. La gran mayoría de los yacimientos de cobre actualmente en explotación en Chile son pórfidos cupríferos³. 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 (16). 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

³ Si bien existen otros tipos de yacimientos en Chile, sólo se mencionan los pórfidos cupríferos por ser los más comunes en Chile. Más información en: (16) Geología y yacimientos metalíferos de Chile.

áreas en la que no ha existido nunca actividad minera. Este es el caso de la Mina Balmaceda Opositora, La Campana.

Es importante destacar que debido a las condiciones geológicas e hidrológicas de Chile, 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 $34^{\circ}6'$ sur. Este ejemplo de aplicabilidad, será descrito en la página 86.

Otro caso donde se detectó la presencia de potencial generador de aguas ácidas en cuerpos mineralizados y en lastre fue en el botadero de Los Juncos, Proyecto Fachinal, yacimiento de Los Bronces ubicado en la latitud $33^{\circ}9'$ sur, también dentro de la faja principal de pórfidos cupríferos.

Las siguientes Figuras 6 y 7 muestran la presencia de drenaje ácido en dos zonas del norte de Chile, y la Figura 8 corresponde a la presencia de drenaje ácido en una mina subterránea.

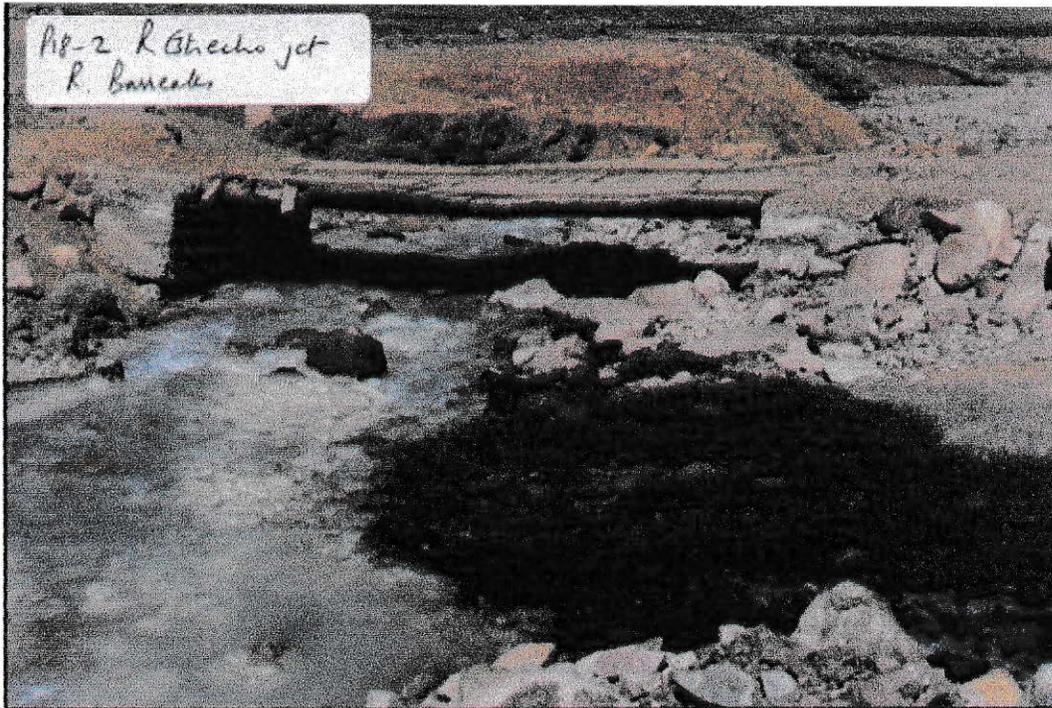


Figura 6.-Foto del Río Estrecho al unirse con Q. Barreales (Pascua-Lama).



Figura 7.- Foto del Río Malo al unirse con Río Laguna. El Indio
Fotos: J. Binns.

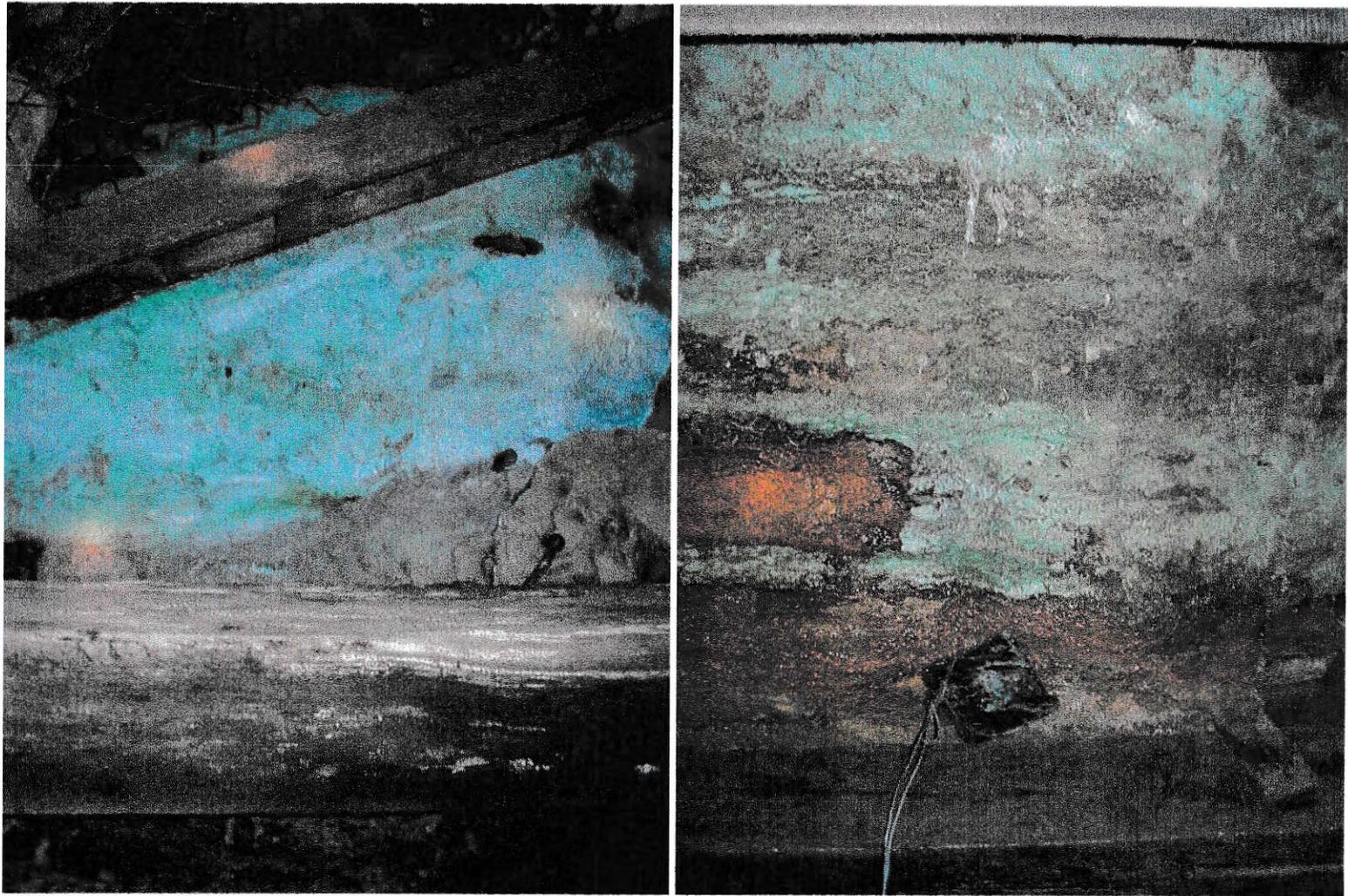


Figura 8.- Foto del drenaje ácido en una Mina Subterránea en El Teniente.
Foto: R. Gallinger

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Analizar el fenómeno de drenaje ácido en el contexto específico de la minería en Chile, en cuanto a los factores geológicos, hidrológicos y mineros que influyen en este fenómeno e identificar medidas de predicción, control y/o tratamiento aplicables en este contexto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar los factores geológicos, hidrológicos y mineros que influyen en la generación, el transporte y los posibles impactos del drenaje ácido en el medioambiente.
- Revisar la aplicabilidad a las faenas mineras en Chile, de diferentes metodologías de predicción, control y tratamiento del drenaje ácido utilizadas en otros países.
- Obtener un manual de consulta de drenaje ácido en la Industria Minera Chilena, como una herramienta orientada a profesionales y especialistas del sector minero 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.
- Elaborar recomendaciones para el sector minero en cuanto a los métodos de control con mayor aplicabilidad en Chile.

1.3 Metodología de Trabajo

La metodología de trabajo se puede resumir en los siguientes pasos:

- Recopilación y revisión de las guías existentes para el Manejo de Residuos Mineros potencialmente generadores de Drenaje Ácido.
- Adaptación de metodologías de evaluación y gestión de riesgos aplicadas en otros países, a la situación específica de Chile y propuestas de prácticas de prevención, control y/o tratamiento de drenaje ácido.
- Recopilar ejemplos de aplicabilidad en Chile de medidas de predicción, control y/o tratamiento de drenaje ácido.
- Reuniones mensuales de discusión, con el Grupo de Trabajo dedicado al tema del drenaje ácido dentro del contexto del Acuerdo Marco de Producción Limpia. Este grupo contó con

la participación de profesionales del sector público y de empresas mineras, relacionados con recursos naturales, salud y minería.

Empresas del Sector Público participantes:

- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Ministerio de Minería.
- Ministerio de Salud.

Compañías Mineras Participantes:

- Compañía Minera Disputada de las Condes Ltda.
- Barrick Chile.
- CODELCO CHILE - División Andina.
- BHP Billiton.

II. FACTORES RELACIONADOS CON LA GENERACIÓN, TRANSPORTE Y EFECTOS 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 DAR se puede producir en la fuente u origen debido a varios factores (mineral sulfurado, 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 efectos (Figura 9).

El fenómeno de 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 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 (1), y a su vez se pueden sub-agrupar en factores geológicos, hidrológicos y mineros. En el Cuadro 3 se presenta un resumen de estos factores.

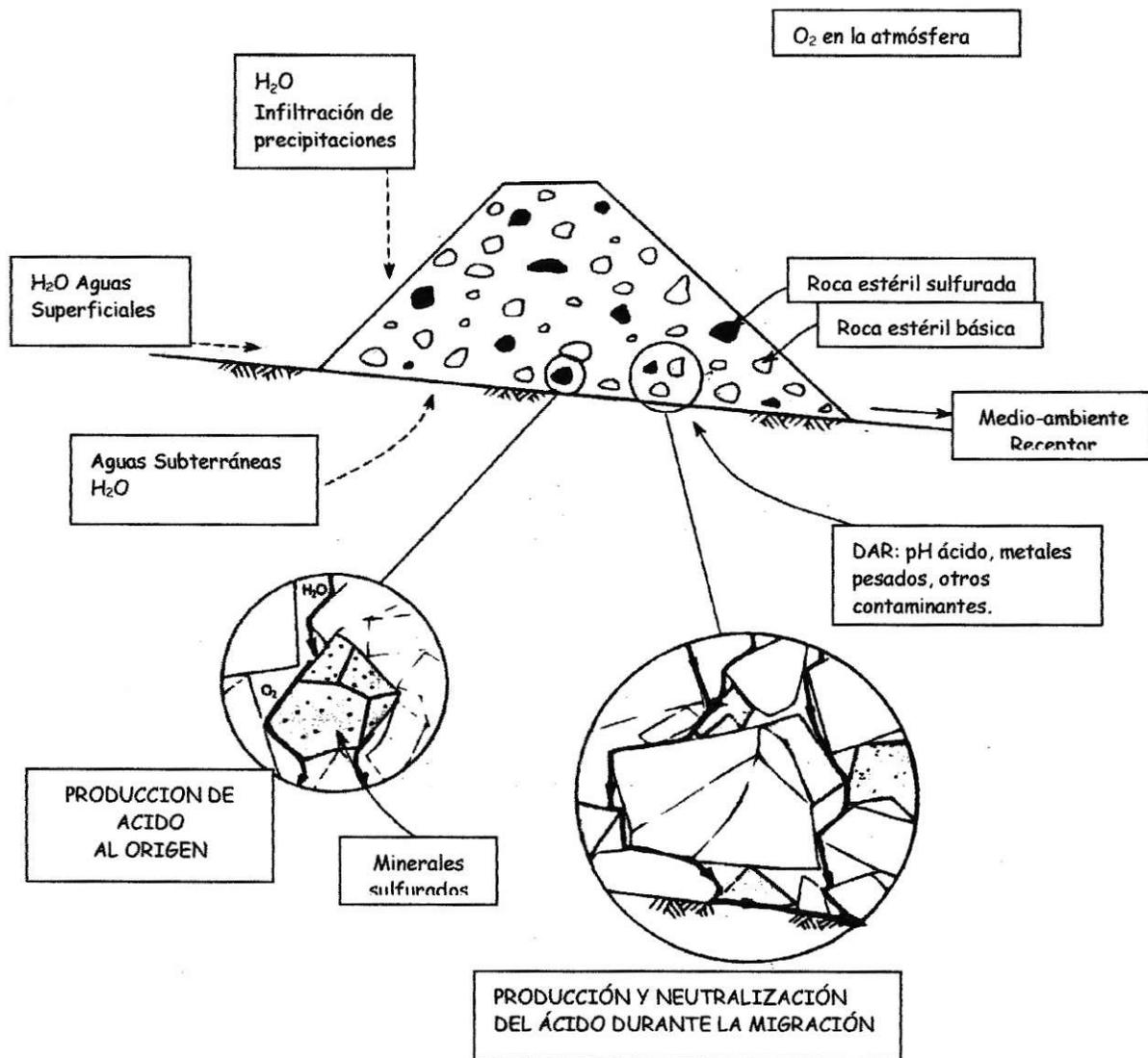


Figura 9.- Dinámica del drenaje ácido en el medioambiente.
Fuente: Esquema adaptado de (9) Armando Valenzuela, COCHILCO.

Cuadro 3. Factores primarios, secundarios y terciarios que influyen en el drenaje ácido.

Factores	Hidrológicos	Geológicos	Mineros
<p>1. Primarios: Son aquellos factores que determinan la cantidad de ácido que se puede generar en un ambiente determinado.</p>	<p>a. Disponibilidad de agua para la oxidación de minerales sulfurados. b. pH inicial del agua (background). c. Equilibrio hierro férrico/ferroso d. Actividad microbiológica presente en las aguas.</p>	<p>a. Tipo de yacimiento. b. Marco litológico. c. Cantidad y mineralogía de sulfuros. d. Resistencia de los sulfuros a la meteorización. e. Disponibilidad de oxígeno.</p>	<p>a. Ubicación del yacimiento: (altura, T° ambiental, viento, presión atmosférica, etc). b. Actividad microbiológica presente en rípios de biolixiviación. c. Cantidad de sulfuros en los residuos mineros masivos.</p>
<p>2. Secundarios: Son aquellos factores que determinan la cantidad de ácido que puede ser neutralizada naturalmente en un ambiente determinado.</p>	<p>a. Especiación y concentración de elementos disueltos en el agua de drenaje.</p>	<p>a. Disponibilidad, mineralogía y resistencia de las especies químicas neutralizantes: Minerales alcalinos (carbonatos) y en menor grado Minerales silicatos y aluminosilicatos (mica y minerales de arcilla).</p>	<p>a. Alcalinidad de los residuos mineros masivos.</p>
<p>3. Terciarios: Son los factores que determinan la velocidad con la cual se pueden producir la generación y el transporte de las soluciones ácidas.</p>	<p>a. Factores climáticos: • Precipitación (pluvial y nival) • Evaporación y sublimación • Fusión de hielo y nieve b. Potencial de transporte de contaminantes al ambiente receptor: • Caudal • Superficie de escurrimiento e infiltración resultante de la pluviosidad c. Química natural de los cuerpos de agua receptores: • Dureza • Alcalinidad • Contenido de materia orgánica</p>	<p>a. Tipo de alteración: • Características físicas del material de roca: <i>tamaño de la partícula, dureza del material, porosidad del lecho.</i> b. Mineralogía de los productos de alteración. c. Factores hidrogeológicos • Permeabilidad • Transmisividad • Porosidad total d. Comportamiento electroquímico de los sulfuros.</p>	<p>a. Características físicas del material de residuo minero: • Tamaño de la partícula. • Dureza del material. b. Factores hidrogeológicos del material de residuo: • Permeabilidad • Porosidad total</p>

Fuente: Tabla elaborada a partir de (1, 4, 5, 19).

➤ Factores hidrológicos

Los factores hidrológicos 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. A continuación, se presenta una breve descripción de los factores hidrológicos mencionados en el cuadro 3.

1. Factores hidrológicos 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),

1.c. Equilibrio hierro férrico/ferroso

1.d. Actividad microbiológica presente en las aguas: Estos tres factores están directamente relacionados. 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. Mientras que a valores de $\text{pH} \geq 3,5$, el hierro férrico precipitará como hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

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 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 (5). Estas bacterias desarrollan actividad a un determinado rango de pH de los medios de reacción y de temperatura (T°) de los residuos. La oxidación continua consiste en la producción de iones hidrógeno (H^+) 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*.(Figura 10). Las características, funciones y pH al cual se desarrollan en los residuos mineros, de ésta y otras bacterias catalizadoras del proceso de oxidación de compuestos sulfurados y de hierro reducidos, se resumen en el Cuadro 4.

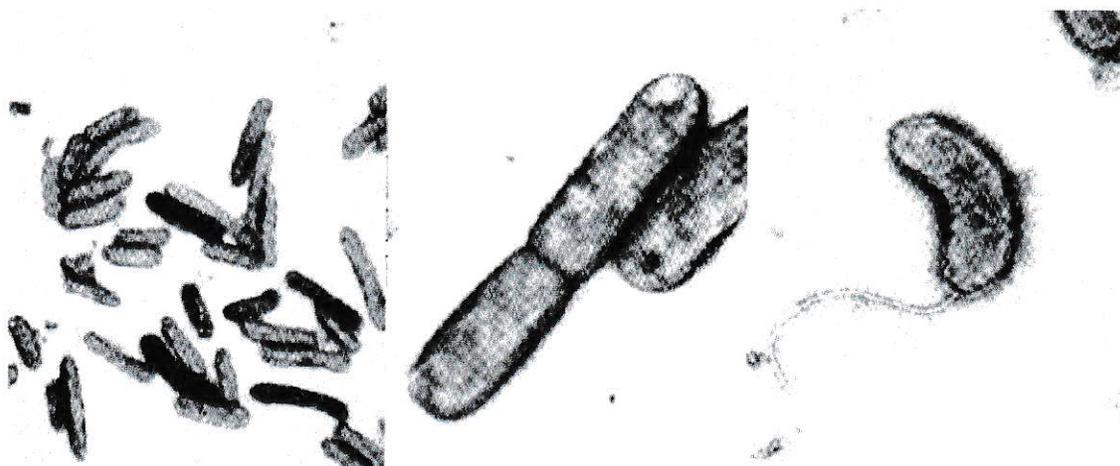


Figura 10.- Micrografías que ilustran la forma y apariencia de *At. ferrooxidans*: La bacteria desarrolla un flagelo sólo si son requeridas para movilidad en la obtención de fuentes de energía. Ampliación alrededor de x5000 (derecha), x20000 (centro), x 15000 (derecha).

Fuente: (28) Virginia Cooperative Extension. Knowledge for the Common Wealth.

Cuadro 4. Principales bacterias que participan en acelerar la oxidación de compuestos de azufre y de hierro reducido Fe(II).

Tipos de Bacterias	Características	Función	pH al cual se desarrollan
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i> (denominada actualmente <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>)	Bacteria acidófila sulfo-oxidante y ferro-oxidante mesófila. Puede vivir en cualquier ambiente natural (incluso en condiciones muy ácidas), excepto en ambientes salinos. ⁴ Para oxidar sulfuros es aeróbica y anaeróbica facultativa.	Aumenta 10 ⁶ veces la velocidad de oxidación química 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.
<i>Thiobacillus thiooxidans</i> (denominada actualmente <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>)	Bacteria acidófila sulfo-oxidante mesófila. Se desarrolla en el mismo ambiente que la <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> . Actualmente es utilizada.	Acelera la oxidación de los minerales sulfurosos. Sólo oxida compuestos reducidos de azufre.	Se desarrollan luego que el pH desciende a valores < 3,5. Incluso se pueden desarrollar a pH>6.
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	Bacteria acidófila ferro-oxidante mesófila. Estrictamente aeróbica.	Acelerar la oxidación de los minerales sulfurosos. Sólo oxida el ión ferroso (Fe ⁺²), utilizándolo como fuente de energía.	Se desarrollan luego que el pH desciende a valores < 3,5.
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Bacterias Acidófilas sulfo-oxidantes termófilas moderadas. Se desarrollan a temperaturas superiores a los 45°. Es aeróbica y anaeróbica facultativa.	Oxida a temperaturas superiores a aquellas de las bacterias mesófilas.	Si la T° de los residuos aumenta a 50°C, es posible encontrar las bacterias acifófilas/termófilas sulfo-oxidantes.

Acidófilas: Bacterias donde el pH óptimo es inferior a 4,5.

Mesófilas: Bacterias en que la T° óptima de crecimiento está entre 15-40°C.

Termófilas moderadas: Bacterias donde la T° óptima de crecimiento es > 45°C.

Fuente: Fuente: Tabla elaborada a partir de (4, 8, 9, 19, 20, 21).

⁴ En el caso del Norte de Chile, las aguas tienen altos niveles de cloruro, lo que puede generar una química completamente distinta e interesante de investigar a futuro.

2. Factores hidrológicos 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 (19).

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 (19).

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 (6).

3. Factores hidrológicos terciarios

3.a. Factores climáticos: El agua es un elemento dinámico, de importante reactividad química, que se encuentra en constante movimiento en el ambiente natural en busca del balance hidrológico. 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 la evaporación y sublimación, la fusión de hielo y nieve, la humedad y el caudal (19).

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.⁵

Para determinar el equivalente en agua de nieve, se debe tener en cuenta que la nieve tiene distintos valores de densidad dependiendo del tiempo transcurrido después de haber precipitado.⁶

⁵ Información sobre niveles de precipitaciones en distintas zonas de Chile: Dirección General de Aguas (DGA).

⁶ Mayor información sobre densidades de la nieve: Handbook of Hydrology, ed. Maidment 1993.

La altura de nieve se mide con un sensor, pero éste puede generar registros de baja confiabilidad o confusos, debido a la velocidad del viento. Ante este hecho, es mejor utilizar un pluviómetro y adaptarlo a la nieve, y los resultados serán de mayor confiabilidad (19).

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 (19).

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 hidrológico. En relación a esto, se ha establecido que (19):

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

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

La *fusión de hielo y de la nieve* (deshielos de glaciares y cordilleras) es la fuente de recarga de agua más importante (19).

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 realizado 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 (19).⁷

Las mediciones en terreno pueden ser (19):

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

Se debe destacar, que es importante tener un método uniforme según un manual de procedimientos, para que el cambio de turnos de trabajadores no afecte la calidad de las mediciones y por ende de los resultados. Los valores de caudales en las cuencas deben ser obtenidos a partir de mediciones en puntos claves.

⁷ Mayor información sobre la Ley de Darcy en Perry's Chemical Engineer's Handbook. Mac Graw Hill, 1999.

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 (19).

Las unidades del perfil del suelo donde pueden ser transportados los contaminantes del drenaje ácido son: acuífero, acuitardo y acuícludo (19).

- 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).
- Acuitardo: Una unidad de roca que limita el flujo de agua subterránea, por su baja permeabilidad.
- Acuícludo: 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 (19):

- 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. 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 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, excepto el Arsénico (As) y Mercurio (Hg).
- 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 menos tóxicas.
- Intercambio catiónico.
- Biodegradación: La *materia orgánica disuelta* puede acomplejar 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 alcalinas.

➤ 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 (19).

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(19):

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*⁸, los cuáles 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 (16).

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 (16).

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 (16).

⁸ 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. Mayor información: (16) Geología y yacimientos metalíferos de Chile.

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 (16).

Es importante destacar el origen de los yacimientos “exóticos”, que son el producto de la migración de soluciones generadas en procesos de DAR 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 (19).

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 (16).

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 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^{+3} (19).

Los sulfuros de estequiometría MS_2 (Pirita (FeS_2)), generan más protones a través de los procesos de oxidación con todo tipo de oxidantes. La formación y precipitación de minerales del tipo MSO_4 , produce un depósito de material de alto potencial de ácido. Por cada mol de pirita oxidado, sólo el 33% del sulfato y H^+ disponible se moviliza. El balance forma

un sulfato no-hidrolizado y parcialmente oxidado. Los pórfidos cupríferos tienen un alto contenido de sulfuros y/o sulfatos (19).

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 (19).

En el Cuadro 5, 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.

Cuadro 5. Resistencia de sulfuros a la meteorización

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

Fuente: (19) Curso DAR. Water Management Consultants Ltda.

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.

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 (1). 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 (1, 4, 5).

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 Cuadro 6, 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 (PN) y su reactividad.⁹

A mayor potencial de neutralización, 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.

⁹ Información adicional: (27) GUIDE TECHNIQUE PRÉLIMINAIRE SUR LE DRAINAGE ROCHEUX ACIDE.

Cuadro 6. Resistencia de neutralizantes

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

*PN: Potencial de neutralización: calculado en base de equivalente de 10g/calcita.
Fuente: (19) Curso DAR. Water Management Consultants Ltda.

3. Factores geológicos terciarios

3.a. Tipo de alteración: Las rocas no alteradas o mineralizadas están menos expuestas a la meteorización por condiciones del ambiente y el potencial de producción de ácido en términos cinéticos, es más 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 y la lixiviación de metales base. Durante las operaciones de minería, el material de roca es fracturado generando pedazos, que aumentan la superficie específica de contacto (m^2/ton), 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.

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 (5, 19).

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 el nivel freático.

Los sulfuros secundarios incluyen usualmente covelita (CuS) covelita y calcocita (Cu₂S). 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 (19).

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 (19):

- 1) Reactividad del mineral secundario / primario >1 → Alta solubilidad del mineral
 $PbS + 2 O_2 \Leftrightarrow PbSO_4$ (anglesita) Mayor movilización de Pb
- 2) Reactividad del mineral secundario / primario < 1 → Baja solubilidad
 $FeAsS + 3,5 O_2 + 3H_2O \Leftrightarrow SO_4 + 2H^+ + FeAsO_4 \cdot 2H_2O$ (escorodita) Encapsulación

Controlando las condiciones de pH/Eh, se puede controlar la producción de minerales secundarios (19).

3.c. Hidrogeología del yacimiento: Este factor incluye las porosidades, permeabilidades y 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, $k(\text{sat})$, (19).

$$K(u) = f(\text{contenido de agua y succión})$$

$$K(u) < K(\text{sat})$$

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 (19).

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 acuífero (baja permeabilidad) está constituido principalmente por arcilla, cuyo valor de porosidad está en el intervalo: 0,4- 0,6), (19).

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 (19).

3.d. 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 (19).

Una fase de potencial eléctrico alto forma un cátodo, mientras que una fase de potencial eléctrico más bajo forma un ánodo (19).

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 (19).

➤ 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 DAR, para cada una de las fuentes identificadas (5).

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.

En el norte de Chile la gran parte de las faenas mineras se encuentran a grandes alturas, con baja disponibilidad de terrenos extensos y planos, lo que podría afectar el establecimiento de sistemas de tratamiento pasivo como medida de control.

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 calórico 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.

1.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. A este proceso se le denomina “enfermedad bacteriana” de los residuos mineros (36).

La más conocida de estas bacterias es la *Thiobacillus ferrooxidans*, la cual se emplea actualmente en procesos de biolixiviación de minerales, luego del descubrimiento de su capacidad para disolver minerales sulfurados¹⁰. Esta tecnología reduce el impacto ambiental respecto a la tecnología clásica de la pirometalurgia, pero su lado oscuro es la generación del drenaje ácido (36).

¹⁰ Información adicional: (37) “Recicladores invisibles”

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.

1.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 ($< 0,2 \% \text{ Cu}$) y tonelaje de mineral ($> 0,4 \% \text{ Cu}$) 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 (5).

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 drenaje ácido (5).

Los relaves producidos por procesos de flotación y cianuración pueden llevar sulfuros, pero se caracterizan por su alta alcalinidad inicial (5).

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 DAR, 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 DAR 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 subaéreos (5).

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 (5).

En cuanto al tamaño de las partículas que componen el botadero de desmontes, la roca de mina de tamaño D_{50} (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 (5).

Las labores subterráneas pueden ser una fuente considerable del DAR, especialmente en las labores antiguas. Las paredes expuestas se encuentran usualmente en áreas mineralizadas y, por lo tanto, tienen contenidos de metal más elevados que el desmonte (5).

3.b. Factores hidrogeológicos del material de residuo: Incluyen la porosidad y permeabilidad del material de residuo.

En el caso de un botadero de desmonte, el DAR 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 drena del embalse y es gradualmente desplazada por el agua contaminada con DAR, 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.

III. 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 de riesgo, consideración de las necesidades, problemas, y el nivel de preocupación. El riesgo, es la posibilidad de sufrir pérdidas o daños en función de la probabilidad de ocurrencia del suceso peligroso y la magnitud de las consecuencias, tales como los efectos sobre la salud, la propiedad, el medio ambiente u otras cosas de valor, previamente descritos en el punto 1.1.3.

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. Los peligros físicos incluyen la combustión, la explosividad, la inflamabilidad y la corrosividad. Los peligros para la salud se clasifican en: agudos (por ejemplo, irritación de la piel y los ojos, efectos letales, asfixia) o crónicos (por ejemplo, carcinogenicidad, sensibilización, efectos sobre el sistema reproductivo, efectos sobre el sistema nervioso, efectos sobre los órganos). Entre los peligros ecológicos se encuentran la mortalidad (agudos), la reducción en el crecimiento y la reproducción (crónicos) en las especies representativas.

La identificación del peligro, es únicamente el primer paso en la evaluación de los riesgos y por esto, 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. Una vez identificado, se toman medidas para reducirlo, incluso si la evaluación cuantitativa posterior es defectuosa.

En el caso de la salud humana y el ambiente, se utilizan los resultados de las pruebas de toxicidad/ecotoxicidad y los datos epidemiológicos con el propósito de determinar el peligro.

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.

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.

3.1 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 (2).

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 (2). 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 (5):

- 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, 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) (1, 2, 4).

Actualmente en Chile, en la mayoría de los casos de predicción de drenaje ácido se utilizan ensayos estáticos tales como Balance Ácido Base (BAB) y pH en pasta, básicamente porque dan la capacidad total de producción de acidez, son relativamente baratos, fáciles de interpretar y de comparar con resultados en otras partes del mundo (2, 22) (ver anexo 2A). Generalmente se combinan con ensayos de extracción o toxicidad, específicamente el más utilizado es el SPLP, que será descrito brevemente en el ítem 3.1.1.4. Las pruebas de laboratorio cinéticas, generalmente no se practican por ser más caras y porque duran como mínimo 24 horas (ver anexo 2B). Finalmente, los geólogos realizan ensayos petrográficos y mineralógicos en los respectivos yacimientos, pero los resultados no son relacionados como una herramienta de predicción de drenaje ácido.

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 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 (1, 2, 5).

3.1.1 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 11) y el uso de las pruebas es usualmente específico del sitio.

El enfoque actual en la predicción de la calidad de 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. Luego, 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 (1, 2, 5, 22).

Estas pruebas son realizadas a través de una variedad de laboratorios de análisis químicos y universidades en Chile. La lista de algunos laboratorios y universidades que realizan este tipo de ensayos se encuentra en el anexo 1.

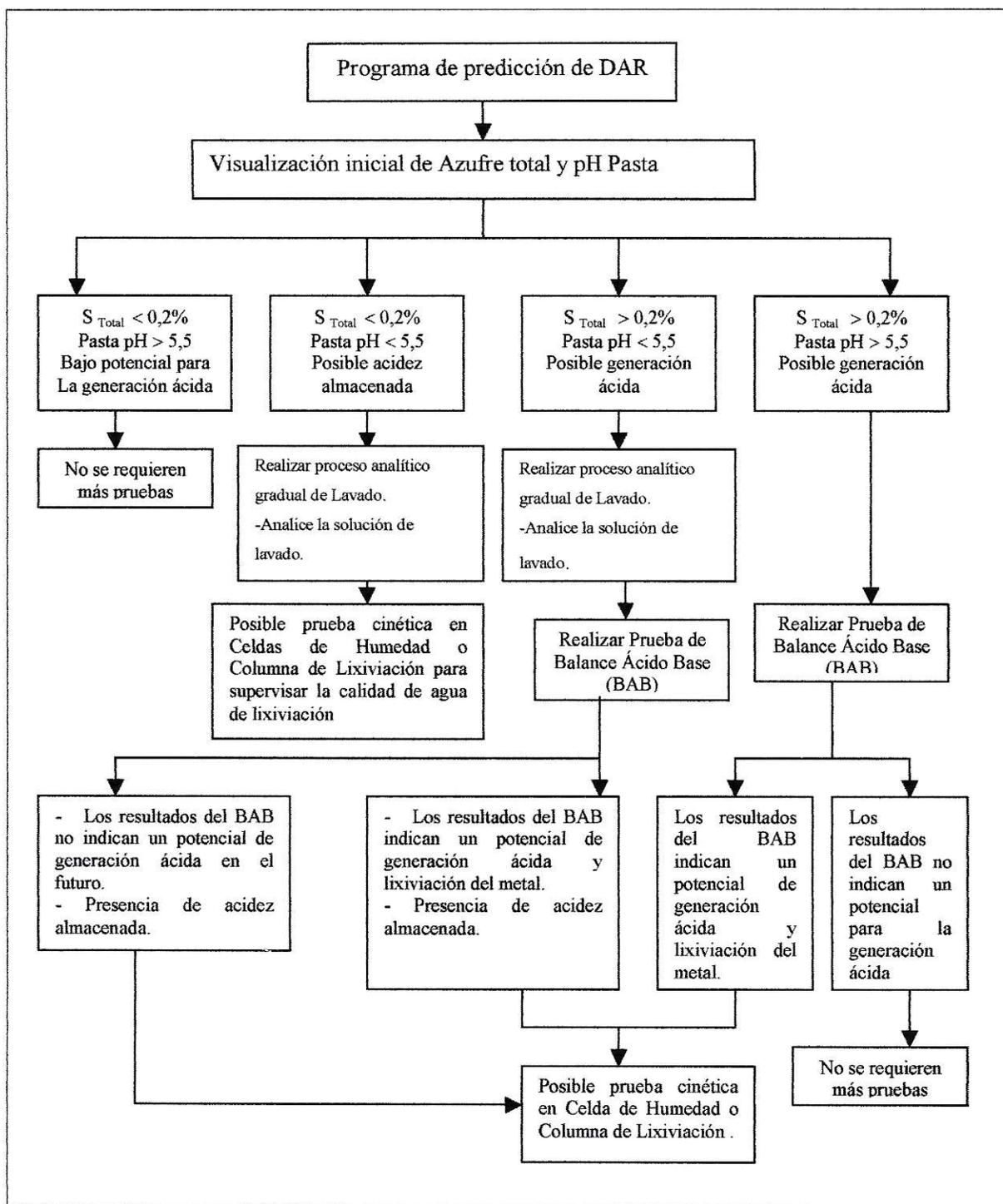


Figura 11.- Diagrama de un programa de predicción de drenaje ácido.

Fuente: Adaptado de (22) Min. Minería-SIGA. Guía Metodológica de Drenaje ácido.

3.1.1.1 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 (1, 2, 5).

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 (5, 22).¹¹

En el siguiente diagrama (Figura 12), se presenta los pasos más importantes en un programa de muestreo.

¹¹ Curva hipotética como guía para determinar el número de muestras requeridas para caracterizar unidades geológicas, desarrollada por Steffen Roberston and Kirsten et al; 1989.

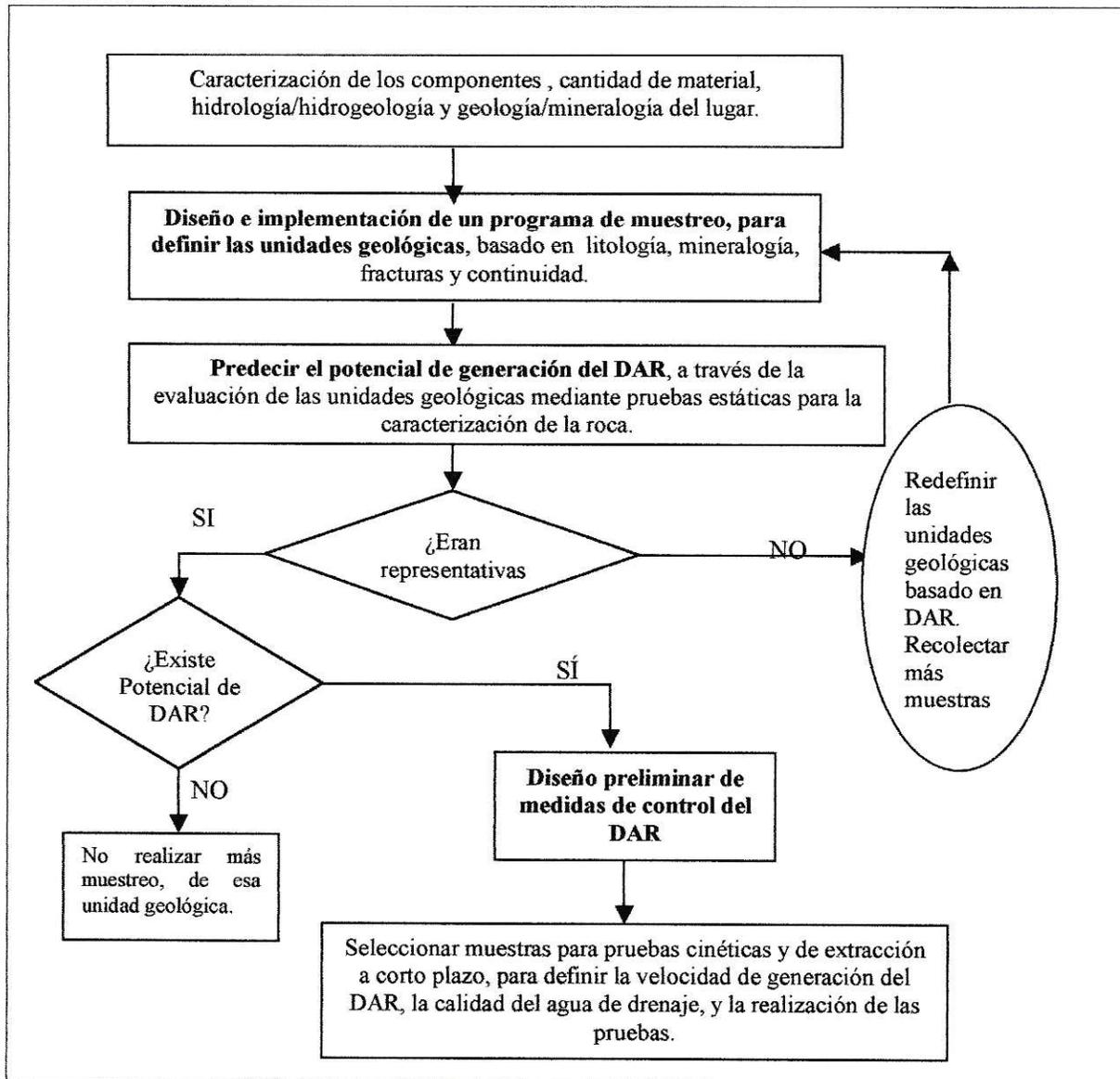


Figura 12. Diagrama de etapas de un programa de muestreo.

Fuente: Adaptado a partir de (1, 5).

3.1.1.2 Ensayos estáticos

Los ensayos estáticos, son el primer paso de todo programa de pruebas de predicción de DAR, a los que se recurre con el fin de tomar decisiones en lo concerniente al potencial de generación de ácido de diversos materiales sobre los que no se tiene documentación sustentatoria. Son ensayos químicos simples, baratos y rápidos, que determinan las propiedades geoquímicas del 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 (1, 2, 4, 5).

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) (5).

A través de la interpretación de resultados, el test estático permite categorizar los materiales en tres grupos:

- Bajo a nulo potencial de generación de ácido: si el valor del PNN (Potencial Neto de Neutralización $PNN = PN - PA$) es mayor que 20 t/kt y la relación PN/PA es mayor que 3.
- Potencial marginal de generación de ácido: si el valor PNN es menor que 20 t/kt y la relación PN/PA se encuentra entre 1 y 3.
- Alto potencial de generación de ácido: si el valor del PNN es negativo y la relación PN/PA es menor que 1.

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 (2, 4, 5):

1.- Balance ácido base (BAB)

- pH en pasta (indica 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 total.
- Concentración soluble (para materiales meteorizados y oxidados).

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). En el anexo 2A se presentan un resumen de estos métodos, su objetivo, fuente, origen, ventajas y limitaciones.

La evaluación mineralógica o petrográfica de las muestras, es utilizada para apoyar los resultados del método de balance ácido base. Es usualmente llevada a cabo, 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 (2, 24), etc.¹²

Aplicabilidad de ensayos estáticos en Chile (15)

Ejemplo de aplicabilidad en Chile de ensayos estáticos de predicción. Predicción de generación de aguas ácidas en el botadero Los Juncos del Proyecto Fachinal.

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 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 Juncos 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 sondaje. 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 de caja. 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.

¹² Mayor información sobre Pruebas complementarias al ensayo BAB: (2) Manual MEND Prediction.

Los resultados del test fueron analizados bajo las siguientes reglas (5):

- 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 pirita (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 pirita 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).

3.1.1.3 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 (2, 5).

Para una mina nueva las pruebas cinéticas se llevan a cabo para (5):

- 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 (5):

- 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 (5):

- 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 anisotrópicas con respecto a las distribuciones de los tipos de mineral, tamaño de la partícula y condiciones hidrológicas. 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 (5).

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 flasks), 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.

3.1.1.4 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 (2, 22, 23):

- 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 subestima 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.

3.1.2 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 costosas y más lentas, representan la realidad del comportamiento del residuo en el ambiente y son esenciales en la interpretación de los resultados del laboratorio (2).

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 (2). El Cuadro 7 da algunos ejemplos de cubiertas comunes.¹³

¹³ Información adicional puede ser encontrada en Jambor y Blowes, 1994.

Cuadro 7.- Interpretación de cubiertas de oxidación

Descripción de la cubierta	Mineral o compuesto químico	Interpretación
Amarillo asociado con sulfuro de hierro	Jarosita	Productos de oxidación fuertemente ácidos
Anaranjado y café oscuro asociado con sulfuro de hierro	Limonita	Desgaste del ión azufre
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 piritita	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

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

Fuente: (2) MEND MANUAL VOLUME 3-PREDICTION MEND 5.4.2.c

Los métodos de campo pueden ser aplicados en relaves, pilas de residuos de roca y excavaciones de mina existentes expuestas a mineralización natural, tests en pilas de residuos de roca, comparación con otros sitios y medio-ambientes geológicos similares; y lavado de pared de las excavaciones (2). Una descripción de éstos, se encuentra en el anexo 3.

3.1.3 Modelación Matemática del Potencial de Generación de Acidez

Debido a las limitaciones prácticas de las pruebas estáticas y cinéticas, éstas proveen sólo una idea parcial del potencial de los residuos de mina para producir DAR. 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 (19).

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. Similarmente, el error de considerar las condiciones hidrogeoquímicas dentro de un botadero de residuos puede evitar la consideración de las reacciones de adsorción/precipitación involucrando metales, de ese modo es posible 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 (2).

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 (34), 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.¹⁴

3.1.3.1 Modelos empíricos

Los modelos empíricos están basados en relaciones estadísticas, como el análisis de la correlación y la regresión entre parámetros de interés, por ejemplo concentraciones de metales en el drenaje ácido y otras variables tales como el tiempo (2, 34).

Estos modelos, 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

¹⁴ Información adicional en: (2) MEND MANUAL Volume 3 – Prediction. MEND 5.4.2c.

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 consiguiente en el tiempo T, pueden ser estimadas (2).

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 (2, 34).

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 (2).

3.1.3.2 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 (2, 19, 34).

La propuesta de simulación permite a los usuarios examinar la potencial tasa de oxidación de sulfuro y la calidad de infiltración resultante durante periodos 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.

Los *modelos de equilibrio termodinámico* son modelos estáticos de una solución acuosa y pueden ser: MINTEQA2 (Allison et al.1991), PHREEQC (Parkhurst 1995) y WATEQ4F (Bell et al.1987). Los datos requeridos incluyen análisis de agua, temperatura y pH. Los modelos son utilizados para estimar la concentración (actividades) de especies acuosas, y resolver la distribución de elementos disueltos entre iones libres y complejos químicos (especiación). En la mayoría de los modelos geoquímicos, el cálculo de especiación de todos los elementos ingresados, es la primera etapa de modelación necesaria para facilitar todos los cálculos siguientes. Después del cálculo de las especies disueltas (especiación), estos modelos pueden calcular el nivel de saturación de cada especie, su tendencia a precipitar, y proveen índices de saturación (valores de IS). En la interpretación de los datos de IS (y especiación), hay que tomar en cuenta que el desequilibrio es común. Los modelos

geoquímicos indican los procesos favorecidos termodinámicamente, pero que no necesariamente ocurren (2, 19, 34).

Los usuarios del modelo, pueden estudiar el efecto de los cambios en temperatura o presión y dejar reaccionar a la solución con uno o más minerales. Estos modelos son bastantes flexibles y son ampliamente utilizados.

Similarmente, la consideración del flujo hidrológico dentro de la matriz de residuo, muestra que la tasa de liberación de productos de oxidación de pilas de residuos depende fuertemente de las características del flujo dentro de los residuos. Modelos más recientes han corroborado la propuesta que la geometría de los botaderos de residuos puede ser importante para las tasas de oxidación por influenciar la exposición del área superficial y las tasas de infiltración de aire.

A los caudales no saturados, es posible aplicar modelos hidrológicos para determinar el contenido volumétrico de agua en porcentaje (%) que tiene el botadero, pila de lixiviación o tranque de relave a distintas profundidades, condiciones promedio que tendrá en un largo período de tiempo (años), y el promedio de balance de agua anual (precipitación, escurrimiento, evaporación, cambio de almacenamiento y filtraciones). Estos modelos son: Soil Cover, HELP y Unsat 2 (2, 19).

Los *modelos de transferencia de masa* son modelos dinámicos de un sistema cerrado, y proveen predicciones de la composición del fluido durante el tiempo en que el sistema progresa hacia el equilibrio. Los datos requeridos incluyen composición del fluido, la masa y área superficial de los minerales. Los modelos justifican los cambios en la composición del fluido cuando los minerales reaccionan o se disuelven, y la formación o disolución de minerales secundarios. El balance de masa o modelación inversa es un aspecto de modelación geoquímica de alta importancia con respecto al estudio del DAR, y es una etapa clave en el diseño de sistemas de tratamiento. Involucra la identificación de las reacciones que controlan la evolución química del agua entre una fuente y un destino final.

La siguiente relación se puede entender como un balance de masa:

$$\text{Agua original} + \text{fases de reacción (p.e. disolución)} = \text{Agua final} + \text{productos (p.e. precipitado)}$$

Una modelación inversa exitosa necesita, sin embargo, un conocimiento del sistema y de los minerales que potencialmente controlan la química del agua a través de su precipitación y disolución. Esto es requerido para minimizar la cantidad de soluciones potencialmente posibles, predecidas por el modelo (19).

Un ejemplo de un modelo de transferencia de masa es :EQ3/6 (Wolery 1992), PATHARC.

Modelos de transferencia de masa asociados con modelos de flujo son modelos dinámicos de cualquier sistema abierto. Estos modelos pueden simular una variedad de procesos geoquímicos. Los datos requeridos incluyen, composición acuosa como una función de la mineralogía inicial, tasa de flujo, y cambios de temperatura durante el tiempo. Ellos consideran flujo, transporte de soluto, y transporte de calor. Este grupo de modelos representan un híbrido entre hidrología y geoquímica –algunos modelos enfocan la geoquímica y otros enfatizan la hidrología –. Estos modelos tienden a ser bastantes complejos, un factor que en algunos casos limita su aplicación. Algunos ejemplos de estos modelos son: MINTRAN (Frind y Molson 1994), PHREEQM (Appelo y Postma 1993), (2, 19, 34).

Otros modelos numéricos que predicen los niveles freáticos / piezométricos, caudales de flujo pasante de agua subterránea, caudales de descarga, tiempo de llegada de contaminantes o solutos en la zona saturada son: MODFLOW, SUTRA y MT3D, (2, 19, 34)

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 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 (17)

Evaluación y Gestión de Riesgo de Drenaje Ácido de rípios, 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 rípios, 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 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 rípios (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 rípios 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-H2.0).

A través de los resultados de estos métodos la probabilidad de generación de mala calidad de agua de rípios fue evaluada, junto con la probabilidad de ocurrencia de filtración. Los resultados de las pruebas geoquímicas demuestran que cualquier filtración proveniente del rípio 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 rípios 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.¹⁵

¹⁵ Fuente e información adicional : (17) "Evaluation and Management of Acid Drainage Risk from Spent Ore, El Abra Mine, Chile."

IV. 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.

La incorporación de la información recopilada en la identificación de riesgos, en una modelación de bloque y planificación minera permitirá el desarrollo de estrategias efectivas para manejar la oxidación de sulfuros en estos residuos.

El monitoreo.- Es importante, el monitoreo para evaluar la ejecución de estrategias de remediación y la evaluación de la efectividad del monitoreo.

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.

4.1 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 (5).

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, generalmente en planificación de minas nuevas y el control secundario y terciario se aplican después de la generación o liberación de contaminantes del drenaje ácido (Figura 13), generalmente para minas en operación o en cierre (5, 19).

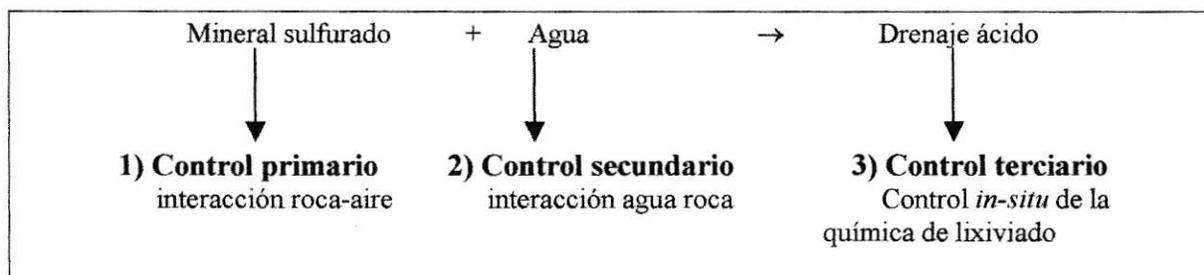


Figura 13.- Esquema de objetivos principales de las opciones de control.

Fuente: Esquema adaptado de (19).

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

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.

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

4.1.1 Control Primario

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 DAR.

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 Chile, el potencial del DAR no fue reconocido en un inicio, por lo que esta medida de control no podrá ser aplicada. Este tipo de control es factible de aplicar en el diseño y planificación de faenas mineras nuevas.

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

4.1.1.1 Cubiertas y sellos

Las cubiertas y sellos han sido desarrolladas y utilizadas para diversos propósitos, tales como: controlar la penetración del flujo de oxígeno (generalmente no es suficiente para evitar la oxidación), controlar la migración mediante la reducción de la infiltración, aumentar la evaporación y otros como: recuperación, revegetación, y control de polvo (2, 5, 19).

Este ítem sólo se referirá a las cubiertas y sellos para controlar la penetración del 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.¹⁶ 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. 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, como en el Norte de Chile, dado que las cubiertas y sellos contribuyen a inhibir la subsiguiente migración de contaminantes.

Aplicaciones

Un rango de capas secas tiene alto potencial para el control de la oxidación.

Limitaciones

- 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.
- Una de las preocupaciones a más largo plazo en relación con la integridad de las cubiertas está vinculada con la estabilidad física, que incluye: 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). En otros países, donde hay una alta frecuencia de precipitaciones, se ve afectada la estabilidad física de las cubiertas, pero en Chile, esto podría ser una buena opción, ya que las lluvias son poco frecuentes.

4.1.1.2 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 (1, 5).

¹⁶ 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 (1, 2, 5).

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 subterráneas¹⁷.

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

Los siguientes factores deberían ser considerados, en la aislación de residuos (1, 2, 5):

- 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 14, muestra cómo los residuos sulfurados pueden ser aislados dentro de una pila de residuos.

4.1.1.3 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_2PO_4) y acetato de sodio (NaAc) con peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La superficie de la pirita es oxidada por el peróxido para liberar óxidos de hierro, los cuales reaccionan con la

¹⁷ Esta técnica alternativa tiene varias ventajas. Información adicional en: (5) Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas. Capítulo IV Control.

solución fosfatada para formar un precipitado de fosfato de hierro (FePO_4) que precipita en la superficie formando la envoltura (1, 9).¹⁸

4.1.1.4 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 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 (1, 2, 5).

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.

¹⁸ 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).

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

La figura 14, muestra cómo los residuos sulfúricos pueden ser aislados dentro de una pila de residuos.

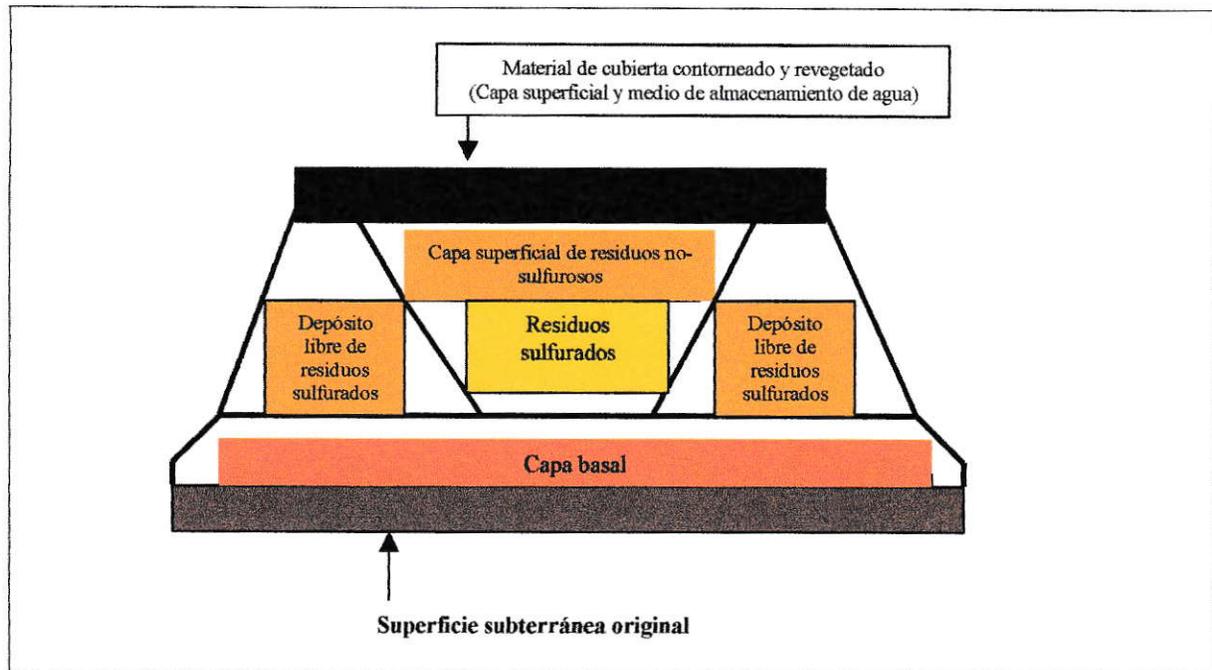


Figura 14. Esquema de estrategia de aislamiento dentro de una acumulación de residuo.

Fuente: Figura adaptada (1).

4.1.1.5 Inhibición de las bacterias

Ciertas bacterias son conocidas por aumentar enormemente la tasa de producción de acidez de 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 (19).

Se ha demostrado que el lauril sulfato de sodio y otros tensoactivos aniónicos son excelentes bactericidas para la *Acidithiobacillus 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 (37).

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 (37).

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.

Se debe destacar que las aguas del Norte de Chile tienen alto contenidos de cloruro, lo que genera una química completamente distinta a la de las aguas de otros países, e interesante de investigar.

4.1.1.6 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 (5).

Las formas de establecer una cubierta de agua es a través de (5):

- La acumulación en un cuerpo de agua existente; por ejemplo en un 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;
- La acumulación e inundación en una mina de tajo abierto o labores subterráneas;
- La 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 (5):

- El mantenimiento de una cubierta de agua (balance hidrológico). Es recomendable una cubierta de agua de al menos 0,5 m de agua permanente.
- El 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.
- Los contaminantes solubles. Se deberá considerar el potencial de disolución de contaminantes fácilmente solubles.
- El impacto ambiental. Se deberá evaluar el efecto de la descarga de relaves o de rocas de desechos en agua fresca o en ambientes marinos y 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 (4).

Aplicaciones

- Las cubiertas de agua son logradas 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.

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 cubierta 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 el ambiente del norte de Chile, las condiciones climáticas extremadamente secas y las altas tasas de evaporación prohíben el uso de métodos de inundación para tranques de relaves. 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.

4.1.1.7 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. Esta 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 (5).

El uso de un nivel freático elevado, 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.¹⁹ 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 buena opción.

4.1.2 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.

En muchos sitios mineros, el potencial del DAR no fue identificado antes de la operación, sino que después de la generación. En estos casos, 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.

¹⁹ Como técnica alternativa, se puede utilizar relaves de pasta o espesado, para reducir significativamente las existencias de relaves sulfurados disponibles para la oxidación.

4.1.2.1 Reducción de la 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 del 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 (2, 5).

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 (5).

El diseño de las cubiertas se basa en las características y el comportamiento de los minerales bajo condiciones no saturadas (19):

- Retención de humedad. Los materiales finos generalmente tienen valores más bajos de presión de poro (-vos), lo que muestra una pérdida de agua más lenta y más suave por cada incremento de presión negativa.
- Conductividad hidráulica o Presión de poro. Es la capacidad de transmitir agua de poro.
- Gradientes de capilaridad. La construcción de barreras capilares es un componente importante en el diseño de muchas capas secas.
- Transmisividad de oxígeno. A mayor porcentaje de saturación de la capa con agua, menor difusión de oxígeno (m^2/seg).

En el anexo 4 se describen materiales alternativos para cubiertas, su permeabilidad y sus ventajas y desventajas según Nolan, Davis and Associates, 1987.

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 período 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.

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) (5).

Aplicaciones

Las cubiertas secas naturales son potencialmente mejores en el control de la generación de drenaje ácido. 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 escorrentía).

Limitaciones

- El mayor problema de las cubiertas secas es la estabilización física, ya que 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.
- 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 15).

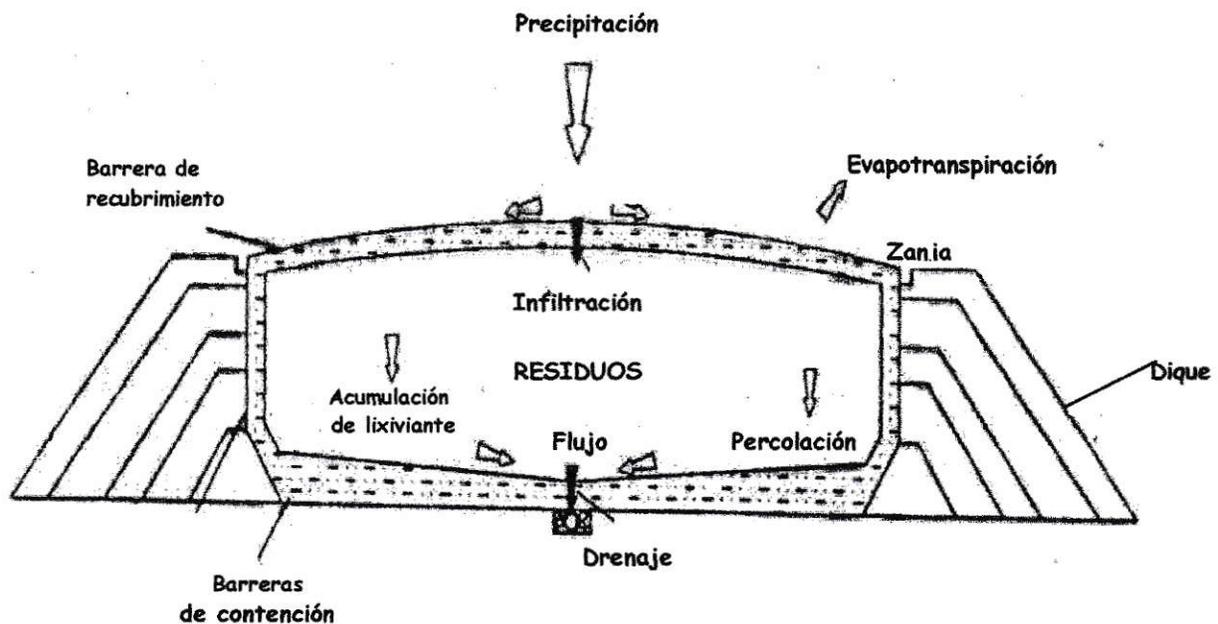


Figura 15.- Cubierta simple de suelo.
Fuente: (9) Armando Valenzuela. Cochilco.

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) (5, 9).

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, 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 torcreto, con un aditivo de humo de sílice y un refuerzo de fibra de polipropileno, puede ser efectivo para controlar las resquebrajaduras (5).²⁰

²⁰ Información adicional de las ventajas y limitaciones del torcreto en: (5) Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas. Capítulo IV Control.

Aplicaciones

- La colocación de materiales geosintéticos como capas impermeables, es una tecnología usada por años en aplicaciones como la lixiviación en pilas y relleno. 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 estabildades 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.
- Se desconoce la efectividad de las geomembranas en el largo plazo, porque sólo se han utilizado por 50 años.

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 (5).

La cubierta está constituida usualmente de una combinación de los siguientes componentes y materiales (Figura 16).

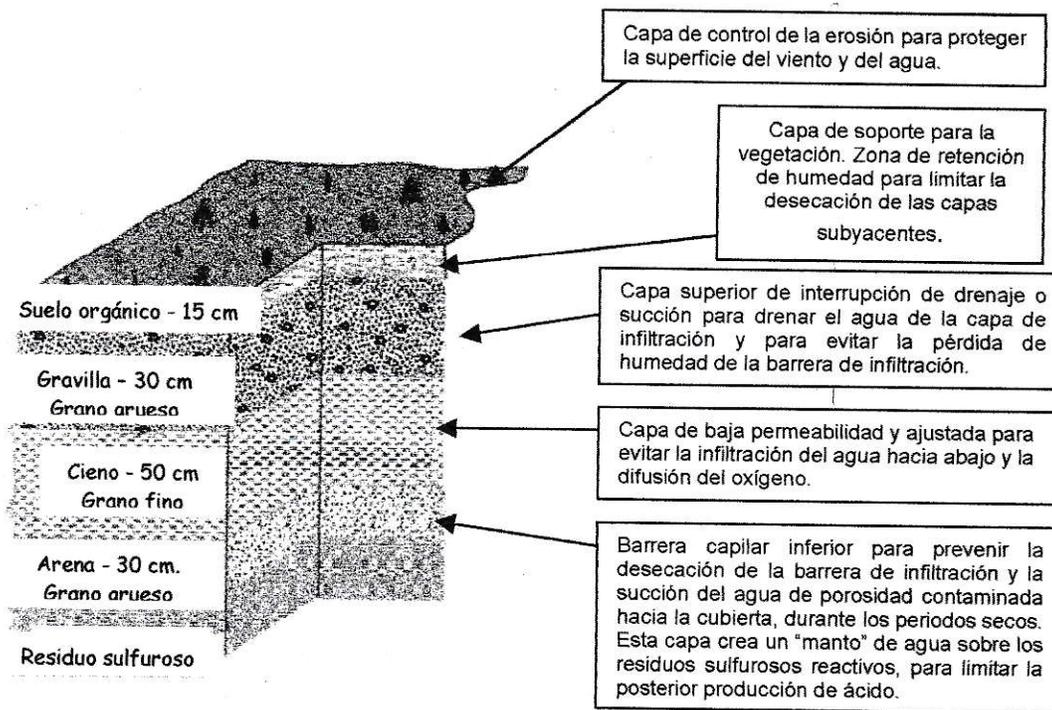


Figura 16.- Componentes y materiales de una cubierta compleja

Fuente: Figura adaptada de (5, 9, 19).

Las cubiertas complejas pueden 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 (5, 9, 19).

Aplicaciones

- 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.

Limitaciones

En el Norte de Chile, no sería muy adecuado el uso de cubiertas complejas, ya que la tasa de evaporación es muy alta.

4.1.2.2 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 (2, 5, 9).

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 intentado, aunque este 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 refinos, problemas de estabilidad, etc).

Limitaciones

Una de las limitaciones de este método es el alto costo para una exitosa aplicación.

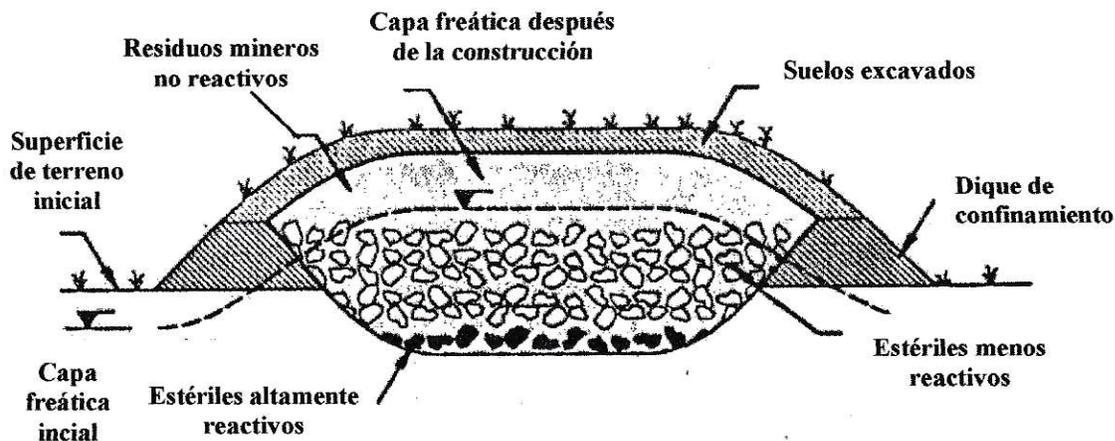


Figura 17.- Mezcla de estériles y residuos ácidos, donde la permeabilidad será más baja si hubiera sólo estériles.

Fuente: (9) Armando Valenzuela. Cochilco.

4.1.2.3 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 (5).

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.

4.1.2.4 Interceptación 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 (5).

La interceptación 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 interceptación de este sistema y, finalmente las alternativas técnicamente adecuadas para el control.²¹

4.1.3 Control Terciario: Recolección y Tratamiento

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 (5, 12).

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, 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 (12).

A medida que crece el nivel de obligaciones de un adecuado cierre y rehabilitación de un sitio minero, las consideraciones técnicas y financieras por mantener a perpetuidad una

²¹ Las técnicas de interceptación de agua subterránea son: Colocación selectiva, Paredes de Pulpa, Cortinas de inyecciones, Zanjales profundas para drenaje y Perforaciones o excavaciones con descarga de bombeo controlada.

planta de tratamiento químico han aumentado el interés por desarrollar opciones efectivas de tratamiento pasivo (5, 12).

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

4.1.3.1 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 (5).

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.

4.1.3.2 Tratamiento Activo

El tratamiento activo del drenaje ácido involucra la adición sistemática de químicos para la neutralización de la acidez y/o la atenuación de los metales. Este método, es una tecnología ampliamente conocida y aceptada. Las principales operaciones unitarias en una planta de tratamiento químico del DAR, se presentan en el siguiente diagrama de flujos.

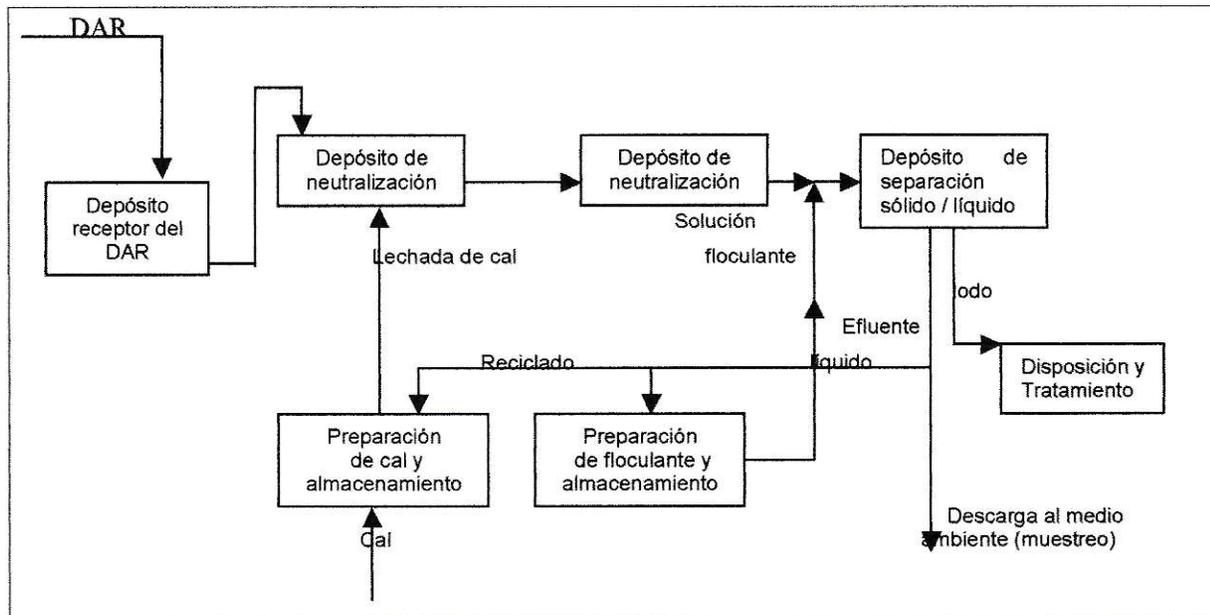


Figura 18. Diagrama del Proceso convencional de Tratamiento activo de drenaje ácido.

Fuente: Diagrama adaptado de (2, 12, 21).

A continuación se describen los tres tipos principales de tratamiento activo del drenaje ácido.

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 (5):

- La acidez - por neutralización. Ejm: $H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$

cal apagada yeso

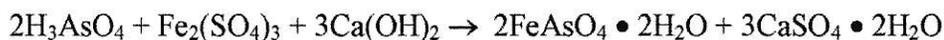
- Los metales pesados – por hidrólisis y precipitación.

Ejm: Precipitación como hidróxido: $CuSO_4 + Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow Cu(OH)_2 + CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Precipitación como sulfuro: $CuSO_4 + NaHS \rightarrow CuS + NaSHO_4$

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

Ejm: 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 de metal residual en equilibrio, que es función del pH final. Estas concentraciones de iones metálicos en el efluente final pueden ser predecidas de los diagramas de equilibrio de solubilidad ión metal-hidróxido.²² Sin embargo, se debe tener en mente que la coprecipitación y la superficie de adsorción puede llegar a bajar las concentraciones residuales predecidas y por otro lado la cinética de las reacciones de neutralización y la presencia de precipitados coloidales o amorfos pueden resultar en concentraciones residuales más altas que las predecidas (5, 12, 21).²³

Otros agentes neutralizantes incluyen relaves de plantas consumidoras de ácido, soda cáustica, ceniza de soda (carbonato de sodio), y otros, dependiendo de la disponibilidad local y

²² Información adicional: Stumm and Morgan, 1981.

²³ Información adicional: (12) S.H.Castro, M.A.Sánchez and F.Vergara. EFFLUENT TREATMENT IN THE MINING INDUSTRY.

las condiciones específicas del sitio. Los residuos alcalinos industriales pueden también ser aplicados beneficiosamente en muchos casos (5, 12, 21). En el anexo 7, se presenta un cuadro comparativo de los principales neutralizantes para efluentes ácidos, sus principales características, ventajas y limitaciones (21).

b) Disposición y tratamiento de lodos

La simple neutralización generalmente da como resultado la producción de un lodo de baja 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 (5, 12).

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 (5, 12).

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 de Recuperación de Metales en Chile (22).

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: 170L/seg), o en serie (flujo de: 250L/seg); para producir cátodos de 99,9% Cu. La inversión total de este proyecto en el año 1984 fue de 17.350 KUSD\$.

El proceso de captación y conducción de las aguas ácidas hacia la planta de tratamiento se puede entender a través del siguiente esquema (Figura 19), y a través de las siguientes fotos (figura 20, 21, 22, 23, 24 y 25).

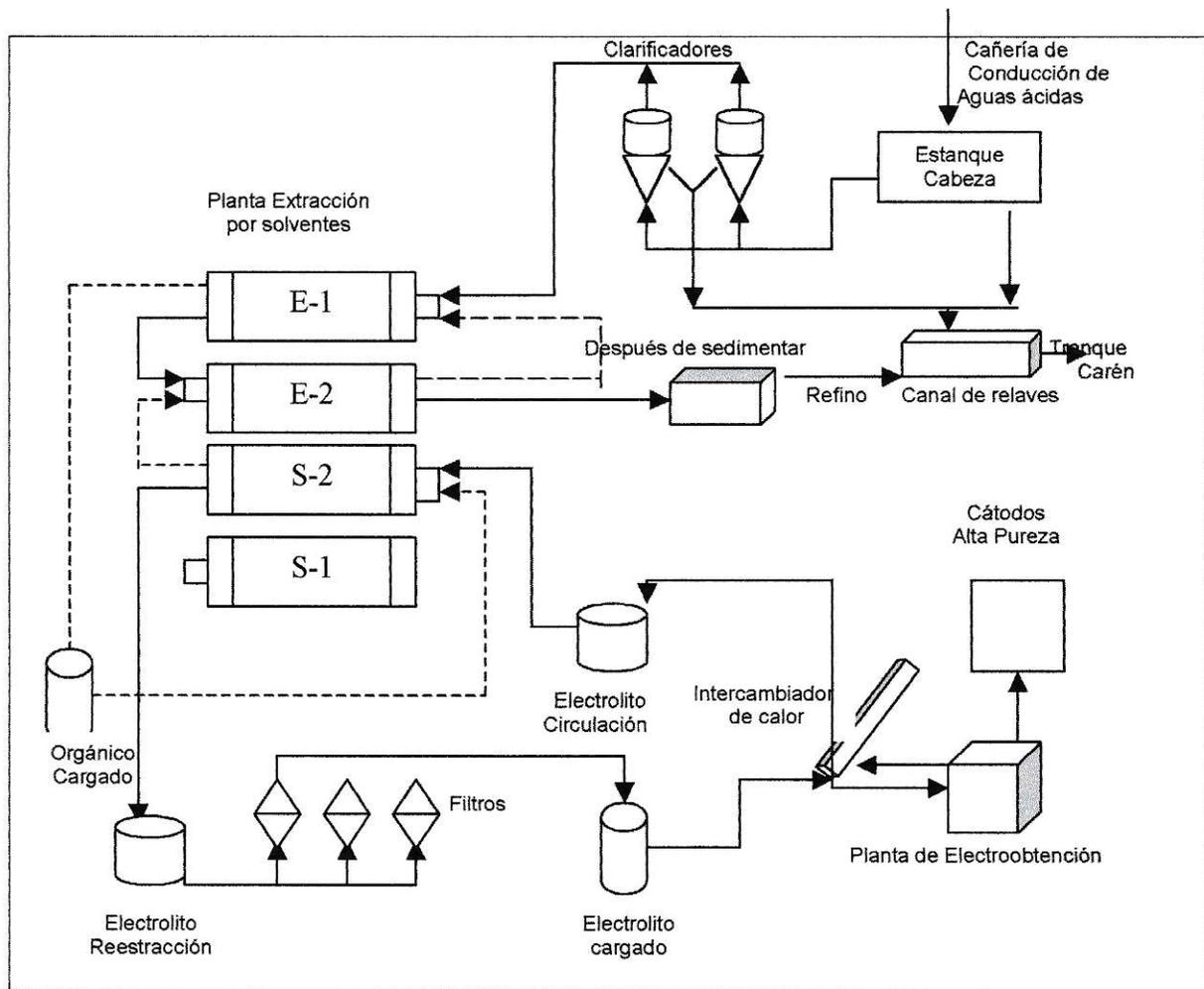


Figura 19. Esquema de la Planta Cu Sx-Ew
 Fuente: Diagrama adaptado (22).



Figura 20. Cuneta de captación

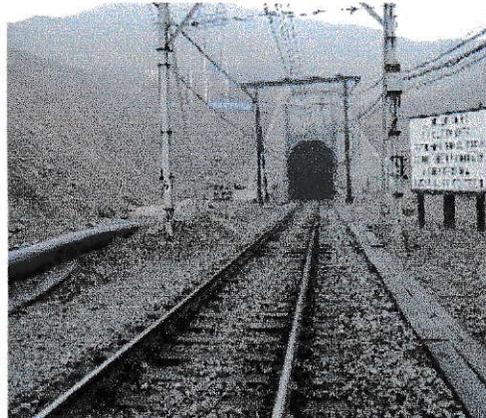


Figura 21. Cañería conducción exterior



Figura 22. Estanque cabeza Planta Cu Sx-Ew



Figura 23. Planta Cu Sx-Ew

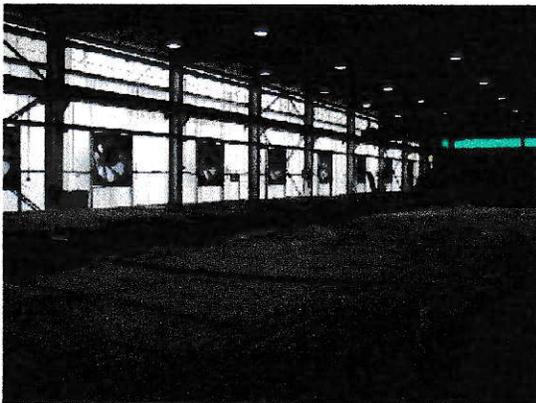


Figura 24. Nave de electro-obtención

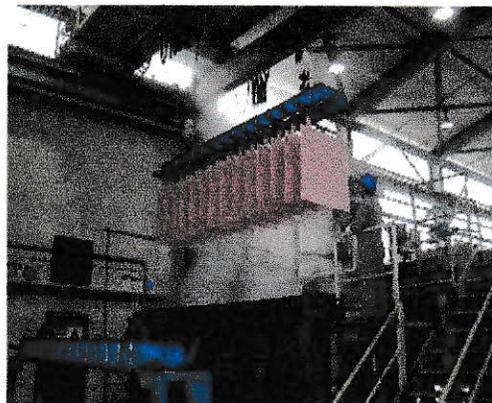


Figura 25. Cosecha de cátodos

Fuente: (22) Ministerio de Minería- SIGA Consultores. SEMINARIO DRENAJE ÁCIDO EN FAENAS MINERAS.

4.1.3.3 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 (2, 5, 12, 28).

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

Aplicaciones

Pueden ser utilizados durante la operación de la mina, como también después del cierre. Sin embargo, es frecuentemente difícil un tratamiento pasivo durante la operación de la mina.

Limitaciones

- Estos sistemas son sólo efectivos para flujos bajos, y han sido efectivos con pequeñas fuentes puntuales, tales como infiltración. La aplicación a gran escala como un reemplazo de los métodos de tratamiento por neutralización tradicional, aún no es viable.
- A alturas superiores a 3000 m, el tratamiento pasivo, sería una buena opción, pero el problema es que requieren de un área extensa y plana.

Algunos tipos de tratamiento pasivo son:

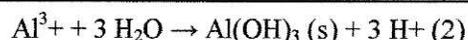
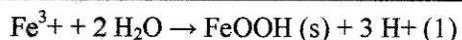
a) Canal de caliza anóxico (CCA)

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 (Figura 26). 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 y la formación de un agua clara (1, 2, 19,

Este canal está dimensionado basado en la presunción que el canal producirá agua con alcalinidad entre 275 a 300 mg/L (equivalente a CaCO₃). Esta alcalinidad generada está basada en la solubilidad de la calcita dentro de la caliza y el tiempo de retención dentro del canal (14 a 15 horas), el cual es utilizado como práctica estándar para el balance de los costos de producción y la eficiencia de generación de alcalinidad.

También, la efectividad y la longevidad del canal pueden ser substancialmente reducidas si el drenaje ácido tiene concentraciones de hierro férrico, oxígeno disuelto o aluminio sobre 1 mg/L, ya que importantes concentraciones de Al o Fe⁺³ en la descarga pueden causar una obstrucción en el canal con hidróxidos de metal, tales como FeOOH (1) y Al(OH)₃ (2), una vez que es alcanzado un pH superior o igual a 4,5. Tanto la precipitación de FeOOH como de Al(OH)₃ generan acidez.



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.²⁴

²⁴ Información adicional sobre el diseño y el tamaño del CCA: Hedin and Watzlaf (1994), Hedin and others, 1994 a y en (28) "Passive Treatment of Acid-Mine Drainage with Vertical Flow System".

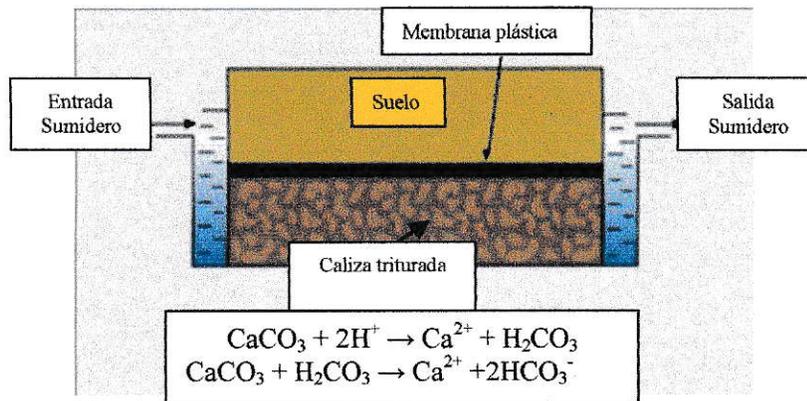


Figura 26.- Sección transversal a través de un canal de caliza anódico.

Fuente: (1)Managing sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage.

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 generación de pequeñas cantidades de alcalinidad.

Estos sistemas pueden ser contruidos, 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 $\text{Fe}(\text{CO}_3)$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 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 27).

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 aneróbica 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.²⁵

²⁵ Mayor información sobre Sistemas de Flujo Vertical: (28) Passive Treatment of Acid-Mine Drainage with Vertical Flow System.

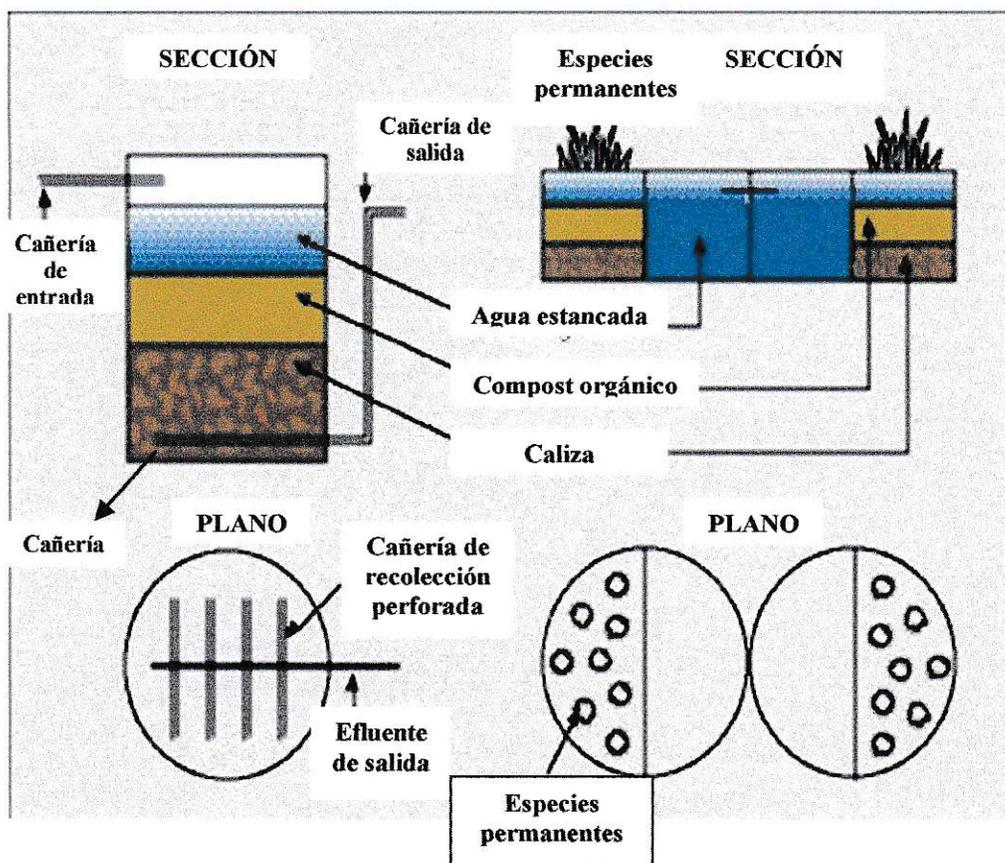


Figura 27.- Sistema de flujo vertical

Fuente: (1)Managing sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage, 1997.

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, en 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 es utilizada el tipo de vegetación *Typha latifolia* (cattails). 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.

Limitaciones

Las limitaciones para el establecimiento de pantanos incluyen las 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 28), son sistemas de flujo superficial utilizados efectivamente para el tratamiento de aguas alcalinas netas o pre-tratadas a través de un canal de caliza anóxico. Debido a esto, sirven únicamente para el tratamiento de aguas que contienen las especies de hierro, aluminio y manganeso en forma reducidas.

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. Consta 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 contiene agua a un flujo de profundidad relativamente superficial (10-50 cm) sobre la superficie del suelo. Se caracteriza por una razón alta de superficie/volumen para maximizar la difusión de oxígeno.

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/m² día.

Si fueran aplicados en el norte de Chile, tendrían como ventaja la alta tasa de evaporación de esta zona.

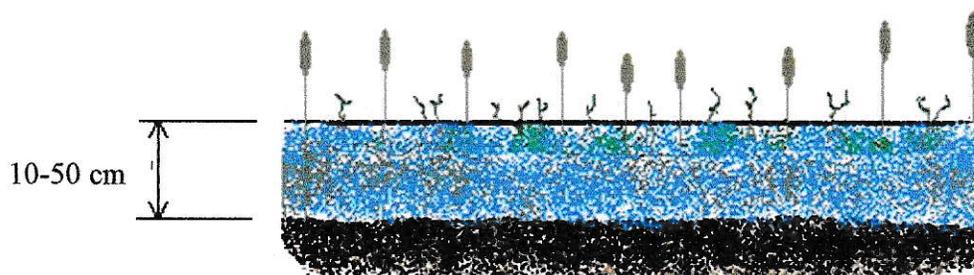
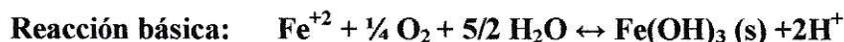


Figura 28. Sección característica de un pantano aeróbico.

Fuente: (29) Department of Environmental Protection, Pennsylvania.

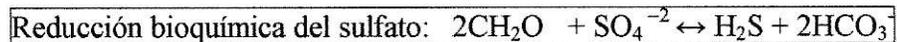


Los **pantanos anaeróbicos (Figura 29)**, son caracterizados por un flujo sub-superficial y son adecuados para el tratamiento de aguas de mina con altos niveles de oxígeno disuelto, Fe⁺³, metales (Me⁺²) y pH más bajo, tales como aguas provenientes de un canal de caliza anóxico o de minas subterráneas.

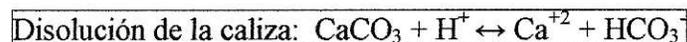
En forma son similares a los pantanos aeróbicos, pero contienen una delgada capa de substrato orgánico. Este substrato promueve los procesos químicos y microbiológicos que generan alcalinidad y llevan a cabo la reducción del sulfato. Los metales no se oxidan, sino que se precipitan en sulfuros o se complejan en el substrato.

Los materiales típicos que son utilizados como substratos 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.



Otro proceso crítico en la neutralización de aguas con acidez neta es la disolución de caliza.



En lugar del voluminoso lodo de hidróxido férrico, el precipitado de sulfuro de hierro es más denso y se forma dentro del substrato. Los sulfuros serán estables por el tiempo dentro del substrato, 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.

Estos pantanos, deben ser saturados y mojados permanentemente, por lo que tienen mayor aplicabilidad a mayores alturas (>2.500 m).

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.

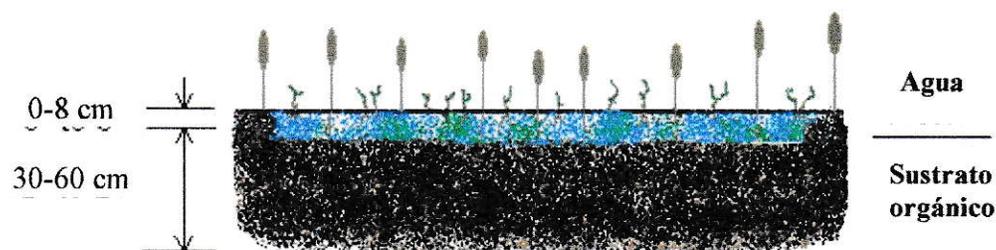


Figura 29. Sección característica de un pantano anaeróbico.
Fuente: (29) Department of Environmental Protection, Pennsylvania.

El siguiente diagrama de flujos (Figura 30), ilustra un proceso de decisión para seleccionar el sistema de tratamiento pasivo más adecuado para una descarga dada.

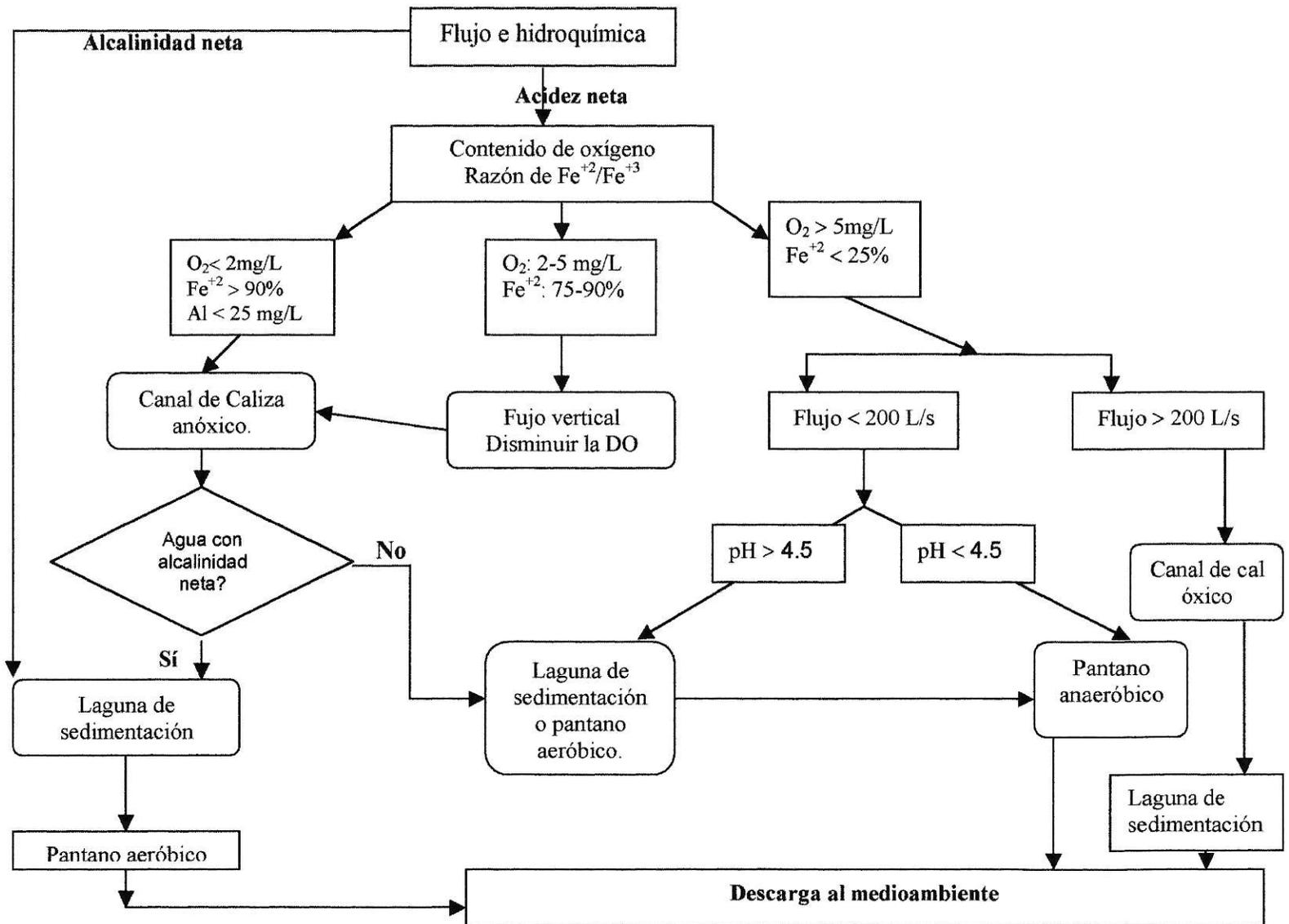


Figura 30. Árbol de decisiones para seleccionar métodos de tratamiento pasivos.

Fuente : Diagrama adaptado de (2, 19, 28)

4.1.3.4 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 características específicas para el monitoreo del DAR que deben tomarse en cuenta 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 carbonados 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_4). 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:

- 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.

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 (2, 5).

V. CONSIDERACIONES PARA EL CIERRE DE FAENA MINERA

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 (14).

En el contexto nacional, aunque 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 existe una proposición de proyecto de ley, apoyado con estudios técnicos y económicos sobre el cierre de faenas mineras en Chile. La última versión borrador divulgada de este trabajo fue coordinada por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) y contó con la participación de los sectores involucrados de la industria y gobierno. Actualmente, una revisión de los aspectos técnicos de esta iniciativa se encuentra en elaboración por el grupo Servicios Públicos-Consejo Minero “Cierre de Minas” dentro el contexto del AMPL.²⁶ 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.

²⁶ Información adicional en: (14) CIERRE DE FAENAS MINERAS EN CHILE. Propuesta de legislación, Institucionalidad y Opciones técnicas.

5.1 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 ripios 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).²⁷
- 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 ó ripios de lixiviación según el caso. Su ubicación con respecto a cuerpos de agua receptores o con capacidad para transportar contaminantes es importante.

Algunas consideraciones a tener presente en la evaluación del riesgo de generación de drenaje ácido en estas instalaciones se presentan en el siguiente cuadro (Cuadro 8).

²⁷ Eventos extremos pueden ser consultados en la Dirección General de Aguas (DGA).

Cuadro 8. Consideraciones generales en la evaluación del riesgo de generación de drenaje ácido en instalaciones mineras.

Instalaciones mineras	Consideraciones generales
Rajos abiertos y canteras	<p>El operador debería evaluar el potencial de que el mineral residual expuesto en los rajos y canteras sea afectado por las condiciones climáticas de la zona de emplazamiento de manera que en el futuro pudiera desencadenar el proceso de generación de aguas ácidas o de la disolución de los contaminantes y de esta manera el riesgo de contaminación de cuerpos de agua, ya sea superficiales o subterráneas (14).</p> <p>El Plan de Cierre debería evaluar este riesgo y considerar acciones para minimizarlo.</p>
Labores subterráneas	<p>El operador debería evaluar el potencial de que el mineral residual expuesto en las labores subterráneas sea afectado por la circulación del agua subterránea que se infiltra a través de las fracturas del macizo rocoso y que en el futuro pudieran desencadenar el proceso de generación de aguas ácidas o la disolución de contaminantes y de esta manera el riesgo de contaminación de cuerpos de agua, ya sea superficial o subterráneos (14).</p> <p>El Plan de Cierre debería evaluar este riesgo y considerar acciones para minimizarlo.</p>
Depósitos de relaves, botaderos y rípios	<p>El operador debería evaluar la estabilidad química de los depósitos de relaves, botaderos y rípios de lixiviación. En el caso de que exista potencial de generación de aguas ácidas, debería considerar las medidas de mitigación necesarias para que el escurrimiento y la infiltración de aguas no afecten de manera significativa la calidad de los cuerpos de agua ubicados en el entorno (14).</p> <p>En el caso de considerar la colocación de una cubierta sobre los depósitos, debería asegurarse que el espesor y el material de recubrimiento sea el adecuado para los efectos proyectados. Entre otros aspectos, debería evaluarse la velocidad de escurrimiento de la escorrentía sobre estos depósitos de materiales, para evitar que se genere algún nivel de arrastre que pudiera dejar expuestos los relaves o rípios, o que éstos pudieran ser arrastrados y movilizados hacia receptores aguas abajo. Generalmente, para estos efectos se considera la Crecida Máxima Probable, estimada para el lugar de emplazamiento de las obras. El Plan de Cierre debería evaluar este riesgo y considerar acciones para minimizarlo (14).</p>

5.2 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 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 desechos y depósitos de materiales como relaves, lastre, rípios de lixiviación, y similares de gran volumen. 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 (5).

Para cada uno de estos componentes, se deben considerar los siguientes criterios (5):

- 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.

En un análisis de viabilidad de técnicas de prevención y control de drenaje ácido²⁸, la única opción que sobrevivió fue el tratamiento de efluentes ácidos por neutralización, por su bajo costo en comparación con las otras técnicas (21). 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 (5, 21).
- **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.

Un ejemplo de cuidado pasivo podría ser la técnica de hermetización de galerías, que aún está sujeta a estudio, y que consiste en colocar un tapón en las galerías o túneles de la mina, para inmovilizar y sellar el agua y aire. De esta manera, se evita la salida de las aguas residuales de la mina y por ende el origen de la contaminación. Esta técnica podría ser aplicable en algunos casos. Cuando las labores se llenan de agua, ya no habrá oxígeno en contacto con los minerales, por lo tanto no se generará agua ácida. Sin embargo hay varios casos de minas abandonadas en Chile donde la calidad de la roca no permite embalsar las aguas debido al alto grado de meteorización y de infiltración. En tal caso, aunque se coloque un tapón en las galerías, el agua no inundaría todas las labores, por lo que no sería una medida efectiva, además es muy costosa. Se están 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 ripios para obstruir las fisuras (5, 21).²⁹

²⁸ (21) Curso Interno: Medio Ambiente y Minería. Tratamiento de Aguas Ácidas.

²⁹ Información adicional en: (21) “Técnicas para Medidas contra la Contaminación Minera”.

- 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.

En el caso de la Mina de Ashio (de cobre), que se reconoce como el “Primer caso de contaminación pública” en Japón, se adopta el método de neutralización con cal. El agua cruda de entrada a la planta tiene un pH de 2,7 y se ajusta con una lechada de cal a un pH de 8-9, para luego ser descargada al río Watarase. En el caso de la Mina Matsuo (de azufre), el enorme caudal de agua ácida se descargaba al río Aka, causando un gran problema de contaminación por acidez y metales como hierro y arsénico. Para solucionar este problema se construyó una planta de tratamiento por neutralización, utilizando el método de neutralización con bacteria de hierro y carbonato de calcio.³⁰

En Chile, este tipo de tratamiento, para minas cerradas no es factible económicamente ya que nadie se hace responsable de financiar este tratamiento.

5.3 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

³⁰ Información adicional en: Masayuki Yamada. “Manejo de Descarga de Aguas de Minas Abandonadas”. Ministerio de Comercio Exterior e Industria. Departamento de Vigilancia de Seguridad de Minas de Kyush. Sección de Prevención de la Contaminación de Minas de Carbón.

aprovechamiento de la cuenca para el uso público 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. 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.

VI. 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 (5):

- 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 (5).

Generalmente los costos dependen de una diversidad de factores (Figura 21), 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.³¹

Entre los diversos factores que inciden en el costo de una alternativa de control, debe tenerse presente que las siguientes operaciones normalmente implican un aumento de los costos:

- Recolección y análisis de muestras que requiere de personal adicional.
- Monitoreo riguroso del carguío y disposición del lastre, que requiera de sistemas operacionales especiales.
- Necesidad de contar con sitios segregados para la disposición de lastre de diferentes calidades.
- Cantidad relativa de residuos de roca.
- Distancias de transporte.
- Facilidad de co-disposición.
- Los requerimientos para co-mezclado.

³¹ Para mayor información sobre este estudio, consultar en el Ministerio de Minería.

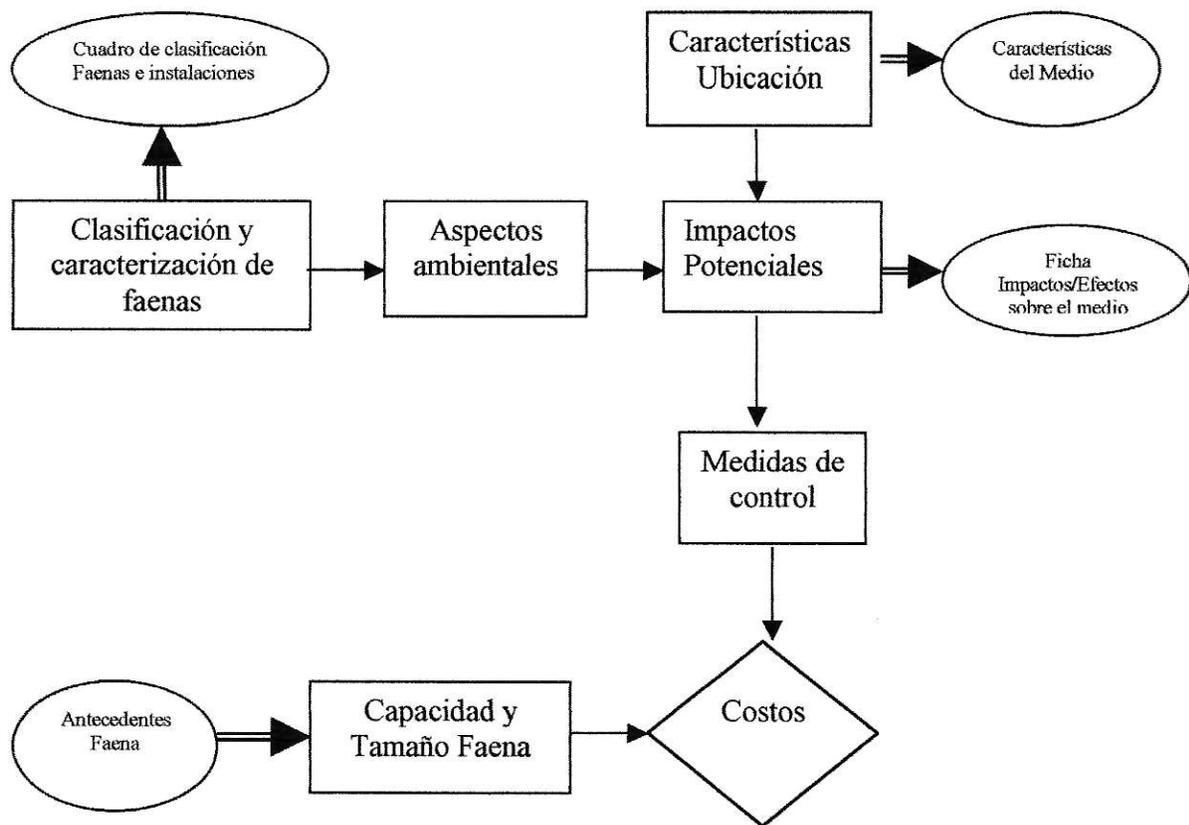


Figura 31.- Factores a considerar para estimar el costo de una medida de control

Fuente: Figura adaptada de : Ministerio de Minería. “Análisis de Planes de Cierre de Faenas Mineras”.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La minería es el uso temporal de tierra para recuperar recursos para el beneficio de la comunidad. Este beneficio puede ser contrarrestado substancialmente si la mala gestión da como resultado la degradación a largo plazo del área explotada y del medio ambiente que la rodea, en este caso, por efectos del drenaje ácido de mina.

El drenaje ácido es considerado generalmente como el peor problema ambiental asociado con la minería, ya que da como resultado la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos. Actualmente, 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 éste sea ponderado adecuadamente en Chile, sobre la base de un conocimiento científico sólido. En el caso de Canadá se ha estimado una pérdida de C\$2-5 billones; en Australia una pérdida de A\$60M/año; en Estados Unidos fueron afectados adversamente 20.000 Km de riachuelos y ríos. Además, se ha estimado una duración del fenómeno que puede variar de decenas a miles de años.

En el caso de Chile, no existe una mayor conciencia de la escala espacial y temporal de este fenómeno, pero sería un tema interesante de investigar. Debido a esto, hoy en día, no se aplica ninguna metodología sistemática de control de drenaje ácido en las faenas mineras en Chile. La primera iniciativa importante emprendida por Chile en el tema del drenaje ácido fue, el 27 de Noviembre del 2000, la firma de un Acuerdo Marco de Producción Limpia (AMPL), entre los organismos públicos con competencia ambiental coordinados por la Subsecretaría de Minería y el Consejo Minero A.G., que agrupa a las principales empresas del sector de la gran minería, con el compromiso de estudiar seis temas de interés común, entre ellos el “Potencial Generador de Aguas Ácidas en Chile”.

Como producto de este estudio, se propuso la meta de elaborar un Manual de Buenas Prácticas: “Manual de Consulta. Drenaje Ácido en la Industria Minera Chilena”, con el fin de disponer de una herramienta que contenga toda la información necesaria para entender, predecir y modelar la generación del drenaje ácido en el tiempo y para el manejo adecuado de los residuos sulfurados, que resuma el “Know-how” tecnológico respecto al control de la generación, transporte y posibles efectos del drenaje ácido. Este manual será publicado en Octubre del presente año.

Previo a la realización de este estudio y la consiguiente elaboración del Manual de Consulta: Drenaje Ácido de Roca en la Industria Minera Chilena, no se contaba con ningún documento guía en el manejo de residuos potencialmente generadores de ácido, que considere los distintos factores que influyen en el drenaje ácido en Chile.

La “Guía Metodológica de Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Ácido de Minas”, del Ministerio de Minería, desarrollada en 2.001 por SIGA Consultores Ltda., incluye un sistema regional de análisis de riesgo, que hace muchas generalizaciones que puede llevar a grandes errores, ya que si bien considera los dos factores más importantes en la generación del DAR (minerales sulfurados y nivel de precipitaciones), no constituye un sistema totalmente diagnóstico, porque no incluye los demás factores geológicos e hidrológicos que influyen directamente en la generación de drenaje ácido y que se mencionan en el capítulo III del presente estudio. Además, no considera el potencial de neutralización ni de las aguas superficiales ni de las aguas subterráneas. Debido a esto, no se considera suficientemente representativas las zonas geográficas de riesgo de producción de drenaje ácido definidas en ese estudio.

Se espera que el Manual de Consulta, llene los vacíos y debilidades de la guía anterior, en cuanto a las herramientas necesarias para predecir, controlar y/o tratar el problema de drenaje ácido en Chile.

La mejor práctica de gestión ambiental puede requerir la implementación de una serie de medidas específicas basadas en las condiciones locales y los recursos disponibles para minimizar el riesgo de impacto ambiental del drenaje ácido. La estrategia de gestión más efectiva requerirá un entendimiento completo de los factores que contribuyen a la formación del drenaje ácido, las características específicas de los materiales de residuo a tratar, y la serie de estrategias disponibles para controlar y/o tratar el drenaje ácido, donde el control efectivo no sea alcanzable. Se debe tener en cuenta, que las faenas mineras a lo largo de Chile, están localizadas en distintas áreas geográficas, que presentan una gran variedad de climas y condiciones geológicas/mineralógicas, 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 su generación, transporte y posibles impactos en el medioambiente.

A modo de resumen, los factores hidrológicos, geológicos, y mineros característicos del norte de Chile, que influyen directamente en la generación, transporte y posibles impactos del drenaje ácido en el medio ambiente son:

Factores hidrológicos: Aproximadamente el período de retorno de la precipitación necesaria para saturar los residuos de mina, es de 10 años. La baja disponibilidad de agua a lo largo del año en la zona norte, lleva a una generación de drenaje ácido en Chile de forma infrecuente, lo que explica la poca cantidad de recursos por parte de las compañías mineras destinados a controlar este fenómeno. Durante los primeros días de lluvia la calidad del agua es muy mala, porque la lluvia provoca un proceso de lixiviación de contaminantes solubles, que pueden haber estado acumulados durante mucho tiempo.

Estos eventos de generación de drenaje ácido tan agudos, pueden afectar mucho más a la minería, ya que los efectos sobre la flora y la fauna pueden llegar a ser fatales. Además si el agua infiltra en un acuífero, y éste tiene un tiempo de residencia de 100 años, puede quedar contaminado por mucho tiempo.

Por otro lado, en el Norte de Chile las aguas presentan altas concentraciones de cloruros, lo que genera una química del drenaje ácido completamente distinta e interesante de investigar.

Factores geológicos: En el Norte de Chile, los residuos mineros son secos, el proceso de meteorización es más lento y hay acumulación de sulfatos, específicamente en los tranques de relaves. Esta acumulación de sulfatos, es generalmente debida a acidez almacenada.

Factores mineros: Los yacimientos mineros están ubicados a gran altura y en terrenos montañosos, lo que afecta el establecimiento de medidas de control pasivo, ya que éstas necesitan grandes extensiones de terreno plano.

Donde el riesgo de impacto significativo es alto, la necesidad de una estrategia de remediación posterior de alto costo puede ser reducida por la incorporación de medidas de control primario o prevención en los sistemas de gestión ambiental durante la planificación y el desarrollo minero. Sin embargo, en Chile en la mayoría de los casos el drenaje ácido ya está tomando lugar activamente, por lo que deben de ser aplicadas técnicas de control secundario o

terciario, que incluyen tecnologías de contención y/o tratamiento. El método de control secundario potencialmente más aplicable en Chile sería las cubiertas simples. Éstas, pueden presentar problemas de estabilidad física, pero la baja frecuencia de lluvias en el Norte de Chile, ayuda a la estabilidad de las cubiertas, al contrario que en otros países donde la frecuencia de lluvias es alta.

Es importante tener en cuenta la posibilidad de generación de drenaje ácido desde las primeras etapas de planificación. En las primeras etapas de planificación, las medidas de control primario son las más aplicables, y en las etapas del cierre de faena, las medidas de tratamiento pasivo son las más adecuadas, debido a que no requiere mantención y los costos no son inviables.

El paso inicial en controlar la oxidación de sulfuro es la temprana caracterización de los materiales (productores de ácido) de más alto riesgo, y de los materiales con potencial para uso en medidas de remediación. Debería ser desarrollado, actualizado y perfeccionado un inventario, para caracterizar y cuantificar adecuadamente los residuos mineros a través de la vida de la mina. La incorporación posterior de esta información en un modelo de bloque y planificación minera, permitirá el desarrollo de estrategias efectivas para manejar la oxidación de sulfuro en estos residuos. Esta práctica es adecuada en la planificación de la mina.

Actualmente en Chile, para caracterizar los residuos por su potencial de generación de drenaje ácido, se utiliza generalmente el ensayo estático Balance Ácido Base y/o pH Pasta, porque básicamente es un método apropiado para determinar la capacidad total de producción de acidez, es fácil de interpretar y permite comparar los resultados con resultados obtenidos en otras partes del mundo. El Balance Ácido Base debería continuar a través de todas las fases de desarrollo y evaluación del proyecto. Además, generalmente se combina con el uso de la prueba de toxicidad SPLP, que dura 24 horas e indica cualitativamente el potencial de lixiviar metales.

Pese a que son más caros, y demorosos, se recomienda aplicar en los casos chilenos, ensayos cinéticos, para estimar la tasa de oxidación, el potencial de las cargas de productos de oxidación, y la concentraciones de metal en cualquier drenaje ácido proveniente de estos materiales. Además, se recomienda desarrollar un protocolo de muestreo, ya que es un factor crítico para asegurar que los riesgos son cuantificados con un alto nivel de confianza.

Como recomendación, se sugiere a las compañías mineras en Chile emplear mayor cantidad de recursos en la investigación y el desarrollo asociado al drenaje ácido. Específicamente deben partir haciendo un gran esfuerzo en el diagnóstico y en la identificación de los problemas de drenaje ácido existentes.

La necesidad de sistematizar la prevención y el control de los riesgos asociados a la generación del drenaje ácido, lleva al cumplimiento de las normativas aplicables al problema. La normativa que se aplica en el control y fiscalización de la descarga de drenaje ácido al medio ambiente, es el Decreto N°90, que establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

Por otro lado, pese a que los residuos mineros masivos no son considerados como peligrosos, según el Artículo 22 del Reglamento sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos, es aplicable la siguiente exclusión: *“No obstante, la Autoridad Sanitaria podrá, en casos calificados, requerir de un generador, la caracterización de sus residuos mineros masivos. La Autoridad Sanitaria podrá en todo caso muestrear, analizar y caracterizar la peligrosidad de dichos residuos toda vez que lo estime oportuno. Para la caracterización de la toxicidad extrínseca de los residuos masivos mineros, se utilizará el método de Lixiviación por Precipitación Sintética”* (26). Este reglamento no ha sido aún publicado en el diario oficial, pero a futuro, se espera que la exclusión anterior sea apoyada por una regulación específica para este tipo de residuos.

Finalmente, la Gran Minería tiene una enorme influencia en la economía chilena. Las más importantes compañías mineras del mundo desarrollan actividades productivas en Chile. Esto explica la tendencia actual de la minería chilena a incorporar acciones y reflexiones sobre sustentabilidad -económica, ambiental y social-, antes que otros sectores y en mayor profundidad. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el precio del cobre ha bajado en este último tiempo, lo que puede influir tanto en la baja inversión de recursos en tecnologías de predicción, control y/o tratamiento de drenaje ácido, como en constantes cambios en la planificación de las operaciones mineras, lo que a su vez afectaría a la aplicación de tecnologías de tratamiento pasivo en la etapa de operación que son las más recomendadas en cuanto a costos.

VIII. GLOSARIO³²

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/óxico	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/anóxico	Medio ambiente sin oxígeno libre.
Análisis del pH en pasta	El pH de la solución creado cuando una muestra pulverizada es mezclada con agua destilada/desionizada. Se realiza como parte del Balance Ácido Base.
Anisótropo,a	Dícese de los cuerpos y objetos en los que las propiedades difieren según la dirección considerada.
Antropogénico	Formado o influenciado por el hombre.
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.
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.

³² Fuente: (32) The International Network on Acid Prevention (INAP).

Azufre total	Todo el azufre contenido en una muestra, en sus distintas formas.
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.
Contaminante nocivo	Especies contaminantes que causan una reducción en la calidad o rendimiento. Los contaminantes nocivos pueden hacer algo tóxico o de otra manera no apto para el uso. Los contaminantes más importantes en la lixiviación de metal y drenaje ácido de roca son elementos metálicos y metaloides, que están a menudo frecuentes en grandes cantidades para tener un efecto nocivo en la flora y fauna.
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.
Ecossistemas	Una comunidad de organismos y sus interacciones con el 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	El estudio de todas las aguas en y sobre la tierra, incluyendo 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 antiguo.
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 pueden ser explotados 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.
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).
Oxidación de sulfuro	Oxidación exotérmica de sulfuro reducido químicamente (S_2^{-2}) a una forma parcialmente o completamente oxidada tal como sulfato (SO_4^{-2}). Un indicio de oxidación de sulfuro, es las concentraciones de elevadas de sulfato 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 considerado básico ($pH > 8,5$).

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 Conteo 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.
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.
Residuos 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 rajos 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.

Subacuoso	Ocurriendo bajo el agua.
Tampón	Amortiguador, estabilizador, neutralizador del pH.
Trabajos subterráneos	Cualquier excavación subterránea antropogénica, incluyendo entradas inclinadas a una mina, cruceros 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 gran tonelaje, de baja ley relativamente uniforme que puede ser explotado con el método de rajo abierto, si se ubica a proximidad de la superficie.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Environment Australia. MANAGING SULPHIDIC MINE WASTES AND ACID DRAINAGE, Best Practice Environmental Management in Mining, Mayo 1997.
- 2.- Canada Centre for Mineral and Energy Technology. MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE (MEND). Volumen 1, 2, 3, 4, 5, y 6. Editores: Charlene M. Hogan, Gilles A. Tremblay. Marzo, 2001.
- 3.- MDAG. ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY OF MINESITE DRAINAGE. Practical Theory and Case Studies, Vancouver, British Columbia, Canadá.
- 4.- British Columbia Ministry of Energy and Mines. METAL LEACHING AND ACID ROCK DRAINAGE GUIDELINES, 1.999.
- 5.- Mendoza Juan, Mogrovejo José, Yataco Amado, República del Perú. GUÍA AMBIENTAL PARA EL MANEJO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS, Ministerio de Energía y Minas, 1.997.
- 6.- Hutchison I.P.G and Ellison R.D. MINE WASTE MANAGEMENT (eds) 1992.
- 7.- Blanca Escobar. Apuntes del Curso. Gestión de Residuos en Procesos Mineros y Metalúrgicos. Capítulo 7, Octubre 2001. Universidad de Chile.
- 8.- Ivonne Moreno. APLICACIÓN DE TÉCNICAS QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS PARA PREDICCIÓN DE LA GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS EN RELAVES MINEROS. Tesis de Título, Depto de Ingeniería Civil Química, Universidad de Chile 2.000.
- 9.- Armando Valenzuela, M.Sc. DRENAJE ÁCIDO: RESUMEN, Unidad de Asuntos Internacionales y del Medio Ambiente. Comisión Chilena del Cobre, 2.001.
- 10.- Armando Valenzuela, M.Sc. ORIGEN AMBIENTAL Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR METALES PESADOS. Significado ambiental de la contaminación por metales pesados en suelos. Unidad de Asuntos Internacionales y del Medio Ambiente. Comisión Chilena del Cobre, 2.001.
- 11.- S.H.Castro, M.A.Sánchez y F.Vergara, Eds. ENVIRONMENT & INNOVATION IN MINING AND TECHNOLOGY, University of Concepción-Chile, 1998.
- 12.- S.H.Castro, M.A.Sánchez y F.Vergara, Eds. EFFLUENT TREATMENT IN THE MINING INDUSTRY, University of Concepción-Chile, Department of Metallurgical Engineering, 1998.

13.- S.H.Castro, M.A. Sanchez and F.Vergara. ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND EFFLUENT TREATMENT IN THE CHILEAN COPPER INDUSTRY. Clean Technology Group, Department of Metallurgical Engineering. University of Concepción, 1.997.

14.- Comisión Chilena del Cobre, CIID, IIPM. CIERRE DE FAENAS MINERAS EN CHILE. Propuesta de Legislación, Institucionalidad y Opciones técnicas. Enero 2001.

15.- Claudio Herrera A. MANEJO AMBIENTAL DE LASTRE CON POTENCIAL GENERADOR DE AGUAS ÁCIDAS. Tesis de Título, Ingeniería Civil de Minas. Universidad de Chile, Noviembre de 1999.

16.- Carlos Ruiz Fuller; L. Aguirre ... [et al.]. GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS METALÍFEROS DE CHILE, Instituto de Investigaciones Geológicas, 305 p., 1965.

17.- R.C.Ford, S.H. Pierce, M.D.Ankeny, J.Kelsey. EVALUATION AND MANAGEMENT OF ACID DRAINAGE RISK FROM SPENT ORE, El Abra Mine, Chile. ICARD 2000. Publicado por Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

18.- C. Zipper, Extension Specialist, Crop and Soil Environmental Sciences, Virginia Tech; and C. Jage, Land Trust Representative. PASSIVE TREATMENT OF ACID-MINE DRAINAGE WITH VERTICAL-FLOW SYSTEMS, New Jersey Conservation Foundation, Far Hills, NJ Publication Number 460-133, Posted June 2001.

19.- Water Management Consultants. CURSO TÉCNICO: DRENAJE ÁCIDO DE MINAS, Acuerdo Marco de Producción Limpia, Ministerio de Minería, Consejo Minero, Marzo 2002.

20.- Geoff S. Hansford, University of Cape Town. THE MICROBIAL ACTIVITIES INVOLVED IN THE FORMATION, CONTROL AND TREATMENT OF ACID ROCK AND ACID MINE DRAINAGE, II Encuentro Mínero Cono Sur de América, VII Encuentro Mínero Región de Tarapacá. J.P Ibáñez, E.Patiño y X. Veloso, Editores, Universidad Arturo Prat, Iquique-Chile.

21.- Masatoshi Murata, Japan International Cooperation Agency. CURSO INTERNO MEDIO AMBIENTE Y MINERÍA, Tratamiento de Aguas Ácidas. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. Abril 2002, Santiago.

22.- SIGA Consultores y Ministerio de Minería. GUÍA METODOLÓGICA DE PREVENCIÓN, CONTROL Y TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINAS EN CHILE y SEMINARIO DRENAJE ÁCIDO DE FAENAS MINERAS, 2.001.

23.- Bernardita Araya. RELAVES EN LA MINERÍA CHILENA. Caracterización Química y Situación Legal en Relación a Elementos Contaminantes. Seminario de Título, Química Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Junio 2001.

24.- Revista Ecoamérica. TECNOLOGÍAS LIMPIAS PARA LA INDUSTRIA. Abril 2002, Año 2, N°16.

25.- República de Chile. DECRETO N° 90, Santiago, 30 de mayo de 2000. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

26.- Ministerio de Salud, República de Chile. PROYECTO: REGLAMENTO SOBRE MANEJO SANITARIO DE RESIDUOS PELIGROSOS. Documento en consulta, 31 Mayo 2001. Ministerio De Salud; División Salud Ambiental; Depto. Programas Sobre El Ambiente.

27.- Steffen Roberston and Kirsten (B.C.) Inc. GUIDE TECHNIQUE PRÉLIMINAIRE SUR LE DRAINAGE ROCHEUX ACIDE. Volumen 1. Capítulo 2. Rapport Du Groupe de Travail Sur Le Drainage Miner Acide de la Colombie-Britannique. 580, rue Hornby, bureau 800. Vancouver, C-B, V6C3B6. 1989.

SITIOS WEB

28.- Virginia Cooperative Extension. Knowledge for the Common Wealth. "Passive Treatment of Acid-Mine Drainage with Vertical-Flow Systems".
<<http://www.ext.vt.edu/pubs/mines/460-133/460-133.html>>

29.- Department of Environmental Protection, Pennsylvania. "The Science of Acid Mine Drainage and Passive Treatment".
<http://www.dep.state.pa.us/dep/deputate/minres/bamr/amd/science_of_amd.htm>

30.- Department of Chemistry and Geochemistry. Colorado School of Mines Golden, Colorado. "Acid Mine Drainage Experiments".
<http://www.mines.edu/fs_home/jhoran/ch126/microbia.htm>

31.- Government of Canada. "Mine Environment Neutral Drainage (MEND) program in Canada".
<http://mend2000.nrcan.gc.ca/default_e.htm>

32.- The International Network on Acid Prevention (INAP). "Glossary of Terms Used in Metal Leaching and Acid Rock Drainage Work".
<<http://www.inap.com.au/inap/inap3.nsf>>

33.- World Water. "Mathematical models predict acid rock drainage". January 1998 (pág. 22). <<http://www.edie.net/Library/Features/WWA982>>

34.- U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste Special Waste Branch. "Technical Report: Acid Mine Drainage Prediction". Diciembre 1994.
<<http://www.epa.gov/epaoswer/other/mining/techdocs/amd>.>

35.- Environmental Australia. "Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage", 1997.
<<http://www.ea.gov.au/industry/sustainable/mining/booklets/acid/index.html>>

36.- Cotoras Davor. "La enfermedad de los relaves". Biohídrica, Induambiente 20:26-7, 1996.
<http://www.biohidrica.cl/BIOHIDRICA_NPublicacion04.htm>

37.- Cotoras Davor. "Recicladores invisibles". Induambiente 13(14):27-29, Mayo-Junio 1995.



ANEXO 1

ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO 1A. ENSAYOS ESTÁTICOS

ANEXO 1B. ENSAYOS CINÉTICOS

ANEXO 1. ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO 1A. Ensayos estáticos

Ensayo Balance ácido base (BAB) estándar o Prueba del Potencial de Producción Neta de Acidez y BAB modificado.

Ensayo	Origen y Fuente	Método y objetivo	Ventajas	Limitaciones	Costo Unitario	Duración
EPA Standard Acid Basic Accounting (BAB Estándar)	Environmental Protection Agency. EPA (Sobek et al, 1978).	El método consiste en que la muestra se trata con un exceso de ácido clorhídrico estandarizado, luego se calienta para asegurar la reacción completa. El objetivo es determinar el equilibrio teórico entre el ácido que se genera y el ácido que se consume en los componentes de una mina.	<ul style="list-style-type: none"> Método ampliamente aceptado y normalmente usado. Rápido y fácil de realizar. Tipo de ensayo con el que se cuenta con más resultados, respecto a los demás ensayos estáticos. Bajo costo. Se debe usar como parte de un proceso de extensa evaluación. La interpretación de los datos de BAB es utilizada para tomar decisiones sobre a cuáles residuos se les aplicarán pruebas cinéticas. Determina la cantidad máxima del potencial de neutralización (CNA) y el potencial de acidez disponible en una muestra (MPA), así los resultados del BAB proveen a los reguladores y operadores de mina de una estimación global del potencial de producción de acidez neta (PPNA), que puede generar los residuos de mineralización. Si la digestión se maneja y mantiene al nivel más elevado del rango de pH dictado por el ensayo, los resultados del PN son comparables a los del método EPA BAB modificado. Los resultados de BAB pueden mostrar rápidamente residuos problema, los cuáles afectan el plan de la mina y las opciones de disposición. 	<ul style="list-style-type: none"> El potencial de acidez (PA) puede sobreestimarse, debido a que para el cálculo de PA, se usa el azufre total, no diferencia entre especies de azufre generadoras o no generadoras de ácido. Para Chile, este método es muy simple y sujeto a un error muy grande, debido a que el norte chileno es rico en sulfato, lo que viene a ser acidez almacenada. La proporción y magnitud de las reacciones generadoras y consumidoras de ácido no son determinadas. No cuantifica la reactividad del material. La determinación del PN es llevada a cabo en un pH ácido <6, donde todo el carbonato es expelido como gas. Bajo condiciones de campo la mineralización de la calcita puede tener lugar en niveles de pH neutros o alcalinos y ocurre una incompleta neutralización a bicarbonato. El método no indica a qué pH la muestra puede neutralizarse durante un largo contacto con agua ácida. Debido a la digestión agresiva de la muestra con exceso de ácido clorhídrico, puede sobreestimar el potencial de neutralización. 	U\$ 125 con interpretación.	5 días
Modified Acid Basic Accounting (ABA Modificado)	Environmental Protection Agency. Lawrence, 1989	Utiliza el mismo método que el estándar. Tiene el mismo objetivo que el método BAB estándar.	<ul style="list-style-type: none"> Permite una valoración más realista de PA usando concentraciones de sulfuro, de manera que las formas de azufre que no producen ácidos no sean incluidas en los cálculos de generación de ácido como sulfuro. El método previene la sobreestimación de PN comparada con el procedimiento estándar. 	<ul style="list-style-type: none"> El cálculo de PA únicamente en base de S-sulfurado no se considera apropiado en el contexto de muchos yacimientos epitermales, porque más del 50% del S total frecuentemente existe en formas no sulfuradas. 	U\$ 125 con interpretación.	5 días

Fuente: Tabla elaborada a partir de (1); (2 -Volumen 3); (4, 5, 22).

Prueba inicial de Investigación de B.C.

Ensayo	Origen y fuente	Método y objetivo	Ventajas	Limitaciones	Costo Unitario	Duración
Prueba Inicial de Investigación de B.C.	British Columbia. Brynestejn, A. Y Hackl, RP., 1984.	El método consiste en la titulación directa de ácido sulfúrico de la muestra, desde un pH natural, hasta un punto de viraje de pH 3,5. El objetivo es determinar el equilibrio entre el ácido que se genera y el ácido que se consume en los componentes de una mina.	<ul style="list-style-type: none"> • Ha sido ampliamente utilizado para la determinación del PN Neto. • Rápido y fácil de realizar. • Puede usarse como parte de un proceso de extensa evaluación. • El método de titulación del PN permite la neutralización de minerales presentes para la reacción a su propia velocidad, permitiendo así una reacción a la neutralización más natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • El PA en este ensayo se calcula utilizando la concentración total de azufre, por lo que puede causar sobreestimación del PA de la muestra. • Este método puede llegar a tomar varios días, lo cual lo hace más caro que los otros ensayos presentados. • La proporción y magnitud de las reacciones generadoras y consumidoras de ácido no son determinadas. • El método no indica a qué pH la muestra puede neutralizarse durante un largo contacto con agua ácida. 	U\$ 85	5 días

Fuente: Tabla elaborada a partir de (1); (2 -Volumen 3); (4, 5, 22).

Prueba de Generación neta de acidez (GNA)

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Costo Unitario	Duración
Net Acid Generating (NAG).	Miller, 1990.	Estima el Potencial Neto de acidez directamente. Su objetivo es determinar el equilibrio experimental entre el ácido que se genera y el ácido que se consume en los componentes de una mina, sin la necesidad de analizar el azufre.	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido (24 hrs) y fácil de realizar. • Puede usarse como parte de un proceso de extensa evaluación. • Prueba de terreno conveniente, debido a que no se requieren análisis de azufre y requiere el mínimo de equipos de laboratorio. • Indica la reactividad del sulfuro y el Potencial de Neutralización disponible. • Elimina la incertidumbre relativa a la disponibilidad de las especies de azufre oxidables, y proporciona una indicación final de la capacidad de la Producción Neta de Ácido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Método todavía en la fase de desarrollo. • No proporciona una medida del PN disponible. • Las proporciones de generación de ácido no se determinan. • La oxidación de pirita a través de H₂O₂ puede interferirse con componentes alcalinos. 	U\$ 90	5 días

Fuente: Tabla elaborada a partir de (1); (2 -Volumen 3); (4, 5, 22).

ANEXO 1B. Ensayos cinéticos
Prueba Celda de Humedad Estándar

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Costo Unitario	Duración
Prueba estándar Celda de Humedad	ASTM Método #D5744-96	Pruebas de laboratorio a pequeña escala, diseñadas para simular los procesos de intemperismo geoquímico para una muestra específica de roca, bajo condiciones de oxidación óptimas. Los datos resultantes pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de oxidación, el grado de potencial del intemperismo y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido.	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo cinético a escala de banco más usado para determinar el potencial de generación de lixiviado ácido. • Correlaciona las pruebas de predicción estática con la liberación de acidez observada. Por ejemplo, dado un resultado de BAB, predice si la liberación de ácido (pH < 5) realmente ocurrirá. • Los ensayos de celdas de humedad pueden modificarse para responder mejor a cuestiones específicas (como inocular de una bacteria oxidante, para introducir efectos del azufre oxidados). • Simula los ciclos húmedo/seco del ambiente. • Puede determinar las tasas de generación de ácido y consumo de ácido (absoluta y relativa). La tasa de remoción de mineral puede indicar cuando la roca realmente generará ácido. • Proporciona una indicación de calidad de agua de lixiviación que puede esperarse del material residual. • Los datos de estos ensayos pueden ser usados como entrada a un modelo matemático. • Monitorear la liberación de sulfato, indicando las tasas de oxidación. • Evaluación de los minerales involucrados en la generación y consumo de ácido. Análisis detallado del lixiviado puede indicar los tipos de reacciones existentes. • Evaluación de efectos galvánicos. Efectos galvánicos pueden ocurrir cuando los sulfuros de diferentes tipos están en contacto directo eléctrico. El potencial electroquímico de cada sulfuro determina la secuencia de oxidación. 	<ul style="list-style-type: none"> • La interpretación de los resultados a veces es compleja. • Los largos periodos de prueba, y aplicación de los datos de las pruebas, pueden inducir costos altos. Las tasas de reacción en celdas es lenta bajo condiciones de pH neutro, ya que la oxidación de sulfuro es abiótica. El consumo de mineral buffering es también lento, resultando la liberación real de acidez en periodos largos de retraso, posiblemente lleve a la conclusión que el ácido nunca sería liberado. • Generalmente, los proyectos requieren la información en menos que un año, sin embargo, como el PN aumenta y el PN/PA aumenta, es probable que la química del lixiviado no ácido estable continúe por varios años o décadas. • Las condiciones de los ensayos no siempre son representativas de las condiciones de campo, por esto los resultados de este ensayo no pueden ser aplicados directamente a gran escala. • El establecimiento de la celda estándar de humedad de colas, no permite precipitaciones de minerales secundarios, por lo que los lixiviados generados por estas celdas no deben ser considerados como representativos de la calidad de lixiviado de DAR. 	US\$ 3000 El tiempo de duración y costo unitario de la prueba varía específicamente de la muestra a analizar, por lo tanto dadas las características de la muestra esta puede variar desde 3 meses a más de 3 años, por ende varía su costo.	Mínimo 20 semanas

Fuente: Tabla elaborada a partir de (1); (2- Volumen 3); (5, 22).

Prueba de Lixiviación en Columna.

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Costo Unitario	Duración
Prueba de Lixiviación en Columna	British Columbia. AMD Task Force Report. 1989.	Pruebas de laboratorio a pequeña escala, diseñadas para simular los procesos de intemperismo geoquímico para una muestra específica de roca, bajo condiciones de oxidación óptimas. Los datos resultantes pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de oxidación, el grado de potencial del intemperismo y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido.	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo cinético a escala de banco más usado para determinar el potencial de generación de lixiviado ácido. • Correlaciona las pruebas de predicción estática con la liberación de acidez observada. Por ejemplo, dado un resultado de BAB, predice si la liberación de ácido ($\text{pH} < 5$) realmente ocurrirá. • Los ensayos de celdas de humedad pueden modificarse para responder mejor a cuestiones específicas (como inocular de una bacteria oxidante, para introducir efectos del azufre oxidados). • Simula los ciclos húmedo / seco del ambiente. • Puede determinar las tasas de generación de ácido y consumo de ácido (absoluta y relativa). La tasa de remoción de mineral puede indicar cuando la roca realmente generará ácido. • Proporciona una indicación de calidad de agua de lixiviación que puede esperarse del material residual. • Los datos de estos ensayos pueden ser usados como entrada a un modelo matemático. • Monitorear la liberación de sulfato, indicando las tasas de oxidación. • Evaluación de los minerales involucrados en la generación y consumo de ácido. Análisis detallado del lixiviado puede indicar los tipos de reacciones existentes. • Evaluación de efectos galvánicos. Efectos galvánicos pueden ocurrir cuando los sulfuros de diferentes tipos están en contacto directo eléctrico. El potencial electroquímico de cada sulfuro determina la secuencia de oxidación. 	<ul style="list-style-type: none"> • La interpretación de los resultados a veces es compleja. • Los largos periodos de prueba, y aplicación de los datos de las pruebas, pueden inducir costos altos. Las tasas de reacción en celdas es lenta bajo condiciones de pH neutro, ya que la oxidación de sulfuro es abiótica. El consumo de mineral buffering es también lento, resultando la liberación real de acidez en periodos largos de retraso, posiblemente lleve a la conclusión que el ácido nunca sería liberado. • Generalmente, los proyectos requieren la información en menos que un año, sin embargo, como el PN aumenta y el PN/PA aumenta, es probable que la química del lixiviado no ácido estable continúe por varios años o décadas. • Las condiciones de los ensayos no siempre son representativas de las condiciones de campo, por esto los resultados de este ensayo no pueden ser aplicados directamente a gran escala. • El establecimiento de la celda estándar de humedad de colas, no permite precipitaciones de minerales secundarios, por lo que los lixiviados generados por estas celdas no deben ser considerados como representativos de la calidad de lixiviado de DAR. 	US\$ 3000	Mínimo 20 semanas

Fuente: Tabla elaborada a partir de (1); (2- Volumen 3); (5, 22).

ANEXO 2
MÉTODOS DE CAMPO

ANEXO 2. MÉTODOS DE CAMPO

Resumen de método de campo aplicado en relaves

Origen y fuente	Descripción del método	Objetivo	Aplicaciones	Costo
MEND MANUAL Volumen 3 Prediction MEND 5.4.2c.	Los métodos de campo para la predicción de producción de ácido de relaves sulfúricos involucran medidas y observaciones de campo específicas (flujo de oxígeno atmosférico, pH, conductividad, vegetación muerta, presencia de precipitados, etc); procedimientos de pruebas basadas en terreno, la revisión y evaluación de datos de calidad de agua superficial y subterránea, y muestreo adicional y ensayos analíticos.	Evaluar el rendimiento de las medidas de control de producción de ácido, antes y después del cierre.	<ul style="list-style-type: none"> Las observaciones de las condiciones del sitio y la revisión de datos ambientales, que pueden detectar el comienzo del drenaje ácido debería ser un componente de los proyectos de predicción de drenaje ácido y programas de monitoreo proactivo en curso. Los principales requisitos son que las características químicas y físicas de los relaves y el entorno de los relaves sean razonablemente bien entendidas. Estas características incluirían: profundidad de la Cuadro de agua, predicción del rendimiento de la cobertura si presenta, calidad de agua de poro, reducción de sulfuro, y valores de PA y PN a través de columnas de relaves. También existe necesidad de entender las variaciones en condiciones que puedan influenciar la oxidación de relaves, tales como variaciones estacionales en niveles de agua y erosión superficial. 	Las pruebas simples de campo son a menudo llevados a cabo juntamente con rutinas de inspecciones del sitio, por lo que no incurren en costos adicionales.

Fuente: Tabla elaborada a partir de (2- Volumen 3) y (22).

Comparación con Otros Sitios y Medios Ambientes Geológicos similares

Origen y fuente	Descripción del método	Objetivo	Aplicaciones	Limitaciones	Costo
MEND MANUAL Volumen 3 Prediction MEND 5.4.2c.	La clasificación de depósitos de acuerdo con la sensibilidad a generar drenaje ácido, resultaría en un sistema que podría permitir una predicción preliminar del potencial de drenaje ácido basado únicamente sobre características geológicas. Es improbable que las comparaciones de un proyecto propuesto con otros proyectos provean una indicación definitiva del potencial para la liberación de drenaje ácido de roca. Es necesario incluir otros factores incluyendo el tipo de minería propuesta, la ubicación del mineral dentro del sistema mineralizado, y los factores climáticos locales. Las comparaciones de los depósitos en regiones separadas ampliamente es válida si los medio ambientes geológicos son similares.	La predicción del potencial de drenaje ácido a través de la comparación con otros sitios y medios ambientes geológicos similares.	Las comparaciones geológicas pueden permitir una clasificación preliminar del potencial de DAR para un depósito en particular.	<ul style="list-style-type: none"> Este método provee sólo una evaluación preliminar limitada y los datos específicos del sitio serán siempre necesitados para apoyar decisiones ingenieriles. Es necesario desarrollar una base de datos para apoyar tales comparaciones. 	Los costos de la comparación son pequeños, a menos que un gran esfuerzo en investigación sea requerido para obtener la información necesaria para la comparación.

Fuente: Tabla elaborada a partir de (2- Volumen 3); (5, 22).

Resumen de Prueba en Pila de Residuos de Roca

Origen y fuente	Descripción del método	Objetivo	Aplicaciones	Limitaciones	Costo
MEND MANUAL Volumen 3 Prediction MEND 5.4.2c.	El material de prueba es usualmente obtenido de la extracción (ya sea en escala completa o exploración) y así puede proveer información del comportamiento real que podría ser esperado en una pila de roca a escala completa.	Las pruebas en pilas de residuos de roca son normalmente montadas para determinar el comportamiento del desgaste bajo condiciones de campo y compararlo con los ensayos de laboratorio.	<ul style="list-style-type: none"> Este tipo de pruebas es recomendado a cualquier proyecto de predicción para establecer la relación entre las tasas de mineralización bajo condiciones de laboratorio y de campo. Pueden ser utilizadas simplemente para evaluar tasas de oxidación incontroladas o pueden ser diseñadas para evaluar alternativas de control. 	<p>Las siguientes limitaciones deberían ser consideradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Para tests más grandes, la caracterización inicial del material previo a las pruebas puede ser difícil. El monitoreo de las muestras de lixiviado necesita ser realizado sobre una base regular. Si el sitio es alejado, los costos del muestreo pueden ser altos. Los efectos estacionales, particularmente en pilas pequeñas, pueden ser severos, de ese modo ocultan las otras características de interés tales como la reducción a largo plazo en la liberación de productos de oxidación. Las pruebas bajo condiciones del sitio pueden tomar mucho más tiempo que la misma prueba bajo condiciones de laboratorio. Como cualquier prueba de campo, las pruebas en pilas necesitan ser protegidas cuidadosamente de daños por condiciones climáticas extremas y vandalismo. No puede ser asumido que las pruebas de pilas se comportarán igual como las pilas a escala completa. Las pruebas a pequeña escala no pueden realmente evaluar las alternativas de control de DAR ya que la duplicación de las condiciones operacionales es difícil. 	Los costos capitales iniciales son dependientes de la ubicación y de los tipos de materiales. Los costos del monitoreo pueden ser altos si son requeridas visitas especiales por un técnico.

Fuente: Tabla elaborada a partir de (2- Volumen 3); (5, 22).

Resumen de Lavado de Pared en excavaciones de mina

Origen y fuente	Descripción del método	Objetivo	Aplicaciones	Limitaciones	Costo
MEND MANUAL Volumen 3 Prediction MEND 5.4.2c.	La oxidación de las paredes de mina procede en la misma manera que en los residuos de roca. Durante periodos secos, los productos de oxidación se acumulan sobre las superficies expuestas inmediatas y en fracturas disponibles a la oxidación por la atmósfera. Durante eventos de flujos repentinos (precipitación, lixiviación de agua subterránea), los productos de oxidación solubles son lixiviados y afectan la calidad de agua de la mina. En este método, una sección de la pared es aislada, el agua es rociada sobre la pared y el lixiviado resultante es recogido.	El principio de lavado de pared es estimar la tasa de oxidación de las paredes por simulación de precipitación sobre las paredes.	El método puede ser aplicado a cualquier proyecto donde existan paredes de minas expuestas a la oxidación. La mayoría de las paredes de los pozos son adecuadas.	<ul style="list-style-type: none"> Algunas paredes subterráneas pueden no ser adecuadas ya que la pendiente de la pared, puede obstruir la colección del lixiviado. La principal limitación es la falta de una base de datos extensiva que muestre la reproducibilidad de los resultados y las posibles dificultades con la aplicación del método bajo diferentes condiciones. 	Los costos de los materiales para instalar una estación de lavado de pared son pequeños. Los costos principales son por el tiempo técnico para montar y lavar las estaciones. El tiempo estimado de montaje es alrededor de cuatro horas. El enjuague toma alrededor de 30 minutos.

Fuente: Tabla elaborada a partir de (2- Volumen 3) y (22).

Métodos de campo en Pilas de residuos de roca, desgaste natural y excavaciones de mina existentes.

Origen y fuente	Descripción del método	Objetivo	Aplicaciones	Limitaciones	Costo
<p>MEND MANUAL Volumen 3 Prediction MEND 5.4.2c.</p>	<p>El estudio de pilas de residuos de roca y excavaciones de minas existentes pueden proveer información valiosa respecto al comportamiento al largo plazo de residuos de roca sin la conducción extendida de pruebas bajo condiciones de laboratorio o de campo.</p> <p>El estudio de pilas de residuos de roca y excavaciones de minas antiguas, pueden proveer información relevante de mineralización a escalas de tiempo variante de unos pocos años a varios siglos (en áreas de minería histórica). Esto proporciona una analogía obvia a minas más nuevas o propuestas.</p> <p>El estudio de rocas desgastadas naturalmente, puede proveer información durante escalas de tiempo variables de siglos a varios milenios, dependiendo de las condiciones locales climáticas, fisiografía y geología.</p> <p>La evaluación se realiza a través de la descripción de la mineralogía de la roca en muestras bajo control de campo, observación de características del desgaste a pequeña y grande escala sobre fragmentos de roca, medida del pH en pasta sobre rocas finas, medida del pH y sólidos totales disueltos para infiltración.</p>	<p>Determinación de las características de meteorización de la roca en el campo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Las observaciones de las condiciones de sitio existentes deberían ser parte de los proyectos de predicción de DAR. El principal requisito para tales estudios, es que la geología de las pilas de residuos más antiguas o exposición de roca natural, deberían ser relevantes para la mina propuesta. • En el caso de la comparación de excavaciones de minas antiguas con minas actuales más nuevas o propuestas, pueden no ser apropiadas si las minas nuevas serán un rajo abierto explotando un grado más bajo de mineralización, y las minas antiguas utilizaron métodos subterráneos para obtener zonas de alta calidad. A pesar de esto, en tales casos, puede ser utilizado el estudio de muestras individuales de residuos oxidados. 	<ul style="list-style-type: none"> • En el estudio de pilas de residuos de roca y acumulaciones naturales de roca quebrada, las características iniciales de los materiales de ensayo, no pueden ser determinadas fácilmente excepto en caso que los fragmentos de roca más grandes puedan tener características indicativas de condiciones iniciales. • En el estudio de las excavaciones de mina existentes, éstas pueden no ser similares a las excavaciones para las cuales las predicciones son requeridas. En este caso, la información recogida debe ser limitada a exposiciones de tipos de roca individual. • No hay ninguna analogía para excavaciones de mina tal como existe para superficies de residuos de roca. Las superficies formadas naturalmente, son formadas bajo diferentes condiciones y no debieran ser aplicadas a predicciones para excavaciones de mina. • En el estudio de las pilas de residuos de roca y excavaciones de mina antiguas, la principal limitación es la similitud de las diversas pilas y excavaciones al ser comparadas. En el caso de las pilas, las variaciones en la fuente del mineral, los métodos de minería, incluyendo métodos de extracción, el tamaño y la eficiencia pueden tener un efecto significativo sobre la composición de pilas de rocas. En el caso de las excavaciones, variaciones en métodos de extracción pueden tener un efecto importante sobre las características de las paredes de la mina. • Cuando se intenta usar características de mineralización natural para predecir el comportamiento en pilas de residuos de roca, se deben considerar algunas diferencias entre lo natural y los residuos de roca tales como: rotura física por procesos naturales comparado con el uso de explosivos, disponibilidad de humedad y oxígeno, intimidad del contacto mineralógico, grado de mezclado. 	<p>Las observaciones de campo son normalmente recogidas durante la rutina de inspecciones de sitio. No son incurridos costos adicionales. Normalmente, un sitio minero pequeño puede ser descrito completamente en un día completo de inspección dependiendo del acceso.</p>

Fuente: Tabla elaborada a partir de (2 – Volumen 3).

ANEXO 3

RESUMEN DE ALGUNOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA GENERACIÓN, TRANSPORTE Y EFECTOS DEL DAR

ANEXO 3. RESUMEN DE ALGUNOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA GENERACIÓN, TRANSPORTE Y EFECTOS DEL DAR

Modelo	Enfoque	Objetivos y Aplicabilidad	Datos de entrada requeridos	Fuente
Reactive Assessment Tailings Acid Program (RATAP).	Empírico	Permite evaluar la tasa y cantidad de ácido generado desde la base de relaves metálicos. También puede ser utilizado para evaluar los beneficios a corto y largo plazo de las opciones del manejo de relaves (tales como la colocación de una cubierta), y puede facilitar el desarrollo de alternativas de recuperación o estrategias de cierre. Permite simulaciones de varios cientos de años. Provee predicciones de concentración para: numerosos metales (Al, As, Ca, Cu, Fe, Mg, K, Zn); especies acuosas (CO ₃ , SO ₄); minerales sulfurados (pirita, pirrotita, calcopirita, sfalerita, aresinopirita); minerales buffering y precipitados (calcita, hidróxido férrico, gypsum); componentes gaseosos (oxígeno, dióxido de carbono), además de una estimación de la acidez. Las predicciones son disponibles desde diferentes profundidades en las zonas saturadas y no saturadas.	Las características de una cubierta seca sobre los relaves puede ser especificada utilizando varios parámetros de entrada (p.e. porosidad, contenido de agua, espesor, contenido mineral). Los relaves también pueden ser modelados bajo la suposición que ellos están altamente saturados (p.e. relaves inundados) y utilizando los datos de entrada de T°, pH, masa de sulfuro, concentración de P, humedad y concentración de CO ₂ .	User's Manual (RATAP.BM 2).
MINDEC		Modelo aplicado para la evaluación de los peligros y riesgos toxicológicos a la salud humana, debido a la contaminación del agua subterránea y superficial por medio de desechos mineros. Provee un asesoramiento rápido de los niveles de peligro relativo en varios sitios y está dirigido a planificadores ambientales, reguladores y a la industria minera.	Ingreso del agua a las colas, % de recarga de agua, área del dique de cola, composición de desechos (o lixiviados), gradiente hidráulica, carácter del subsuelo (atributos hidráulicos), flujos de ríos, concentraciones medioambientales, consumo del agua potable y datos sobre factores de exposición.	
HELP	Determinístico.	Tiene la capacidad de predecir la relación entre precipitación y filtración a largo plazo. Es posible realizar una evaluación del balance de agua (tiempo para llegar a la condición de capacidad de almacenamiento, volumen de lixiviado a largo plazo, escorrentía) y utilizar un análisis de regresión lineal para identificar correlación entre las cargas de los componentes medidas y el flujo de filtración. Fue aplicado en un proyecto en Argentina, 2001-2002		Schroeder et al 1994.

Fuente: Tabla elaborada a partir de (2-Volumen 3) y (34).

Modelo	Enfoque	Objetivos y Aplicabilidad	Datos de entrada requeridos	Fuente
Unsat 2	Determinístico.	Puede predecir caudales a largo plazo, en pilas de lixiviación, tranques de relaves, etc. Fue aplicado en varios ejemplos en E.E.U.U.	Resultados de pruebas de laboratorio y pruebas de infiltración.	Davis y Newman, 1983.
MINTEQ	Determinístico.	Los cálculos geoquímicos utilizando este modelo de equilibrio de especiación, fueron llevados a cabo para estudiar la formación de precipitados y minerales secundarios (hidróxido férrico, goetita, lepidocrita), en la zona no saturada. Datos de entrada requeridos: Este modelo, requiere información sobre la química del agua, lo que incluye pH, potencial redox (Eh), especies disueltas (metales, sulfato, amonio, cloruro, orgánicos, etc). También requiere de otros datos sobre el potencial o fases sólidas reales.		
Soil Cover	Determinístico.	Modelo diseñado para predecir el comportamiento de cubiertas de suelo localizadas sobre relaves reactivos y residuos de roca. Tiene la capacidad de predecir las condiciones promedio en un botadero hasta 20 años y las condiciones de escurrimiento después de 150 años en el botadero. Fue aplicado en el caso del Proyecto Pascua-Lama, WMC 1999-2000, y resultados también aplicados en El Indio 1999-2000.	Este modelo requiere los parámetros físicos de: T° máx, min; Humedad relativa máx, min; Radiación solar (neta-según Penman); Velocidad del viento y Tasa de deshielo.	Universidad Saskatchewan, 1997.
Modelo de Cierre de Rajos de WMC.		Este modelo puede predecir el DAR producido en las paredes del pit, predecir la descarga e impacto en aguas abajo y aguas subterráneas en el largo plazo, y realizar una modelación integrada de la calidad de las aguas producidas por varios escenarios de manejo hidrológico.	Calidad del agua, balance de agua, meteorología, geología / geoquímica, hidrología, hidrogeoquímica, etc.	Water Management Consultors (WMC).
MINEWAL L 2.0		Predecir la química del agua en rajos abiertos y minas subterráneas en operación y cerradas.	T°, precipitación, evaporación, flujo de agua en y a través de la mina, flujo de agua subterránea desde la zona saturada, dimensiones físicas del rajo, número de unidades geológicas expuestas en las paredes, etc.	MEND 1.15.2a, <i>MINEWAL 2.0 - User's Manual.</i>

Fuente: Tabla elaborada a partir de (2-Volumen 3) y (34).

ANEXO 4

RESUMEN DE VENTAJAS Y

LIMITACIONES DE MATERIALES

ALTERNATIVOS DE CUBIERTA

ANEXO 4. MATERIALES ALTERNATIVOS PARA CUBIERTAS (según Nolan, Davis and Associates, 1987)

Resumen de ventajas y desventajas de los materiales de cubierta.

Material de cubierta	Permeabilidad al agua (m/seg)	Ventajas/desventajas
Arcilla compactada	10^{-9} a 10^{-11}	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad de grandes cantidades. - Sujeto a erosión, resquebrajadura y penetración de raíces. - Buen sellado si se protege y mantiene.
Morrena compactada	10^{-7} a 10^{-9}	<ul style="list-style-type: none"> - Igual que el anterior, pero generalmente más permeable.
Suelo superficial compactado	10^{-5} a 10^{-8}	<ul style="list-style-type: none"> - Como el anterior, pero menos robusto, más permeable.
Ciénaga Carbonosa	10^{-5} a 10^{-6}	<ul style="list-style-type: none"> - Debe mantener saturación. - Impráctico para botaderos elevados y pendientes laterales.
Concreto	10^{-10} a 10^{-12}	<ul style="list-style-type: none"> - Sujeto a resquebrajaduras, helada y daño mecánico.
Asfalto HDPE sintético	10^{-20} Impermeable	<ul style="list-style-type: none"> - Como el anterior. - Requiere un área adecuada y una cubierta protectora. - Altamente impermeable. - Tiempo de vida < 100 años. - Sujeto a penetración mecánica.

Fuente: (5).

ANEXO 5

CUADRO COMPARATIVO DE

NEUTRALIZANTES PARA

EFLUENTES ÁCIDOS

ANEXO 5. CUADRO COMPARATIVO DE NEUTRALIZANTES PARA EFLUENTES ÁCIDOS

Item	Cal viva	Cal apagada	Carbonato de Calcio (Caliza)	Hidróxido de Magnesio	Soda Cáustica
Fórmula	CaO	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	Mg(OH) ₂	NaOH
Características	Sólido blanquecino, semitransparente, se degrada en la atmósfera.	Poivo seco blanco, reacciona con CO ₂ para formar CaCO ₃ .	Poivo seco blanco.	Poivo seco blanco.	Sólido blanquecino, semitransparente, alto grado de deliquescencia.
Solubilidad	Con agua se transforma en cal apagada (Ca(OH) ₂)	0,14g/100g-agua	1,5mg/100g-agua	0,9mg/100g-agua	109g/100 g-agua
Cuidados en el manejo	Reacción exotérmica con agua.		El CO ₂ disuelto en agua produce acidez.		Condensación del solvente por reacción exotérmica con agua.
Reacción de neutralización	Tiempo de reacción relativamente largo con formación de yeso.	Tiempo de reacción relativamente largo con formación de yeso.	Tiempo de reacción relativamente largo con formación de yeso.	Tiempo de reacción largo sin formación de yeso.	Tiempo de reacción corto sin formación de yeso.
Floculación	Alta velocidad de sedimentación, relativamente baja estabilidad de deposición.	Alta velocidad de sedimentación, relativamente baja estabilidad de deposición.	Alta velocidad de sedimentación, baja estabilidad de deposición.	Alta velocidad de sedimentación baja estabilidad de deposición.	Baja velocidad de sedimentación, alta estabilidad de deposición.
Secado	Relativamente buen secado	Buen secado	Buen secado	Buen secado	Mal secado
Ventajas y limitaciones	<p>Ventajas: Agente neutralizante más comúnmente ocupado. Fácilmente disponible y a bajo costo. Se aplica en forma de pasta, lodo o leche.</p>	<p>Ventajas: Agente neutralizante más comúnmente ocupado. Fácilmente disponible y a bajo costo. Se aplica en forma de pasta, lodo o leche. Posee una alcalinidad fuerte, puede llegar a pH 11.</p>	<p>Ventajas: Reactivo más barato. Se aplica en forma de leche o pasta.</p> <p>Limitaciones: Capacidad de neutralización media y tasa de reacción baja. El pH no sube más de 8 debido al CO₂. Es por esto, que sólo puede ser usado como un paso de pretratamiento. El yeso y el pp de hidróxido férrico tienden a cubrir la superficie de la caliza, reduciendo la eficiencia de neutralización.</p>	<p>Ventajas: Como ventaja produce un precipitado denso que contiene sólo el hidróxido del metal.</p> <p>Limitaciones: No es muy usado, específicamente en Chile debido a su alto costo. El efluente resultante debe ser tratado más adelante con cal para eliminar el sulfato como yeso antes de la descarga. Algunas veces se usa carbonato de magnesio.</p>	<p>Ventajas: Fácil de controlar. Es utilizado en casos muy específicos, para procesos automáticos de minería en que hay que ajustar el pH.</p> <p>Limitaciones: Es muy costoso.</p>

Fuente: Tabla adaptada a partir de (5, 21).