

## Planes de Cierre Mineros – Curso Resumido

**Jorge Oyarzún Muñoz (Geol. Dr. Sc.)**

*Director Progr. Diplomado en Gestión Ambiental Minera (GAM – ULS.)  
Coord. Acad. Progr. Diplomado en Sustentabilidad Ambiental Minera (ULS.)  
Prof. Titular Depto. Ingeniería de Minas Universidad de La Serena (Chile). Carreras Ingeniería  
Civil Ambiental e Ingeniería Civil de Minas.*



*Explotación artesanal de oro en la selva amazónica de Brasil (Eldorado do Juma)  
AP Photo by Victor R. Caivano (<http://www.daylife.com/photo/0fQV9Io8AKbMJ>)*

## CONTENIDOS

Introducción	5
<b>Capítulo 1:</b> Cierres y Planes de Cierre Mineros	7
1.1: Diferencias entre un Cierre y un Cierre Planificado	7
1.2: Objetivos Específicos de un Plan de Cierre Minero	9
1.3: Plan de Cierre y Ciclo de Vida de una Explotación Minera	11
<b>Capítulo 2:</b> Evaluación de Impacto Ambiental, Sistemas de Gestión Ambiental y Planes de Cierre de Minas	12
2.1: Consideraciones sobre el Cierre en la Etapa de Evaluación de Impacto Ambiental de un Proyecto Minero.	12
2.2: El Plan de Cierre Minero y el Sistema de Gestión Ambiental	14
<b>Capítulo 3:</b> El Diagnóstico Global del Sitio y los Planes de Cierre	15
3.1: Diagnóstico de los Factores Físicos y Biológicos.	15
3.2: Diagnóstico de los Factores Socio-Económicos y Culturales	18
<b>Capítulo 4:</b> Drenaje Ácido: Predicción y Prevención.	19
4.1: Predicción de la Generación de Drenaje Ácido.	19
4.2: Prevención de la Generación de Drenaje Ácido.	24
<b>Capítulo 5:</b> Técnicas de Tratamiento del Drenaje Ácido.	26
5.1: Tratamiento del Drenaje Ácido en Operaciones de Explotación y Cierre.	26
5.2: Recuperación Económica de Metales del Drenaje Ácido	31
<b>Capítulo 6:</b> Cierre y Estabilización de Labores Mineras	33
6.1: Cierre y Estabilización de Labores Mineras a Cielo Abierto.	33
6.2: Cierre y Estabilización de Labores Mineras Subterráneas.	36

<b>Capítulo 7:</b> Aspectos Hidrológicos Superficiales y Subterráneos.	40
7.1: Aspectos Hidrológicos de la Minería a Cielo Abierto: Factores Determinantes.	40
7.2: Aspectos Hidrológicos de la Minería Subterránea: Factores Determinantes.	41
7.3: La Restitución de un Drenaje Superficial Estable.	43
7.4: El Drenaje Post-Cierre de Labores Subterráneas.	46
<b>Capítulo 8:</b> Manejo de Suelos Contaminados en Planes de Cierre Mineros.	48
8.1: Contaminación Geoquímica – Mineralógica de Suelos	48
8.2: Otros Tipos de Contaminación de Suelos.	51
<b>Capítulo 9:</b> Estabilización y Protección de Desechos Minero-Metalúrgicos.	53
9.1: Principales Tipos de Desechos Minero-Metalúrgicos.	53
9.2: Factores a Considerar en el Diseño de Cubiertas Protectoras.	56
9.3: Estabilización y Protección de Depósitos de Relaves.	60
9.4: Estabilización y Protección de Pilas de Lixiviación y Botaderos.	63
9.5: La Estabilidad a Largo Plazo de las Cubiertas Protectoras.	68
<b>Capítulo 10:</b> Aspectos Socio-Económicos de un Plan de Cierre	72
10.1: Experiencias y Desafíos en el Manejo de Aspectos Socio-Económicos.	72
10.2: ¿Cómo Dejar un Legado Sustentable de la Explotación Minera y Minimizar los Impactos Socio-Económicos de su Cierre?	77
<b>Capítulo 11:</b> Aspectos Legales y Normativos de los Cierres Mineros.	79
11.1: Aspectos Legales y Normativos de Planes de Cierre Mineros en Diversos Países.	79

11.2: El Cierre de Minas en Chile. Una Legislación Postergada.	89
<b>Capítulo 12:</b> Costes, Financiación y Garantías de los Planes de Cierre.	93
12.1: Costes y Financiación de los Cierres Mineros.	93
12.2: Distribución de los Costes del Cierre durante la Operación	95
12.3: Planes de Cierre de Minas y Garantías Financieras.	97
<b>Capítulo 13:</b> Seguimiento y Control de los Cierres Planificados	100
13.1: Metodologías de Seguimiento y Control.	100
13.2: El Problema de los Horizontes de Tiempo.	103
<b>Capítulo 14:</b> Reutilización de los Sitios e Instalaciones.	105
14.1: Aspectos a Considerar en la Reutilización de Sitios.	105
14.2: Principales Tipos de Reutilización de Sitios Rehabilitados.	107
<b>Capítulo 15:</b> Los Pasivos Mineros Abandonados.	111
15.1: Consideraciones Generales sobre el Problema.	111
15.2: Los Pasivos Ambientales Mineros en Chile: ¿Cómo Resolver, al menos, los Casos más Graves?	114
<b>Referencias</b>	117

## INTRODUCCIÓN

El cierre de faenas minero-metalúrgicas plantea con especial fuerza el tema de la equidad intergeneracional. Ello, porque en muchos casos los efectos negativos pueden manifestarse sólo décadas o incluso siglos después del cierre de las operaciones.

Como en otros ámbitos, el cierre de minas puede ser enfocado solamente en términos del simple (pero esencial) cumplimiento legal o bien incluir igualmente un serio interés por hacer muy bien aquello que efectivamente importa. La redacción de este curso resumido apunta básicamente a lo segundo. Ello requiere una comprensión temprana, amplia y profunda de las características del sitio (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, biológicas, socio-culturales etc), así como su consideración al seleccionar el diseño y las tecnologías para la explotación.

De lo anterior se desprende la necesidad de que un buen plan de cierre se fundamente en un buen estudio de impacto ambiental, que a su vez sea el sustento conceptual de la gestión ambiental de las operaciones y del futuro plan de cierre (lo contrario a ello es un estudio de impacto ambiental realizado para “pasar la evaluación”, una gestión ambiental “para poder certificar” y un plan de cierre para salir lo antes posible de los problemas legales y olvidarse del asunto).

La elaboración de este curso se benefició de la existencia de varios excelentes textos y actas de conferencias especializadas, que se indican en las Referencias. También expone las experiencias del grupo de estudios de geoquímica y gestión ambiental del Departamento Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena. Quienes integramos el Grupo hemos tenido el beneficio del conocimiento y la amistad de especialistas de universidades de Polonia, España, Alemania y Argentina, con quienes hemos colaborado desde mediados de la década de los `90. Actualmente, esa colaboración se ha extendido a Inglaterra, Portugal, Perú y Bolivia, a través del Proyecto CAMINAR de la Comisión Europea, desarrollado en Chile por CAZALAC, La Universidad de La Serena y CEAZA. Igualmente hemos contado con la valiosa colaboración de servicios públicos, cómo la Dirección General de Aguas y de varias

empresas mineras. Con ellos hemos compartido la convicción de que el conocimiento y la cooperación son esenciales como base de una buena gestión en materias de tanta complejidad como las que nos interesan.

A diferencia de otras industrias, en minería no es posible decidir la ubicación del yacimiento a explotar, como tampoco las características de sus minerales, de su macizo rocoso, de su hidrología etc, algunas de las cuales nunca llegan a ser conocidas ni comprendidas satisfactoriamente. Por otra parte esas características varían a través del yacimiento y en cierta medida también cambian en el tiempo (por ejemplo, al intensificarse la fracturación y meteorización por efecto de la misma explotación). Sin embargo, si bien no es posible determinarlas y es difícil llegar a comprenderlas satisfactoriamente, es necesario llegar a tener la mejor comprensión posible y utilizarla efectivamente.

Finalmente, esperamos que este curso resumido pueda ser de alguna utilidad para los estudiantes y graduados de nuestras carreras de pregrado y de nuestros programas de postítulo y postgrado, así como para quienes se interesan por hacer de la minería una actividad plenamente responsable frente a la actual y a las próximas generaciones.

## Capítulo 1: Cierres y Planes de Cierre Mineros (PCM)

### 1.1: Diferencias entre un Cierre y un Cierre Planificado.

A diferencia de una explotación agrícola, una de carácter minero está limitada en el tiempo, aunque ese límite puede ser difícil de establecer. Una explotación minera puede cerrar temporal o definitivamente por razones como las siguientes:

- Agotamiento de las reservas económicas conocidas.
- Baja en la demanda/precios de los metales o minerales explotados.
- Mal manejo financiero de la empresa.
- Problemas geotécnicos/hidrológicos graves.
- Conflictos laborales prolongados.
- Conflictos de origen político (guerra civil, incautaciones, etc.).
- Cambios en la legislación (en particular la relativa a impuestos).
- Restricciones vinculadas al ambiente y otras materias.

Estas causales pueden coincidir en el tiempo o encadenarse en redes causa-efecto. El primer caso se ejemplifica en el Distrito Punitaqui (Región de Coquimbo, Chile), que sufrió en 1997 los efectos casi simultáneos de un sismo y una inundación, que dañaron antiguas y ya deterioradas labores. Ello coincidió en una penuria de reservas económicas y con el desplome del precio del oro, su principal producto, lo que obligó a la empresa (Cía. Minera Tamaya) a cesar su explotación. Respecto al segundo, es obvio que una baja en los precios de sus productos puede llevar a dificultades financieras, que a su vez conduzcan a conflictos laborales, etc.

Por otra parte, todas las causas señaladas pueden ser revertidas. En el ejemplo del yacimiento de hierro Los Colorados (Región de Atacama, Chile), de Cía. Minera del Pacífico, el deslizamiento de una pared llevó al cierre de una explotación de mediano tonelaje y limitadas reservas. Sin embargo, posteriores estudios geofísicos y sondajes (= sondeos) mostraron su conexión con un cuerpo mucho mayor de alta ley, lo que llevó a la apertura de una nueva explotación. De ahí que es difícil asegurar que el cierre de la explotación de un yacimiento o distrito sea definitivo.

Cuando se produce el simple cierre de una explotación se puede desencadenar un enorme deterioro en el ambiente físico, biológico y humano de su área de influencia. Ello ha ocurrido muchísimas veces en el pasado, e incluso en el pasado reciente y en países desarrollados. Es el caso de Summittville, Colorado, distrito aurífero del Siglo 19, reabierto en 1984 por la empresa canadiense Galactic Resources. Después de repetidos errores de ingeniería que desencadenaron una extensa contaminación por drenaje ácido, la que llegó a amenazar las pilas de cianuración (lo que implicaba el riesgo de generación de HCN), la empresa se declaró en bancarota en 1992, obligando a la intervención federal.

En términos físicos, el cierre no programado ni ejecutado responsablemente, puede llevar a efectos como los siguientes:

- Desplome de labores superficiales y subterráneas.
- Erosión de los depósitos de desechos sólidos mineros.
- Perturbación del drenaje superficial y subterráneo.
- Generación de drenaje ácido con metales pesados.
- Contaminación del agua y la atmósfera (material particulado).
- Incremento de procesos erosivos y de remoción en masa.

Las perturbaciones señaladas pueden afectar gravemente el ambiente biológico, por ejemplo, a través de la contaminación del drenaje, que se acidifica y se carga de metales pesados y de material particulado, produciendo mortandad de peces; del efecto de los suelos contaminados sobre la cubierta vegetal; del desencadenamiento de procesos erosivos, etc. Ello, aparte del riesgo que implican las cavidades mineras para la fauna mayor.

En cuanto al ser humano, experimenta el efecto de todos los factores anteriores, más aquellos de carácter socio-económico y cultural. La pérdida de la actividad minera (que por otra parte, pudo haber afectado el desarrollo de otras actividades económicas previas a su implantación) puede destruir no solamente el sustento económico sino también la base de valores sociales y familiares de la comunidad afectada. Ello es especialmente grave cuando la identidad del padre de familia está construida en torno a su oficio de minero, y en consecuencia se siente degradado al aceptar un trabajo alternativo (reacción característica, pero



no exclusiva, del minero del carbón). Cómo en el caso del cierre de las minas de carbón de Lota – Coronel – Arauco en Chile, esta situación puede persistir aún décadas después del cierre de la actividad.

Naturalmente, el objetivo esencial de un cierre programado, bien planificado, ejecutado y controlado después de su realización, es prevenir, mitigar y revertir esos efectos dañinos. Ello implica que la idea del cierre debe estar presente desde la etapa de evaluación de la posible explotación de un yacimiento. Debe acompañar el diseño de las labores y la selección de las tecnologías a utilizar, y desde luego, lo referente a la localización de los trabajadores y sus familias (actualmente se prefiere disponer sólo de alojamientos para los trabajadores en lugar del proyecto). La Evaluación de Impacto Ambiental debe considerar el cierre de la explotación, pero sólo en sus aspectos centrales y esenciales (porque es muy difícil saber como evolucionará). Por otra parte, el cierre debe realizarse paralelamente a la explotación, de manera de dejar para el momento final lo menos que sea posible. Si hay comunidades cuya vida económica y laboral está fuertemente ligada a la explotación, es necesario que se estudien y desarrollen en conjunto actividades económicas alternativas. Este es un aspecto central a desarrollar como parte de la Responsabilidad Social Corporativa de la empresa minera.

En suma: Un PCM está destinado a evitar los posibles traumas que implicaban los antiguos cierres de explotaciones mineras. Ello, tanto en términos de un acrecentado daño ambiental como en sus efectos económicos y sociales sobre las comunidades situadas en el área de influencia de la explotación. Esto incluye lo referente a eventuales daños a otras actividades económicas desarrolladas o posibles de desarrollar en dicha área de influencia.

## **1.2: Objetivos Específicos de un PCM.**

Un PCM debe cumplir al menos con los siguientes objetivos específicos:

- Asegurar el cumplimiento de leyes y normas que regulan el cierre minero, así como de los compromisos corporativos asumidos por la empresa.

- Asegurar el cierre y estabilidad de las labores mineras superficiales y subterráneas.
- Prevenir la erosión, remoción en masa y subsidencia asociadas a los efectos de la explotación minera realizada.
- Estabilizar y proteger los desechos sólidos producto de la explotación minera.
- Resolver satisfactoriamente lo relativo a suelos contaminados en el área de la explotación, así como a depósitos de residuos peligrosos y no peligrosos enterrados en ella.
- Restaurar en lo posible la hidrología original del sitio o al menos una red hidrológica estable.
- Prevenir la generación de drenaje ácido y, si es necesario, tratarlo para reducir su acidez y contenido metálico a niveles legal y ambientalmente aceptables.
- Establecer la financiación requerida por el PCM, así como su distribución en el tiempo, y las fuentes y mecanismos que lo proveerán.
- Asegurar el cumplimiento de las condiciones requeridas para que el sitio intervenido recupere sus cualidades para el desarrollo de la vida silvestre, o permita el de nuevas actividades humanas.
- Procurar que el cierre de la explotación implique el menor grado posible de efectos socio-económicos negativos para los trabajadores y la comunidad situada en su área de influencia económica y laboral.
- Establecer las medidas necesarias de seguimiento y control de los resultados del PCM

### 1.3: Plan de Cierre y Ciclo de Vida de una Explotación Minera.

El concepto de Ciclo de Vida es utilizado en la evaluación de los aspectos e impactos ambientales de un producto, desde su manufactura a su disposición o reciclaje al final de su vida útil. Análogamente, se puede aplicar al análisis de los costes y beneficios ambientales de un proyecto minero, desde su etapa de exploración hasta la de su post-cierre (van Zyl et al, 3: 217-273). La utilidad de este enfoque radica en la visión global del proyecto, que permite la toma de decisiones que consideran los costes, beneficios y riesgos económicos y ambientales que ellas implican. Dichas decisiones son a su vez evaluadas en términos de su adecuación a los problemas, alternativas consideradas, consecuencias, pros y contras, incertidumbres involucradas, riesgos aceptados y relación consistente con otras decisiones.

Lo antes señalado es importante porque por ejemplo determinada decisión tecnológica coste-eficiente puede implicar en la etapa de cierre gastos mayores que los que ahorró anteriormente.

Entre las materias principales a considerar en esta aproximación, van Zyl et al señalan las siguientes:

- Base de conocimientos disponibles del ciclo de vida de la mina.
- Costes implicados en las etapas del ciclo de vida.
- Tecnologías de protección ambiental disponibles.
- Participación de la comunidad.
- Políticas y decisiones.

Ellas deben ser manejadas en el marco de un enfoque de evaluación de riesgos, que dé una perspectiva más amplia de los costes y beneficios de cada decisión analizada.

Un aspecto importante a considerar (Warhurst y Noronha, 2: 13-31) es el referente al flujo de caja de una explotación minera a lo largo de su vida. Como es lógico, dicho flujo es negativo durante la etapa de exploración y desarrollo, así como en la etapa de cierre. Por lo tanto, conviene aprovechar la etapa de producción tanto para invertir en labores de cierre factibles en esa etapa, como para establecer provisiones de fondos para la etapa final.

## **Capítulo 2: Evaluación de Impacto Ambiental, Sistemas de Gestión Ambiental y Planes de Cierre de Minas.**

### **2.1: Consideración del Cierre en la Etapa de Evaluación del Impacto Ambiental de un Proyecto Minero.**

Desde luego, el tema del cierre del proyecto minero y la calidad ambiental y sustentabilidad (= sostenibilidad) del futuro ecosistema son materias de importancia al realizar su EIA (Estudio de Impacto Ambiental). Sin embargo, como señala Sassoon (2: 101-116) esa evaluación es generalmente un estudio “reactivo”, en el cual el ambiente es considerado “a posteriori”, después que el proyecto ha sido definido, diseñado y dimensionado. En esas condiciones, su principal utilidad es la de cumplir los requisitos legales para la aprobación del proyecto presentado. Ello lleva a que el estudio realizado sea olvidado, en lugar de llegar a ser una guía durante las etapas de construcción, operación, cierre y post-cierre del proyecto. Otro importante factor que colabora a esa negativa situación es la continua evolución de los proyectos mineros, cuyas características y dimensiones siguen de cerca los cambios de precios y de tecnologías, de manera que es muy difícil prever su situación en el también desconocido momento del cierre. Ello lleva a Sassoon a recomendar una mayor integración de la EIA (Evaluación de Impacto Ambiental = Estudio de Impacto Ambiental) al “Ciclo del Proyecto”, procurando una visión más completa de todas sus fases de desarrollo y de la consecuencia de las decisiones (de diseño, tecnología, etc.).

El mismo autor propone una visión más comprensiva del proceso de evaluación de impactos ambientales, la cual incluye:

- Asegurar que las decisiones que se adopten sean ambientalmente sanas y sustentables (= sostenibles).
- Asegurar que sus consecuencias ambientales sean identificadas tempranamente y consideradas en el diseño e implementación del proyecto.
- Realizar la EIA de manera que sirva efectivamente como una herramienta de gestión en la toma de decisiones.

- Realizar la EIA de modo que constituya una fuente de información para la construcción, operación, monitoreo y auditoría del proyecto minero.

Lo propuesto por Sassoon es consistente con la evaluación del “Plan de Vida de la Mina” que realiza la Cía. Río Tinto de Australia (Grimshaw, 3: 289-300). Dicha evaluación, realizada con fines internos de toma de decisiones, considera enfoques conceptuales básicos del proyecto, así como los órdenes de magnitud involucrados. En la etapa de factibilidad, se incluyen las estrategias y planes de manejo del cierre de la operación, en sus aspectos ambientales, sociales y económicos. El Plan de Vida de la Mina debe identificar los riesgos ambientales potenciales, los planes de mitigación y las soluciones técnicas más adecuadas.

En suma, al relacionar la EIA con el PCM, aparecen tres conclusiones principales, a saber:

- La EIA tradicional es tardía y solamente reactiva si el diseño del proyecto no integró un análisis y evaluación sólidos de los aspectos ambientales, incluidos los de la situación post-cierre (pese a todas las incertidumbres que ello involucra).
- Pese a lo anterior, no tiene sentido incluir detalles del plan de cierre en la EIA, puesto que es muy difícil (o imposible) prever la situación final de un proyecto minero de cierta complejidad y magnitud (Sassoon, op. cit).
- Sin embargo, la EIA sí debería incluir el análisis de los aspectos principales que involucrará el cierre. Entre ellos están los relativos a drenaje ácido, estabilidad futura del paisaje (respecto a erosión, remoción en masa y subsidencia) y restablecimiento del sistema hidrológico. Ellos han representado los mayores costos ambientales de proyectos mineros y pueden ser evaluados tempranamente. En cambio, es difícil que las mejores medidas de cierre logren controlarlos cuando el clima, la topografía, la geología y la mineralogía son desfavorables.

## **2.2. El Plan de Cierre Minero y el Sistema de Gestión Ambiental.**

Un buen Sistema de Gestión Ambiental (SGA) debe considerar en su diseño, implementación y operación, las informaciones y recomendaciones entregadas por la EIA (ojalá científica y técnicamente sólido, pertinente y honesto) y por su proceso de evaluación. Puesto que dicho estudio tendría que considerar los aspectos esenciales concernientes al futuro cierre (2.1), ellos deberían ser naturalmente incorporados a la operación del SGA, en particular en la fijación de sus objetivos y metas. Por otra parte, ello debería ocurrir naturalmente en el contexto de un cierre progresivo, donde se va asegurando el cierre estable de labores mineras, depósitos de desechos sólidos, etc., que no se utilizarán en el futuro.

Por otra parte, el SGA debería prestar especial atención a los signos precoces de problemas que dificultarán el futuro cierre, como la aparición o incremento de drenaje ácido, la intensificación de la erosión, etc. También es necesario que analice con perspectiva las soluciones del tipo “déjelo debajo de la alfombra”, porque ellas complicarán y encarecerán el cierre final (esas soluciones pueden ser una tentación, cuando la propiedad de las empresas cambia de mano con demasiada frecuencia, como ocurre en la actualidad).

## Capítulo 3: **El Diagnóstico Global del Sitio y los PCMs.**

### 3.1: **Diagnóstico de los Factores Físicos y Biológicos.**

Los factores físicos del área de influencia del proyecto constituyen un control decisivo respecto a sus consecuencias ambientales. De ahí que deben ser el primer elemento a considerar en el Diagnóstico Global del sitio, ya sea en una etapa temprana de factibilidad del proyecto minero como al enfrentar un plan de cierre en una etapa tardía de la explotación, al acercarse el fin de su vida útil. El problema de la segunda alternativa es que ya puede ser demasiado tarde para resolver los problemas ambientales más graves generados por la explotación realizada.

En la conocida obra “Collapse”<sup>1</sup> de J. Diamond (2005) pp 454-468 se relatan los efectos de la minería de pórfidos de cobre-oro realizada en Nueva Guinea y en los arcos de islas volcánicas vecinos del Pacífico Occidental (Ok Tedi, Grasberg – Ertsberg, Panguna), así como de la minería polimetálica del Estado de Montana (USA). En el primer caso se trató de notables hazañas de la ingeniería de minas, que logró la explotación de yacimientos ubicados en las cumbres de montañas rodeadas de laderas abruptas y cubiertas por bosques de lluvia, con precipitaciones anuales de miles de mm de agua. Si la explotación minera fue un éxito admirable por las dificultades vencidas, la degradación ambiental (erosión descontrolada, relaves vertidos directamente a los ríos) y sus consecuencias sobre la población nativa fueron desastrosos (y llevaron a una guerra civil en el caso de Panguna, en Bougainville, con el coste de miles de vidas). En esas condiciones sería ilusorio hablar siquiera de un “Plan de Cierre”. En Ok Tedi, la presa de relaves colapsó, de manera que su contenido destruyó las pesquerías asociadas al río del mismo nombre, mientras enormes cantidades de sedimentos contaminados destruían la vegetación de la planicie aluvial y se iniciaba la liberación de cianuro.

Seguramente, un diagnóstico global de los factores físicos y biológicos del área intervenida habría mostrado tempranamente la

---

<sup>1</sup> Ed Viking, Nueva York, 575 p.

imposibilidad de realizar dichas explotaciones sin incurrir en tan elevados costes ambientales. Ese reconocimiento llegó recién en 2001, cuando BHP declaró que “la explotación de Ok Tedi no es compatible con nuestros valores ambientales y la compañía nunca debió haberse involucrado en ella”.

Una situación menos dramática pero que involucra elevados costes ambientales y económicos (para mantener los primeros dentro de ciertos límites), está dada por la herencia de la minería metálica en Montana, por su efecto en la generación de drenaje ácido. Así, en el caso de la mina de oro Zortman – Landusky, desarrollada por la Cía. Pegasus Gold, se han invertido ya US\$ 52 millones en el tratamiento de su drenaje ácido (la empresa fue a bancarrota después de pagar US\$ 32 millones). Se estima que 10 de las principales minas del Estado requerirán tratamiento de su drenaje ácido “por siempre”, incrementando el coste de su cierre por un factor de 100 sobre las estimaciones originales. Montana es un Estado reconocido por sus bellezas paisajísticas, sus ríos de aguas originalmente límpidas y pródigas para la pesca deportiva, sus bosques, etc. Sin duda un hermoso marco para la filmación de películas... pero también para la generación y propagación del drenaje ácido, que afecta recursos tan valiosos.

Los proyectos mineros surgen en toda clase de ambientes: en las cumbres de arcos de islas cubiertos de bosques de lluvia, como Bouganinville, en la sequedad de desiertos casi absolutos, como Escondida (al SE de Antofagasta, Chile), en los paisajes montañosos de Montana, en los fríos del Ártico o del NW de Canadá, etc. En cada caso, un diagnóstico oportuno permitirá evitar un fracaso económico o ambiental o bien diseñar operaciones de características y magnitud que hagan la operación rentable y garanticen que ella y su posterior cierre serán aceptables en términos ambientales. Igualmente, si la operación minera ya se realizó, es necesario efectuar ese diagnóstico para elaborar un plan que ofrezca garantías de sustentabilidad en el tiempo.

Al realizar tal evaluación, Welsh (3: 69-77) recomienda a los organismos reguladores centrarse en lo que “realmente importa” y desarrollar políticas y normativas apropiadas (que deberían ofrecer flexibilidad en el enfoque caso a caso). El autor citado estima especialmente importante verificar que se esté realizando una “minería



para el cierre”, así como prestar atención a los signos tempranos de deterioro que puedan afectar la estabilidad del futuro cierre.

Por otra parte, Welsh et al (3: 167-178) recomiendan a las empresas enfocar el cierre con una aproximación basada en la evaluación de riesgos. Ella considera factores como los posibles usos posteriores del sitio, la caracterización de los materiales presentes, los costes de rediseño del paisaje, las expectativas de la comunidad y los riesgos de falla de la rehabilitación. La metodología propuesta evalúa las posibles fallas en términos de sus consecuencias (entre insignificantes y mayores) así como su probabilidad de ocurrencia (de muy baja a casi segura). La combinación de ambas estimaciones lleva a clasificar los riesgos en Insignificantes (baja probabilidad y consecuencias), Menores, Moderados, y Mayores (alta probabilidad y consecuencias). Un análisis similar fue propuesto por Logan et al (3: 225-233), el que utiliza análisis multicriterios, análisis de riesgos y análisis coste-beneficios, basando los criterios de decisión en: a) requerimientos legales, b) políticas corporativas, c) riesgos potenciales, y d) objetivos deseables, llegando finalmente a un análisis coste-beneficio de las opciones posibles.

Naturalmente, el diagnóstico de cada sitio intervenido implicará una serie de factores a considerar, algunos de los cuales tendrán una importancia decisiva por ser características extremas como las montañas boscosas de Nueva Guinea. En un caso aparentemente opuesto, Reshetnyak y Fedotova (3: 735-741) reseñan los problemas de cierre de explotaciones mineras en el Ártico. Factores como temperaturas extremas, congelación – descongelación, agua en rocas, avalanchas de nieve, etc. se unen a la necesidad de proteger las aguas de la contaminación y a la extrema vulnerabilidad de la flora y faunas locales (cuya recuperación demanda largo tiempo). El mismo trabajo señala los efectos del cambio climático en regiones árticas, que se expresa en factores como la fusión del permafrost, que pueden complicar aún más el cierre de la mina (Al respecto, ver el caso Giant Mine, Yellowknife, en p 111). El mismo factor puede dificultar también el cierre de faenas en los Andes de Chile, donde el ascenso de la isoterma de la línea de nieve pronosticado por algunos modelos, provocaría crecidas y aluviones invernales.

### 3.2: Diagnóstico de los Factores Socio-Económicos y Culturales.

A diferencia de los factores físicos, que pese a los cambios climáticos tienen mayor permanencia, los de carácter socio-económico y cultural están sujetos a rápidos cambios, no siempre favorables. Igualmente, ellos deben ser considerados como variables básicas para evaluar la decisión de llevar a cabo el proyecto, así como para obtener su aprobación. En Chile, ello está asociado a la EIA mientras que en Perú y otros países latinoamericanos está llegando a ser una especie de permiso independiente (“Licencia Social”). Desde luego, sería erróneo desarrollar un proyecto contra la voluntad de las comunidades vecinas o generando una grave división al interior de ellas, aunque se cuente con el apoyo decidido del respectivo Gobierno, porque la política es muy volátil y el futuro incierto.

Iniciado el proyecto, se abre a la empresa una importante interrogante. ¿En qué grado le conviene asociar a la comunidad al desarrollo del proyecto? La empresa no puede actuar como una extraña: tanto la comunidad como el gobierno central esperan que se convierta en un oferente de empleos y un factor de desarrollo. Sin embargo, si la unión es muy estrecha, los conflictos gremiales pueden ser más graves y el cierre de la explotación más traumático y difícil. Por consiguiente, parece razonable adoptar una política que favorezca el desarrollo de actividades económicas complementarias durante la vida de la explotación minera. Esa acción de promoción y el apoyo a la educación que facilite tal diversificación económica, pueden ser un buen objetivo de la Responsabilidad Social Corporativa de la empresa. Un objetivo que, si es exitoso, facilitará el futuro cierre de la explotación en materias socio-económicas y culturales.

En suma: Las relaciones con las comunidades vecinas, así como con los centros locales de servicios a la minería, deberían manejarse de modo opuesto al estilo del pasado, donde la empresa era a la vez eje económico y centro de gobierno. La situación ideal es la de una comunidad activa y autosuficiente, con economía diversificada, capaz de adaptarse al cierre del proyecto minero, pese a las dificultades que éste genere inicialmente. Si esa situación no existe al inicio del proyecto, su vida útil es el lapso con que cuenta la empresa para lograrlo.

## Capítulo 4: Drenaje Ácido. Predicción y Prevención

### 4.1: Predicción de la Generación de Drenaje Ácido.

La producción y migración de drenaje ácido es el problema más grave que enfrenta el cierre de faenas mineras. Ello, porque no solamente afecta al sitio de la explotación, sino que tiene la capacidad de llevar el daño hasta decenas o cientos de km de distancia, afectando al recurso más valioso: el agua. Aunque la acidez por sí misma afecta los ecosistemas y cultivos, así como los usos del agua, su efecto más grave radica en que facilita el transporte de metales pesados, contribuyendo a su dispersión desde los yacimientos. Aunque este problema puede estar presente en la etapa de explotación, el control del drenaje mediante bombeo y la estabilidad de las instalaciones permite mantenerlo bajo límites aceptables. En cambio, al cesar la explotación el agua puede invadir las labores subterráneas, que se deterioran progresivamente, generando una situación difícil o imposible de manejar.

Para comprender la razón de ser de este fenómeno conviene partir de lo más básico: el hecho de que el agua pura presenta un muy bajo grado de disociación en  $H^+ + OH^-$ , llegando el producto de sus concentraciones a  $10^{-14}$  moles/L. Puesto que cada molécula de agua disociada produce un  $H^+$  y un  $OH^-$ , su reacción es neutra. Cuando predominan los iones  $H^+$ , se dice que el agua es ácida, cuando los  $OH^-$ , alcalina. El pH se define como el logaritmo con signo negativo de la concentración de  $H^+$ . Si el agua es neutra será 7.0; si es ácida, menor que 7.0. La acidez del agua, si es moderada, no es dañina. Por ejemplo, el agua gasificada (y las gaseosas en general) tienen un pH del orden de 3.5. Sin embargo, el mismo pH en el agua de una mina podría ser muy peligroso, por la concentración de cobre, zinc y otros metales que se presentan disueltos en esas condiciones.

Dos reacciones principales controlan el pH de las aguas naturales: la primera corresponde a la hidrólisis de los silicatos, principales minerales de las rocas. Cuando estos se meteorizan en ausencia de acidez, la reacción da lugar a una base (hidróxido) fuerte, vale decir, disociada, y a un ácido débil, no disociado:  $MgSiO_3 + 2H_2O = Mg^{2+} + H_2SiO_3 + 2OH^-$ .

En consecuencia, este proceso genera alcalinidad del agua, esto es, valores de pH superiores a 7.0, debido a los grupos  $\text{OH}^-$  que libera.

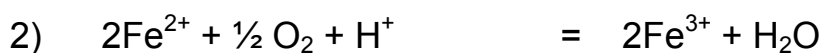
La segunda reacción es la de  $\text{CO}_2$  con  $\text{H}_2\text{O}$ , que produce  $\text{H}_2\text{CO}_3$  parcialmente ionizado en  $\text{H}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ )

Puesto que esta reacción libera  $\text{H}^+$ , tiende a comunicar al agua una moderada acidez. El  $\text{CO}_2$  está naturalmente presente en la atmósfera. Además es liberado por la respiración de animales y plantas, y por la descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno.

De lo expuesto se deduce una “competencia” entre dos reacciones que conducen a resultados opuestos. En clima húmedo, en presencia de abundante vegetación como en el sur de Chile, predomina el efecto de la segunda y tanto los suelos como las aguas de ríos y lagos son moderadamente ácidos. En cambio, desde el centro al norte del país, su aridez o semiaridez conlleva el dominio de la primera, confiriendo a las aguas y suelos una reacción de moderada a mediana alcalinidad. Como veremos más adelante, ello contribuye a limitar en gran medida los efectos del drenaje ácido, los que podrían ser muy graves si nuestros grandes yacimientos se situaran en el sur del país.

El principal mineral responsable de la generación de drenaje ácido de minas (o yacimientos no explotados) es pirita:  $\text{FeS}_2$ . Ello, debido a que su fórmula incluye un átomo de azufre “extra”, que al oxidarse en presencia de agua da lugar a la formación de ácido sulfúrico. La pirita es un mineral frecuente y abundante, no solamente en yacimientos metálicos sulfurados, sino también en los de carbón, donde se ha formado por reducción de sulfatos en el mismo ambiente pantanoso.

La producción de drenaje ácido por oxidación de pirita tiene su complemento en la hidrólisis del sulfato férrico, también generadora de  $\text{H}^+$ . Aunque principalmente ocurre en presencia de oxígeno y es acelerada por acción bacteriana, igualmente puede tener lugar en ausencia de ambos factores, como lo indican las ecuaciones siguientes:





Las primeras dos ecuaciones ocurren en ambiente oxigenado. La primera implica la oxidación de pirita con liberación de  $\text{H}^+$  y la segunda, la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ . La tercera reacción es hidrolítica, puede ocurrir o no en presencia de oxígeno y libera más  $\text{H}^+$ . Por último, la cuarta reacción implica la oxidación de pirita por acción de  $\text{Fe}^{3+}$ , con liberación de  $\text{H}^+$ . Es muy importante, porque puede ocurrir en ausencia de oxígeno, vale decir, en niveles de la mina protegidos respecto al acceso de ese elemento.

Mitchell (2: 117-143) presenta un claro y completo resumen de los distintos aspectos relativos al drenaje ácido. El autor citado reseña su persistencia (siglos – tal vez milenios) y los enormes volúmenes generados, cuando el clima, la topografía y la extensión y densidad de labores subterráneas lo favorecen (unos 70 millones de litros/día, en un solo distrito de Cornwall, UK). Al respecto, en el distrito de El Indio, en los Andes de Coquimbo, Chile, el drenaje ácido precedió a la explotación minera de oro-cobre-arsénico y se han encontrado elevadas concentraciones de los tres elementos y sulfato aguas abajo del distrito, en niveles sedimentarios datados en  $9640 \pm 40$  años (Oyarzun et al, 4).

Las principales fuentes de generación de drenaje ácido son:

- Labores subterráneas
- Acopios de estériles o Minerales económicos
- Rajos abiertos (= cortas)
- Pilas de lixiviación
- Vertientes naturales
- Depósitos de relaves

En el caso de las labores subterráneas, el agua superficial oxigenada accede al macizo rocoso a través de infiltraciones favorecidas por su permeabilidad primaria, pero especialmente por estructuras como diaclasas, fallas o fracturas de subsidencia. Al respecto, un macizo rocoso presenta una ilusoria apariencia de solidez, cuando normalmente está cruzado por estructuras a todas las escalas. En consecuencia, poco se logra cerrando los accesos principales a las labores mineras subterráneas cuando existe fuerte fracturación, agua abundante y

gradientes hidráulicos favorables al flujo subterráneo. Por otra parte, es normal que los yacimientos metalíferos se formen justamente en macizos altamente fracturados, y que su explotación incremente mucho la fracturación inicial.

Puesto que la generación de drenaje ácido ocurre en la interfase roca mineralizada/agua, la multiplicación de la superficie por efecto de la minería subterránea genera un efecto comparable al del crecimiento exponencial de la superficie interna del carbón activado. En yacimientos medianos, las labores pueden alcanzar cien o más km, y varios miles en los depósitos mayores, lo que implica enormes superficies de contacto.

La superficie expuesta es comparativamente menor en un rajo abierto, pero la exposición directa de las paredes a la atmósfera incrementa la velocidad del proceso.

Al cierre de su explotación, los rajos (= cortas) pueden albergar pequeños lagos y se convierten en especies de reactores químicos donde ocurren reacciones de oxidación, hidrólisis, precipitación, etc. El agua que accede a ellos, superficial o subterráneamente, participa en esas reacciones y a su vez el sistema alimenta – y contamina – el drenaje subterráneo. Sin embargo, los rajos inundados pueden ser utilizados para tratar el drenaje ácido. Esper et al (3: 603-611) describen esta situación, así como el uso del modelo PHREEQC como predictor de la evolución química del sistema.

Los depósitos de estériles ricos en piritita y los acopios de minerales sulfurados, presentan especial facilidad para la generación de drenaje ácido por su elevada permeabilidad, así como por el incremento de superficie que implica el hecho de que la roca se encuentre ahora formando bloques de escala decimétrica. Williams y Rhode (3: 521-532) enfatizan la facilidad de generación y liberación de drenaje ácido desde estos depósitos, tanto durante la operación de la explotación como después de su cierre, y recomiendan aplanar el techo de la pila y cubrirlo con un material que impida o limite la percolación de agua. En el caso de los depósitos de relaves, el crecimiento de la superficie específica es aun mucho mayor. Sin embargo, ello es contrapesado por la menor permeabilidad del material, lo que retarda la velocidad del proceso.

Williams (3: 533-542) estima que este problema puede ser remediado en gran medida depositando los relaves tan secos como sea posible.

El tema de las pilas de lixiviación ácida de minerales de cobre y su posible efecto contaminante fue tratado por Dixon et al (3: 571-576) y por Rivera et al (3: 565-570). Los primeros consideran las pérdidas de soluciones ácidas desde las pilas de lixiviación, en las cuales la actividad bacteriana continúa generando soluciones ácidas ricas en cobre mucho después de concluida su irrigación, lo que debe ser considerado en los planes de cierre. Los segundos, se refieren a la responsabilidad ambiental que implican las acumulaciones cristalinas de sulfatos de aluminio y magnesio en la base de las pilas de lixiviación, cuya magnitud estiman en cifras muy elevadas.

En términos de predicción, la generación de drenaje ácido debe considerar tres aspectos principales, a saber:

- Predicción del potencial químico de generación de drenaje ácido.
- Evaluación del potencial hidrogeológico para el acceso y conducción de las soluciones.
- Predicción del contenido metálico del drenaje ácido y del efecto de su posterior neutralización.

Respecto al primer punto, existen tanto criterios generales a considerar en la evaluación, como tests específicos de laboratorio. Esencialmente se trata de confrontar el potencial de generación de acidez con la capacidad de neutralización de las rocas y los minerales de ganga. En materia de tests, éstos se clasifican en estáticos y dinámicos. Los primeros son más sencillos, rápidos y fáciles de interpretar, pero sus resultados son menos confiables que los de tipo dinámico. En cuanto a los criterios geológico-geoquímicos, es evidente que la presencia de rocas carbonatadas implica una alta capacidad de neutralización. En cambio, se tiende a pasar por alto la capacidad neutralizadora de las rocas silicatadas (Oyarzún: 6; Oyarzun et al 7), probablemente por la dificultad de incluirla en los tests, dada la mayor lentitud de las reacciones. Esa capacidad es máxima en las rocas máficas poco alteradas o con alteración potásica o propilítica, decrece en las rocas con alteración sericítica y es nula en las rocas afectadas por alteración argílica.

Desde luego, la riqueza en pirita de la roca y de la mena será un criterio de mayor potencial de drenaje ácido, mientras la presencia de calcita favorecerá su neutralización.

Respecto a la evaluación hidrológica e hidrogeológica, factores como el clima (precipitaciones, temperaturas), la topografía (que influye en el gradiente hidráulico) y el grado de fracturación del macizo rocoso, son los principales factores a considerar. El volumen de precipitaciones juega al respecto un rol complejo. Si es muy escaso, el fenómeno tendrá poca extensión y si es demasiado abundante, se favorecerá la dilución del drenaje ácido generado. En consecuencia, la situación intermedia presenta los mayores riesgos.

Finalmente, respecto al contenido metálico del drenaje ácido, éste dependerá de la mineralogía de la mena así como de la química de los metales pesados que ésta contiene. Metales como cobre, zinc, cadmio, etc., son solubles en soluciones ácidas sulfatadas. En cambio, es afortunado que el sulfato de plomo presente un bajo producto de solubilidad. Cuando el drenaje superficial ácido es atenuado por mezcla con aguas de pH mayor, su contenido metálico es transferido a los sedimentos finos, un caso muy bien ilustrado por el efecto del distrito de El Indio en aguas y sedimentos de la cuenca del Río Elqui (Guevara et al: 8; Oyarzún et al: 18).

#### **4.2: Prevención de la Generación del Drenaje Ácido.**

Respecto a la prevención del drenaje ácido, existe una variedad de metodologías, que pueden agruparse como sigue:

- Explotación selectiva del yacimiento (dejando sin intervenir los sectores con mayor potencial de drenaje ácido).
- Construcción de pantallas y sellado con hormigón para aislar sectores de mayor riesgo.
- Sellado de faenas abandonadas y de sondajes (= sondeos).
- Modificación del drenaje superficial o subterráneo.
- Uso del agua como aislante, por ejemplo en un rajo abierto (= corta) ya explotado.



- Conducción de aguas contaminadas a piscinas de tratamiento.
- Uso de bactericidas.
- Uso de compuestos inorgánicos que generen una cubierta aislante sobre pirita y otros sulfuros.
- Depósito segregado del estéril con alto potencial de drenaje ácido.
- Depósito conjunto de estériles con potencial de drenaje ácido y estériles con potencial neutralizador.
- Cubiertas sintéticas, revegetación y materiales con capacidad reductora sobre desechos sólidos mineros.

El tema del drenaje ácido en sus diferentes aspectos (predicción, prevención y tratamiento) ha sido y es motivo de numerosos estudios científicos y técnicos, así como de proyectos y asociaciones internacionales. Entre ellas está la International Mine Water Association, que publica la revista "Mine Water and the Environment", muchos de cuyos artículos están dedicados a esta materia. Otra importante iniciativa es el Programa MEND, que ha realizado una serie de proyectos y publicaciones sobre el tema. Ellas incluyen el 5.4.2. Mend Manual, que describe más de 200 tecnologías que cubren el campo completo: muestreo, análisis, predicción, prevención, tratamiento y monitoreo de drenaje ácido. Otro manual, Mend 2.21.4 cubre el diseño, construcción y monitoreo de cubiertas para proteger depósitos de residuos sólidos mineros. Además, ofrece 3 CD Roms, con 160 documentos técnicos (su sitio web es: <http://mend.nrcan.gc.ca>).

En suma: la generación de drenaje ácido constituye uno de los problemas más serios que enfrentan las explotaciones mineras y una dificultad que puede llegar a ser imposible de resolver en un cierre minero (salvo mediante tratamiento a perpetuidad). Sin embargo, hoy se dispone de excelente información para enfrentar el difícil problema que implica.

## Capítulo 5: **Técnicas de Tratamiento del Drenaje Ácido**

### 5.1: **Tratamiento del drenaje ácido en Operaciones de Explotación y de Cierre.**

Reiteremos la idea básica de este curso: Un plan de cierre exitoso (efectivo, sustentable a largo plazo, de costes moderados) se basa en una explotación bien realizada, que introduce los riesgos ambientales en la evaluación coste-beneficio de sus decisiones. A su vez, esa explotación consideró en su diseño, magnitud, selección de tecnologías, etc. los resultados de una efectiva evaluación de impactos ambientales (no una realizada a posteriori respecto a las decisiones básicas, con el único objeto de obtener la aprobación de la autoridad política).

Lo anterior es de especial pertinencia respecto al problema del drenaje ácido, que como hemos señalado antes, puede “ser para siempre” a la escala humana (con costes totales fuera de todo orden lógico, aunque al fin terminen siendo asumidos por el Estado – vale decir por todos).

También la necesidad de tratar el drenaje ácido puede surgir durante la explotación minera, incluso en etapas tempranas de algunos tipos de yacimientos. Al respecto, requieren especial cuidado los de tipo epitermal “ácido-sulfático”, situados en zonas montañosas y cuya red de drenaje los conecta con ríos importantes, pero cuyo caudal es moderado (lo que favorece la concentración de metales pesados y dificulta la dilución de la acidez). En esos yacimientos, ejemplificados por Summittville, Colorado (USA) y por El Indio y Pascua-Lama (este último en la frontera chileno-argentina), las rocas encajadoras del depósito no solamente carecen de capacidad neutralizante sino que se convierten ellas mismas en generadoras de acidez. Naturalmente, al decidir su explotación, el tema del drenaje ácido deberá considerarse en el diseño de sus instalaciones en todos sus aspectos, desde la prevención al tratamiento de las soluciones.

El artículo antes citado de Mitchell (2: 117-143) presenta una excelente síntesis de las técnicas de tratamiento de drenaje ácido. También este tema ha sido tratado extensamente por el proyecto –

consorcio MEND, así como en numerosos artículos de la revista Mine Water and the Environment y en otros trabajos citados en el presente capítulo.

En la descripción de las metodologías de tratamiento seguiremos la clasificación propuesta por Mitchell (op. cit), complementada con la del ITGME (= IGME) (2; 1989) y la información entregada por otros trabajos (3; 2007).

**- Sistema de Tratamiento Activo:** Básicamente corresponden al uso de cal u otro neutralizante, precedido o acompañado de aireación (u otro oxidante más energético) para facilitar la precipitación de Fe y Mn a un pH menor. A este respecto, Tsukamoto y Vásquez (3: 593-602) proponen el uso de un reactor cilíndrico rotatorio, económico tanto en requerimiento de espacio como de energía.

Las reacciones básicas de estos sistemas son:

- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{FeSO}_4 = \text{Fe(OH)}_2 + \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$
- $3\text{Ca(OH)}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 = 2\text{Fe(OH)}_3 + 3\text{Ca}^{2+} + 3\text{SO}_4^{2-}$

Los metales presentes pueden precipitar con las distintas fases sólidas (sulfatos, hidróxidos, carbonatos, arseniatos, etc.). Al respecto, Loomer et al (3: 829-838) destacan el riesgo que presentan los barros resultantes del proceso, cuyo pH es superior a 9, si un posterior descenso de pH permite la redisolución de los metales pesados que contiene (Cu, Zn, Cd, etc.).

Entre los beneficios de la tecnología, Mitchell destaca:

- Economía de espacio.
- Facilidad para enfrentar cambios de composición y flujo del drenaje ácido.
- Los cambios de temperatura afectan poco al proceso.
- El Método es efectivo, incluso con aguas altamente ácidas.
- Se trata de una tecnología bien conocida y probada.

En cambio, implica limitaciones y algunos problemas cómo:

- Necesidades altas de mantención del equipo (efecto sales).
- Si el pH se eleva con el objeto de precipitar manganeso, otros metales pueden formar compuestos solubles (p.ej.,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  puede formar un aluminato soluble).
- Los barros son inestables, y los metales que contienen pueden redisolverse al disminuir o al aumentar su pH (ver Loomer, op. cit.).
- La disposición de los barros es complicada. Poseen un elevado contenido de agua, cuya eliminación es muy costosa, ya sea económica o ambientalmente (según el procedimiento seleccionado).
- La eventual recuperación de metales pesados valiosos de los barros no es económica con las actuales tecnologías.

Se han desarrollado variables más efectivas del método de neutralización, que permiten la obtención de barros con mayor contenido de sólidos (10 – 30 %, contra 2% del método tradicional). Ellos requieren el uso de reactores y una mayor inversión de capital, pero incluso así resultan más económicos que otras alternativas, como las de extracción bioquímica.

**- Sistemas de Tratamiento Pasivo.** La construcción de humedales artificiales procura reproducir los mecanismos naturales de precipitación y fijación de metales pesados, así como de neutralización de la acidez que actúan en esos ecosistemas. La actividad bacteriana anaeróbica juega un rol importante en ellos, a través de mecanismos como la disminución de la acidez a través de la reducción del sulfato a sulfuro y la capacidad de este último ion para precipitar sulfuros de los metales pesados. Por otra parte, la materia orgánica junto con la fracción arcillosa, favorece la adsorción de metales, colaborando a purificar las soluciones.

Comparados con los métodos activos, los humedales artificiales requieren una mayor superficie, pero usan materiales de menor coste (como desechos orgánicos) y demandan menos mantención y atención.

Normalmente operan conforme a una serie de unidades, que realizan distintos procesos:

- Lagunas anóxicas: reducen oxígeno y disminuyen acidez ( $\text{SO}_4^{2-}$  -  $\text{S}^{2-}$ )
- Intercepciones de drenaje anóxicas con caliza (reducen acidez y oxígeno).
- Celdas aeróbicas vegetales, que remueven Fe y Al como hidróxidos.
- Celdas anaeróbicas, ricas en materia orgánica. Pueden o no estar vegetadas. Convierten  $\text{SO}_4^{2-}$  en  $\text{S}^{2-}$ , que precipita metales pesados.
- Filtros de roca: sustrato para crecimiento de algas y bacterias Mn-oxidantes.

Entre los beneficios de este método están:

- Bajos costes de capital, operación y mantención.
- Las celdas anaeróbicas pueden utilizar desechos orgánicos problemáticos (p.ej., vinazas, barros de aguas residuales, etc.).
- Pueden albergar especies silvestres.

Sus limitaciones y aspectos negativos comprenden:

- Requieren grandes extensiones de tierra.
- Están afectados por los cambios estacionales.
- Requieren años o décadas para alcanzar su régimen estable.
- No operan indefinidamente.
- Su impacto final en el contenido metálico local y en la cadena alimenticia regional es aún desconocido.
- Se pueden producir remociones de metal del humedal (*wetland*) al drenaje si las características y flujo de drenaje ácido exceden su capacidad.
- El material del humedal se puede convertir en sí mismo en un residuo peligroso al fin de su vida útil (unos 25 años).

Considerando los aspectos recién reseñados, Mitchell sugiere que el uso de esta tecnología es más apropiado cuando se requieren

tratamientos a largo plazo de soluciones que poseen bajas concentraciones de contaminantes.

**Tratamiento Pasivo *in situ*.** Consiste en distintos tipos de operaciones, como excavar en parte del acuífero contaminado, reemplazando el material por una mezcla reactiva permeable, que actúa como barrera química. Si ésta incluye carbono orgánico, puede contribuir a la acción anaeróbica sulfato-reductora. Mc Cartney et al (3: 577-582) proponen una variante denominada “atenuación natural”, consistente en infiltrar efluentes líquidos a través de tuberías, para aprovechar reacciones químicas en la zona vadosa (vale decir, sobre el nivel freático del agua subterránea). El procedimiento se ha utilizado en Nevada (USA) para tratar efluentes líquidos neutros o ligeramente básicos de las pilas de lixiviación aurífera con cianuro. En condiciones de clima, hidrogeología y materiales de relleno favorables (limo-arcillosos, ricos en óxidos de Fe y materia orgánica) se han logrado disminuciones de 94 a 100 % en los contenidos de Al, Sb, As, Cd, Cr, Cu, Ni y CN de las soluciones.

**Métodos Híbridos (Activos – Pasivos).** Estos utilizan procesos biológicos para reducir acidez y remover metales del drenaje ácido. Sin embargo, lo hacen en reactores artificiales. Se clasifican en:

- **Rejillas Bacterianas:** Diferentes tipos de bacterias autótrofas (cianobacterias dominantes) implantadas en un substrato inorgánico remueven metales de la solución. El procedimiento parece ser viable y de bajo coste, así como adaptable a distintas composiciones de la solución (variando la asociación bacteriana).
- **Birreactores:** Se diseñan para simular condiciones propias de las distintas celdas de un humedal. Las bacterias desempeñan distintas funciones, como la reducción de sulfatos, la precipitación de sulfuros, etc. Esta aproximación se encuentra aún en una etapa inicial de diseño.

Los rajos abiertos al término de su explotación, así como lagos o depresiones naturales, han sido frecuentemente utilizados para el tratamiento de soluciones ácidas o de efluentes básicos cianurados. De esta manera se pueden constituir, a su vez, en pasivos ambientales.

Vidalón y Della Porta (3: 543-551) describen el caso del lago Yanamate, en Cerro de Pasco, un distrito de gran complejidad geológica y mineralógica de Perú, que incluye cuerpos silicificados ricos en pirita, generadores de drenaje ácido. El lago Yanamate, que se encuentra en un área de calizas karsticas, recibió unos 95 millones de m<sup>3</sup> de soluciones (D.A + efluentes de planta SX – EW) con pH 1.3. El cese de la explotación en 2003 ha permitido un leve aumento del pH (actualmente cercano a 2.0). Las soluciones acumuladas en el lago exceden por mucho los límites máximos aceptados para aguas de ríos en cuanto a As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn y otros metales.

Otro caso, ahora concerniente a soluciones básicas, es el de Mina Colomac (Chapman et al, 3: 553-564), 220 km al NE de Yellowknife, en los Northern Territories de Canadá, donde se han depositado 2 millones de m<sup>3</sup> en un lago local. Las soluciones, procedentes de la Mina Colomac, contienen elevadas concentraciones de complejos cianurados, así como de sus productos de descomposición (thiosulfatos y amoniaco).

En Montana (Kleinmann y Booth: 9), el Distrito de Butte, antes famoso por su riqueza de Cu, Zn, Mn, Pb, Mo, Ag y Au, es ahora notorio por sus problemas ambientales, resultantes de 140 años de minería, concentración y fundición de minerales, así como de la naturaleza mineralógica del distrito, su clima y topografía. El lago Berkeley, que llena el antiguo rajo abierto central, la mayor acumulación de drenaje ácido del mundo, empezó a llenarse en 1983, al cesar el bombeo de las labores. En opinión de los expertos, el tratamiento de ese drenaje ácido representa una carga que debería ser asumida “por siempre”.

## **5.2: Recuperación Económica de Metales del Drenaje Ácido.**

La recuperación de metales del drenaje ácido, en particular la de cobre ha sido practicada con resultados prácticos. En el distrito minero de Andacollo (Región de Coquimbo, Chile), la actividad bacteriana favoreció la disolución de minerales de cobre en una red de antiguas labores inundadas. Ello fue aprovechado por los mineros en los 1980's para bombear las soluciones ricas en cobre, y precipitar el metal mediante cementación con chatarra de hierro. En algunos yacimientos de uranio se ha constatado un fuerte aumento en la concentración del agua que inunda las labores abandonadas. Junto con la necesidad de

abatir esas concentraciones, ello ofrece la oportunidad de recuperar económicamente ese elemento (Michálek 3: 509-519).

Sin embargo, en general ha sido difícil desarrollar tecnologías económicas de recuperación de metales pesados de soluciones ácidas. Tanto el programa MEND en Canadá y el Resource Recovery Project en USA, están trabajando en esta línea. Las tecnologías más promisorias son las de intercambio iónico selectivo y separación por membranas de emulsiones líquidas. El Berkeley Pit en Butte, Montana, ha sido utilizado como base para desarrollo de tecnologías y demostraciones en USA, bajo el patrocinio del US Department of Energy. Se ha estimado que concentraciones de Cu sobre 100 mg/L (100 ppm) pueden ser económicamente recuperadas.



## Capítulo 6: Cierre y Estabilización de Labores Mineras.

### 6.1: Cierre y Estabilización de Labores Mineras a Cielo Abierto.

Las explotaciones mineras a cielo abierto incluyen dos tipos principales: A) Las realizadas en la pared de un cerro, a la manera de una cantera y B) Los rajos abiertos (open pits) efectuadas mediante excavaciones en profundidad en el terreno.

Unas y otras requieren dos tipos de cuidado básico al cerrar la explotación (así como durante ella). El primero se refiere a la necesidad de proteger su acceso respecto a excursionistas que pudieran correr riesgos inadvertidos. Otra situación del mismo orden se refiere al acceso de pirquineros, respecto al cual no hay barreras físicas posibles y cuya actividad podría ser riesgosa para su propia seguridad, así como afectar la estabilidad ambiental del cierre. Por otra parte, el cierre perimetral debe impedir también el acceso de animales mayores, en particular de aquellos objeto de actividades pastoriles.

El segundo tipo de cuidado concierne a la estabilidad de las labores. En efecto, después de la explotación, los procesos de meteorización, facilitados por la fracturación incrementada de las rocas debido a la tronadura (= voladura de rocas), pueden hacer inestables los anteriores taludes. En consecuencia, ellos facilitan la ocurrencia de procesos de remoción en masa (deslizamientos, hundimientos rotacionales) así como una intensificación de la erosión. Aparte de su efecto ambiental, como el incremento de material particulado y la contaminación metálica del drenaje, ello también puede ser causa de fenómenos de mayor riesgo, como el brusco rebalse de un rajo inundado (un pequeño lago), debido al deslizamiento en una de sus paredes.

En el caso de las explotaciones tipo cantera, junto con corregir su talud y diseñar un buen sistema de drenaje, puede ser aconsejable vegetar sus paredes, con especies que efectivamente contribuyan a su estabilidad y sean autosustentables bajo las condiciones climáticas del sitio. La mejor manera de tener éxito en este aspecto es seleccionar las mejores opciones a través de pruebas durante la etapa de explotación de la mina, sometiendo a las plantas a las mismas condiciones en que se

encontraran después del cierre, lo cual debería excluir el riego una vez “asentadas”. Esto es especialmente importante en regiones áridas o semiáridas.

En cuanto a los rajos abiertos (= cortas), el régimen hidrológico y la hidrogeología local, junto con la litología y mineralogía, son factores claves a evaluar al considerar el cierre de la explotación minera. En regiones húmedas, ellos albergarán pequeños (o grandes) lagos, a menos que sean rellenados con desechos sólidos de la misma explotación. En condiciones de extrema aridez, pueden albergar cantidades menores de agua, si el rajo alcanza a interceptar un acuífero profundo o bien una falla que actúa como conducto de agua subterránea. Sin embargo, la evaporación impedirá una acumulación importante de agua. En algunos casos, como el Berkeley pit en Montana, antes mencionado (5.2), estos lagos son utilizados en el tratamiento remedial del drenaje ácido rico en metales.

En términos hidrológicos es importante considerar la posición del sitio minero en la respectiva cuenca hidrográfica. Si se encuentra en altura, en la cabecera de la cuenca, y ésta incluye ríos y lagos donde se realizan actividades humanas importantes (ciudades, agricultura, industrias, etc.) o si esos ríos y lagos poseen importancia ecológica (caso normal) o proveen recursos alimentarios (pesca, etc.) a la población nativa, la situación puede ser en extremo delicada. Desde luego, los mayores riesgos se referirán a los efectos del “lago artificial” en la calidad del agua subterránea y superficial, aunque también habría que considerar riesgos geotécnicos, si se constituye en una especie de embalse y sus paredes pueden sufrir desprendimientos.

Un artículo de Johnson y Carroll (3: 701-708) analiza de manera muy completa lo referente a las distintas situaciones posibles y los correspondientes problemas y soluciones, a la luz de los respectivos modelos hidrológicos y geoquímicos.

En términos hidrológicos, la ecuación general nos dice:

$$\Delta \text{ Almacenamiento} = \text{Entradas} - \text{Salidas (líquido + vapor)}$$

Las entradas están constituidas por drenaje superficial, agua de lluvia y aguas subterráneas. Las salidas por agua subterránea, agua evaporada y, eventualmente, agua de rebalse. Tanto el acceso como la salida de agua subterránea dependen del gradiente hidráulico local, y por lo tanto de la topografía, así como de la permeabilidad primaria y secundaria (red de fracturas) y de los niveles piezométricos, además, naturalmente, de las precipitaciones, régimen de derretimiento de nieve o hielo etc.

En condiciones áridas es posible que el nivel freático se encuentre tan profundo que la escasa infiltración producida desde el rajo (posibilitada por lluvias esporádicas) tenga pocas probabilidades de interactuar con él. Sin embargo, este tema requiere prudencia. Al respecto conviene recordar que las potentes zonas de oxidación y cementación de los yacimientos cupríferos del norte de Chile (un proceso natural de transporte vertical de cobre por drenaje ácido), se formaron en condiciones de clima semi árido a árido e implicaron interacciones con niveles freáticos profundos.

En cuanto al modelo geoquímico, éste implica considerar las reacciones entre las rocas (incluidos minerales primarios, de alteración hidrotermal y supergénica, minerales de mena y minerales de ganga), el agua (que contiene distintos iones en equilibrio) y el aire. Las numerosas y complejas reacciones posibles dan lugar a la solución (iónica, molecular o coloidal) de nuevas especies, así como a la precipitación y sedimentación de otras. Ello incluye procesos de oxidación, reducción, hidrólisis, adsorción, etc., facilitados por la mayor fracturación de las paredes y el fondo del rajo, producto de los procesos de tronadura (= voladura de rocas). En consecuencia, el lago artificial se convierte en un complejo reactor, que puede contaminar seriamente el drenaje regional a través de sus aportes al agua subterránea.

Johnson y Carroll distinguen tres posibles escenarios, a los cuales se puede agregar un cuarto, consistente en el uso “permanente” del lago artificial para tratamiento del drenaje ácido generado (caso del Berkeley pit).

En un escenario se permite la formación del lago artificial así como el ingreso y salida de agua subterránea. En condiciones de aridez se

genera un fuerte aumento de la concentración de solutos (por evaporación) así como de materiales precipitados, que pueden contribuir a sellar fracturas en el fondo. Desde luego, tal situación sólo es aceptable si no existen riesgos de contaminar aguas subterráneas que extiendan el problema más allá del sitio.

Un segundo escenario, denominado de “relleno optimizado” comprende el cubrimiento o inmersión de las rocas de la pared del rajo susceptibles de generar drenaje ácido. Aparte de ello, se procura sellar el fondo de la explotación para evitar descargar al drenaje subterráneo y se realizan procedimientos de tratamiento pasivo (adición de cal, caliza molida y materia orgánica) para mejorar la calidad del agua. También se recomienda considerar otras opciones de manejo, consistentes con las limitaciones del método y las condiciones prevalecientes a largo plazo.

Un tercer escenario implica el relleno completo del rajo (= corta), permitiendo que el agua subterránea fluya a través de él como un componente más del sistema hidrológico, lo que implica la disolución progresiva de parte de los materiales de relleno. En este caso no quedan paredes expuestas. Sin embargo, el agua infiltrada desde la superficie, que lleva oxígeno disuelto, puede permitir su oxidación. En consecuencia, se recomienda el agregado de materiales alcalinos y orgánicos (p.ej., residuos de tratamiento de aguas negras) para reducir la acidez y generar un ambiente reductor.

## **6.2: Cierre y Estabilización de Labores Mineras Subterráneas.**

Las explotaciones mineras subterráneas necesitan estabilización y cierre especialmente cuidadosos (lo que en muchos casos es prácticamente imposible) por una serie de razones. Algunas de ellas fueron señaladas en el Capítulo 5, y se refieren al carácter de “reactores de gran superficie” que presentan las labores subterráneas con relación a la generación del drenaje ácido (y su transferencia al drenaje subterráneo). Desde luego, también las labores subterráneas cerradas, y especialmente ellas, deben ser protegidas del acceso de pirquineros, que se exponen a serios riesgos en su interior. Cuando la explotación minera ha sido realizada cerca de poblaciones humanas (y cuando se procura dar nuevos usos al sitio minero), es muy importante evitar los fenómenos de subsidencia. Por último, es importante señalar que en

Chile, como en otros países que no han restaurado aún sus pasivos mineros, es frecuente encontrar cavidades verticales (piques) abiertas, sin señalización alguna de su presencia (p.ej., en la periferia de ciudades o pueblos como Andacollo, La Higuera, etc.). Durante el cierre es necesario clausurar el acceso a las labores subterráneas, sean éstas verticales, horizontales o inclinadas y en lo posible rellenarlas. Si son inaccesibles, ello puede efectuarse mediante la inyección de material cementante a través de perforaciones. Aparte de sus efectos en el drenaje subterráneo (tanto en la modificación de su flujo y niveles piezométricos como en la calidad del agua), las labores subterráneas pueden ser causa de subsidencia. Ello es especialmente grave si las labores se sitúan cerca de poblados o ciudades, así como si se espera destinar el sitio cerrado a nuevos usos.

Un tipo especial de subsidencia, que ocurre durante la explotación del yacimiento, es la formación de grandes cráteres por efecto del hundimiento en bloques (*block caving*), método utilizado en la minería subterránea de yacimientos porfíricos de cobre (como El Teniente, Río Blanco y El Salvador). Se trata de un efecto de gran magnitud y muy difícil de enfrentar y que facilita el ingreso de agua a las labores subterráneas, y por lo tanto, la generación de drenaje ácido.

Aparte del caso recién mencionado, son las explotaciones poco profundas las que implican mayores problemas de subsidencia. Conforme al Manual del ITGME (= IGME) (1), por lo general tienen menos de 50 m de profundidad y raramente más de 150 m. Desde luego, sus consecuencias dependen mucho de la litología y estructuras de las rocas, y el agua subterránea puede jugar también un rol importante en la desestabilización del sistema. No se debe olvidar el hecho de que los yacimientos metalíferos se sitúan en rocas hidrotermalmente alteradas y muy fracturadas, y que durante y después del cese de la explotación la alteración supergénica continúa debilitándolas. Entre los principales mecanismos físicos de deterioro y colapso de faenas, están el hinchamiento del piso, la trituración de los pilares y el hundimiento del techo.

En el caso de los piques o chimeneas abandonadas, el colapso de su cubierta rocosa puede dar lugar a la formación de grandes cráteres. No

es el caso de las explotaciones tipo caserones y pilares, cuyos efectos suelen ser menores.

En la planificación del cierre es necesario conjugar tres aspectos, a saber:

- Análisis de la información disponible, más inspección visual si es posible, complementada con sondajes de reconocimiento.
- Elaboración y ejecución del programa de relleno y cementación.
- Control de la efectividad del programa ejecutado.

En el caso de los piques se acostumbra a utilizar una tapa en forma de pirámide o cono invertido, sobre la cual se rellena y cementa el espacio, dejando una altura de relleno similar a la longitud del diámetro del pique. También se suele utilizar, en lugar de esa tapa, una losa de hormigón, situando igualmente el relleno sobre ella. En casos especiales, se utiliza un relleno cementado profundo del pique.

En el antiguo distrito de Portovelo, Ecuador, se encuentra la ciudad de Zaruma, cuyo casco urbano está amenazado por vacíos subterráneos, que implican peligros de subsidencia, así como por excavaciones abandonadas en su superficie. Un artículo de Blanco et al (10) describe los problemas de estabilidad de taludes y su frecuente asociación a peligros de subsidencia, lo cual agrava la situación. El mismo trabajo propone una zonificación preliminar del sitio, basada en criterios geomecánicos.

Un trabajo muy completo de restauración por cierre de una mina de carbón en la República Checa está descrito por Adamec et al (3: 237-246). El caso corresponde a una mina abierta ya en siglo 16 y que cerró en los 1990's. El objeto de las labores realizadas fue triple: a) Eliminar riesgos de acumulación de gas metano y de incendios. b) Eliminar riesgos de subsidencia. c) Proteger los recursos hidrogeológicos.

El trabajo realizado consistió en la inyección de un material fluido cementante, elaborado con relaves de la misma flotación del carbón, escorias de hornos, materiales de desechos de procesos metalúrgicos y agua de la mina. Dicha composición consideró las propiedades de la mezcla para mantener su fluidez alrededor de 90 minutos (tiempo

requerido para alcanzar las labores más alejadas). Su tiempo de fraguado es unos 10 días. La resistencia de este relleno hidráulico alcanza a unos 2-12 MPa (rango que considera las facilidades o dificultades relativas para su depósito). El agua en exceso es filtrada y bombeada al exterior.

Entre las ventajas del método empleado, los autores citados destacan el uso de materiales cuya disposición externa representaría un problema ambiental. En general, este tipo de procedimientos tiene amplias aplicaciones, sujeto naturalmente a una evaluación geomecánica y geoquímica de su comportamiento a largo plazo.

## Capítulo 7: Aspectos Hidrológicos Superficiales y Subterráneos

### 7.1.: Aspectos Hidrológicos de la Minería a Cielo Abierto. Factores Determinantes.

Como hemos señalado en el Capítulo 3, las características del sitio, junto con la magnitud, el diseño y el cuidado en la ejecución, son factores determinantes en el impacto de las labores mineras sobre el régimen hidrológico, y sus efectos en la erosión, sedimentación y contaminación del agua.

Entre las características del sitio, juegan un rol principal la geología, particularmente en sus aspectos litológicos y estructurales, la geomorfología y el clima. Al respecto, la geomorfología refleja la interacción de la geología y el clima, y se expresa en una topografía determinada. Por otra parte, la cubierta vegetal está en alto grado determinada por el clima y la altura. Otra relación importante es la existente entre la tectónica (que determina el ascenso o descenso de bloques geológicos), los procesos de remoción en masa y los agentes erosivos (en particular el agua, líquida o sólida). Mientras la tectónica tiende a crear grandes diferencias topográficas, la remoción en masa y la erosión actúan en la dirección opuesta, rebajando las cumbres y rellenando las depresiones.

De lo antes expuesto se deduce que existe un equilibrio entre las formas del relieve, su cubierta vegetal y el clima. Dicho equilibrio puede ser de un extremo dinamismo, como en las cadenas montañosas con fuerte régimen pluvial (Nueva Guinea, Andes de Colombia y Ecuador, etc.) o de una muy baja dinámica, como en algunos relieves del desierto del norte de Chile, donde prevalecen superficies de edad geológica terciaria.

Cuando se instala una operación minera de cierta envergadura, se produce una ruptura del equilibrio, al adaptarse las superficies a las necesidades de infraestructura requeridas por la minería, a lo que se agrega el desarrollo de cavidades o el arranque de minerales tipo cantera, producto de la minería a cielo abierto. Por otra parte, el drenaje mismo puede ser modificado para facilitar la operación, como en el caso



de El Indio (Robledo y Meyer 3: 53-65) así como para depositar relaves y otros desechos sólidos aprovechando la topografía de quebradas o depresiones. Durante la operación de la explotación, la ingeniería se encarga de mantener las condiciones de equilibrio inestable instaladas (aunque no siempre con éxito, ver Capítulo 3). Sin embargo, después de su abandono, el drenaje buscará una nueva situación de equilibrio, mientras la ausencia de la cubierta vegetal original facilitará el proceso erosivo (y por consiguiente un incremento en la turbidez de las aguas, que probablemente estará acompañado de mayores concentraciones de hierro y otros metales pesados). De ahí la necesidad de que el cierre de las operaciones procure establecer un estado del drenaje próximo a un nuevo equilibrio, así como reducir al mínimo posible los efectos en la remoción en masa y la erosión. Naturalmente, dicha necesidad será tanto mayor cuanto más dinámico sea el régimen, y más delicada la posición de la explotación minera, por ejemplo en la cabecera de una cuenca fluvial.

## **7.2: Aspectos Hidrológicos de la Minería Subterránea: Factores Determinantes.**

En esta materia son igualmente válidos los conceptos formulados en la sección anterior, con el agregado de la mayor importancia que cobra la geología y la mineralogía (primaria y secundaria) del sitio intervenido y de su entorno.

Un breve repaso de los principales conceptos hidrogeológicos puede ayudar a comprender mejor los contenidos de la presente sección. En primer término es importante considerar que, normalmente, el drenaje superficial y el subterráneo están estrechamente relacionados, y que el segundo tiende a seguir, aproximadamente, las variaciones de la superficie topográfica. Parte del agua que cae o circula sobre la superficie se infiltra. Al principio atraviesa una zona donde no alcanza a saturar todos los poros o fracturas por las que pasa. Esa zona se denomina “zona vadosa” y en ella el agua es relativamente rica en aire disuelto, y por lo tanto, en oxígeno. Su límite inferior está dado por aquel nivel (variable en el tiempo) a partir del cual todos los poros y fracturas interconectados están saturados de agua, el cual se denomina “nivel freático”. Si ese nivel está conectado libremente con la superficie, se dice

que el cuerpo que almacena y conduce el agua es un “acuífero libre”. El agua de un acuífero libre se desplaza siguiendo la Ley de D’Arcy, que señala que el flujo entre dos puntos del acuífero es directamente proporcional a la diferencia de altura del nivel freático y a su conductividad hidráulica e inversamente proporcional a la longitud del camino que debe recorrer. En general ese recorrido involucra trayectorias curvas, perpendiculares a las líneas de igual altura del nivel freático.

También puede ocurrir que un acuífero esté confinado entre dos formaciones geológicas impermeables. En tal caso la Ley de D’Arcy rige igualmente, pero la altura del acuífero (expresada, p.ej., respecto al nivel del mar) debe ser reemplazada por su “altura piezométrica” que incluye la presión a la cual el agua se encuentra.

Según su aptitud para almacenar y transportar agua, los cuerpos de roca se clasifican en acuíferos (máxima conductividad hidráulica acuitardos (baja) y acuicludios (mínima o nula conductividad). Esa capacidad está dada por el volumen de huecos (poros, vesículas, fracturas) y por sus interconexiones. Así, una roca o sedimento puede tener un gran volumen de poros, y una buena capacidad para almacenar agua, pero una baja capacidad para conducirla. Ello ocurre, por ejemplo con los sedimentos de grano fino, como arcillas o limos (que se comportan como acuitardos).

La permeabilidad de las rocas se clasifica en primaria y secundaria. La primaria es propia de la granulometría de las rocas. Al igual que en el caso de los sedimentos, las rocas sedimentarias de granulometría homogénea, formadas por clastos de tamaño arena o superior (gravas, etc.) tienen mayor permeabilidad primaria. También existe alta permeabilidad primaria en algunas rocas volcánicas, que presentan estructuras tipo tubos o túneles, con gran capacidad de flujo. La permeabilidad secundaria se debe a fracturas (diaclasas o fallas) y existe en todo tipo de rocas, aunque en grado distinto. También puede producirse por disolución de minerales. El caso más notable es el de las estructuras kársticas de disolución en rocas calizas, que dan lugar a la existencia de verdaderos ríos subterráneos.

Al abrirse labores subterráneas en áreas que presentan niveles freáticos de profundidad normal (algunos metros o decenas de metros bajo la superficie), la mina se convierte en un verdadero sistema de drenaje, que tiende a bajar el nivel freático local. Ello obliga a un permanente desagüe de las labores mediante bombas. Antes del desarrollo de las bombas a vapor en el siglo 19, ello obligaba a detener las labores a cierta profundidad, por la imposibilidad de contrarrestar el acceso de agua a las labores. En el caso de la minería profunda del oro en Sud Africa, el problema del agua en las labores ha obligado a mantener abiertas minas ya agotadas, para evitar que su inundación lleve al colapso de operaciones vecinas.

Finalmente, hay que visualizar todo macizo rocoso como una red de fracturas, con mayor o menor capacidad para conducir el agua, algunas de las cuales pueden aportar una alta conductividad, incluso a rocas carentes de permeabilidad primaria (como fallas principales en macizos de rocas graníticas).

El hecho de que las labores abandonadas pasen a constituir una especie de “acuífero kárstico”, implica importantes riesgos geoquímicos, ya discutidos en el Capítulo 5. Por otra parte su relleno no impide que el agua circule través de ellas, aunque su régimen hidrogeológico pasará a ser el de un acuífero normal o el de un acuitardo, según las características y grado de cementación del relleno utilizado. Este tema será discutido en particular en la sección 7.4.

### **7.3: La Restitución de un Drenaje Superficial Estable.**

Se entiende por erosión el transporte de sedimentos por efecto de un agente erosivo (el agua o el aire). En el caso de la erosión fluvial, se produce una interacción recíproca entre el efecto erosivo del agua, que excava su propio curso, y la forma excavada, que a su vez determina el curso del agua. Cuando ese curso no es definido y afecta de manera pareja a una superficie, se habla de erosión laminar.

La erosión hídrica puede afectar a rocas, sedimentos y suelos. Las rocas desde luego son más resistentes, salvo que sean solubles (como las calizas) o estén muy fracturadas o alteradas. Los sedimentos y los

suelos se erosionan, en cambio, con facilidad, a menos que estén protegidos por una cubierta vegetal adecuada o presenten un grado de permeabilidad que facilite la infiltración, disminuyendo el escurrimiento superficial.

Dos factores desempeñan un control clave sobre la erosión hídrica, aparte de las características físicas del material expuesto. Ellos son el ángulo y longitud de los taludes por una parte, y la magnitud de las precipitaciones por otra. Respecto al segundo factor, es más importante su intensidad que su valor total, puesto que si es alta, no solamente aumenta la erosión sino que también se favorecen los procesos de remoción en masa (coladas en barro, deslizamientos y hundimientos rotacionales), los que pueden tener consecuencias muy graves.

Existe una serie de procedimientos para controlar los procesos erosivos durante la explotación así como con posterioridad al cierre de ella. Estos consisten principalmente en la construcción de canales y de barreras o diques.

Los canales tienen por objeto interceptar y conducir el drenaje de la manera más segura posible. Por una parte se construyen canales o trincheras paralelas a las curvas de nivel, de manera de interceptar el escurrimiento laminar y conducirlo a canales de desagüe. Si se desea también facilitar la infiltración de parte del agua, su fondo se deja sin revestimiento. El diseño del curso y pendiente de los canales considera criterios hidráulicos, de manera de tener el mejor control de volúmenes y velocidades de flujo. Esta materia está tratada en detalle por el Manual del ITGME (= IGME) (1), que puede ser utilizado como guía de diseño. Los canales pueden ser revestidos con materiales vegetales, con grava o con hormigón.

El efecto de los canales se complementa con la construcción de barreras filtrantes, destinadas a interceptar los sedimentos gruesos, así como con piscinas de decantación, diseñadas para sedimentar materiales finos, disminuyendo así la turbidez del agua. Naturalmente, estas obras exigen una periódica y permanente limpieza y mantención.

El cierre de las faenas de Cía. Minera El Indio dio lugar a un interesante trabajo de restauración hidráulica, descrito por Robledo y

Meyer (3: 53-65). El distrito de El Indio (Au, Cu, As) se sitúa en los Andes de la Región de Coquimbo, Chile, muy cerca de la divisoria de aguas que marca el límite con Argentina, en latitud aproximada 30° S y a unos 4000 m de altitud. Su drenaje afecta al Río del Toro, afluente del Río Turbio, que a su vez es afluente del Río Elqui. En la cuenca del Río Elqui se sitúan tres ciudades principales y se desarrolla una importante actividad agrícola, en parte destinada a la exportación de frutas. Aparte de su posición geográfica y topográfica delicada, el Distrito es un importante generador de drenaje ácido (con Cu y Zn) y de contaminación arsenical.

Originalmente, el Río Malo, afluente del Río Toro, pasaba por el centro del Distrito, lo que fue modificado por los operadores originales (a fines de los 1970's) mediante canales y túneles de desviación del agua. El plan de cierre del Distrito incluyó el abandono de dicho sistema de conducción del agua, así como la restauración del drenaje original, mediante la construcción de un sistema de canales revestidos. En complemento, se construyó una piscina de decantación, y posteriormente se utilizó la capacidad excedente de un tranque de relaves, con el objeto de decantar parte del arsénico transportado con el material en suspensión.

La restauración del Río Malo estableció los siguientes criterios:

- El sistema debería funcionar perfectamente en régimen normal.
- Los eventos extremos no deberían implicar daños serios al sistema.

El diseño realizado consideró aspectos como flujos máximos en función de la superficie del área drenada, relaciones amplitud / profundidad del canal basadas en criterios hidráulicos, diseño de sinuosidades tipo meandro para el manejo del flujo, diseño de perfiles y revestimiento del canal. Esto último utilizó criterios "naturales" así como de la artesanía tradicional andina (encaje "justo" de los bloques de piedra).

El resultado obtenido es estéticamente armónico y ha funcionado bien, aunque hasta ahora no ha sido sometido a eventos extremos. Consulta 4.8 km de canales construidos.

Otro caso de interés, referente a un ambiente geográfico y a un tipo de minería distinto, está descrito por van Renssen (3: 431-439). El caso concierne a una extensa explotación carbonífera, que incluyó tanto minería a cielo abierto (*strip mining*) sobre un área de 17 km<sup>2</sup>, como labores subterráneas: la mina Rietspruit, Sud Africa. La planificación del cierre se inició unos 10 años antes del cese de la explotación, lo que permitió planificarlo detenidamente, tanto en sus aspectos físico-ambientales como financieros. La restauración de la superficie implicó alrededor del 80 % del presupuesto total. Ella fue realizada en términos de obtener un óptimo manejo hidrológico, tanto superficial como subterráneo, utilizando un procedimiento de modelación computacional de la superficie final para optimizar dicho manejo. El hecho de que otras minas operaban en sectores vecinos, así como la necesidad de evaluar conjuntamente lo referente al drenaje superficial y subterráneo, llevó a buscar una solución que conjugara todos los factores respecto a este último. Dicha solución optó por un drenaje de las labores subterráneas de la mina en cierre hacia otras minas en operación, decisión apoyada en un estudio del sistema de flujos de agua entre las diferentes minas del Distrito.

#### **7.4: El Drenaje Post-Cierre de Labores Subterráneas.**

Esta materia ha sido tratada extensamente en secciones anteriores de este capítulo (7.2) y de capítulos anteriores (4, 5 y 6). En consecuencia, sólo resumiremos aquí algunas consideraciones centrales, junto con una referencia al caso del distrito El Indio expuesto por Robledo y Meyer (op. cit.).

Dichas consideraciones centrales se refieren a:

- La integración de las labores subterráneas cerradas al sistema de drenaje del sitio, incluyendo las interacciones aguas subterráneas – aguas superficiales. Ello vale tanto para labores no – rellenas (que se comportan como un acuífero kárstico) como para aquellas rellenas y cementadas, cuyo comportamiento como acuífero o acuitardo dependerá de las características del relleno.
- Es imposible aislar completamente las labores subterráneas, porque todos los macizos rocosos están recorridos por redes de fracturas a

diversas escalas. Ello implica que, si en el distrito existen condiciones favorables a la generación de drenaje ácido, no se podrá aislar a las labores subterráneas respecto a ese problema, que puede generar un deterioro progresivo de su estabilidad.

- En distritos en los que existen varias minas en operación que laboran bajo el nivel freático, el cierre de cualquiera de ellas puede afectar seriamente a las demás, por lo cual se debe considerar el sistema en su conjunto.
- La contaminación del drenaje subterráneo afectará normalmente al drenaje superficial. Sin embargo, existe un riesgo aún mayor de que afecte a usuarios de aguas subterráneas, las que no están protegidas por los monitoreos de calidad que se realizan para las aguas superficiales.

En el caso del distrito de El Indio, se establecieron tres fuentes principales de drenaje ácido infiltrado hacia el drenaje subterráneo:

- Infiltración de aguas superficiales que atravesaban depósitos de desechos mineros sólidos.
- Infiltración desde la base de los rajos abiertos hacia zonas reactivas en las labores mineras subterráneas.
- Infiltración de aguas superficiales a través de los suelos reactivos del fondo del valle del Río Malo.

Aunque las fuentes de infiltración señaladas fueron consideradas entre las acciones del cierre, no se ha logrado aislar el sistema de labores subterráneas respecto al drenaje del Distrito. En consecuencia, las labores (que no fueron rellenadas) siguen recibiendo y entregando aguas ácidas, ricas en Cu y Zn (Galleguillos, 11), las que se integran a las aguas superficiales. Ello es natural, considerando el alto grado de fracturación y alteración de las rocas del Distrito, así como los elevados gradientes hidráulicos que implica su posición topográfica en un valle de alta pendiente, rodeado por elevadas montañas.

## Capítulo 8: Manejo de Suelos Contaminados en Planes de Cierre Minero.

### 8.1: Contaminación Geoquímica – Mineralógica de Suelos.

La contaminación de suelos de antiguos distritos mineros es una temática ampliamente estudiada, en particular a través de los estudios ligados a trabajos de limpieza del programa “Superfondo” (*Superfund*) (Ley de 1981 sobre Responsabilidad Legal, Compensación y Reacción Ambiental Integral CERCLA) de USA. El mismo programa ha estimulado el desarrollo de metodologías de tratamiento in situ (p.ej., vitrificación) y de tratamiento externo de los suelos contaminados. El tema de la contaminación de suelos y su remediación está tratado en detalle en la obra del ITGME (= IGME) (12) “Contaminación y Depuración de Suelos”.

En el presente capítulo hemos dividido esta materia en dos secciones. Esta primera incluye tanto lo referente a los contenidos metálicos iniciales del yacimiento o distrito, como aquellos debidos a su posterior explotación minera y beneficio metalúrgico (no siempre fáciles de separar). La segunda sección considerará otros tipos de contaminación ligadas a la operación y a la presencia humana en el distrito. Ella incluye temas como la contaminación con hidrocarburos, desechos “domésticos”, aguas residuales, residuos peligrosos y no peligrosos, etc.

En primer término es conveniente considerar que los yacimientos metalíferos están rodeados por aureolas de contenidos anormales en metales y aniones (p.ej., sulfatos, arseniatos) de origen primario (contemporáneas a la formación del depósito) y secundario (dispersiones debidas a meteorización y erosión de rocas mineralizadas). Las segundas pueden ser muy extensas, dependiendo de la movilidad de los elementos involucrados y del grado de meteorización y erosión del yacimiento. En casos extremos pueden ser tan grandes y ricas como para formar yacimientos periféricos (p.ej., caso del yacimiento Exótica o Mina Sur de Chuquicamata).

Es natural que la explotación y el beneficio de los minerales incrementen de modo importante esos contenidos, ya sea a través de los procesos de molienda, lixiviación, pirometalurgia, etc. Diversos criterios



permiten estimar la contribución de la explotación minera-metalúrgica a los contenidos iniciales, entre ellos la comparación de los valores finales con los del Estudio de Línea de Base del proyecto o con los mapas geoquímicos elaborados durante la etapa de exploración del distrito. Sin embargo, normalmente el cierre asume responsabilidad sobre la eliminación de aquellos contenidos que impliquen riesgo para la salud humana o el ambiente, cualquiera sea su origen. En el caso del cierre de El Indio (ya tratado en capítulos anteriores), los suelos con alto contenido de As y Sb fueron extraídos y enviados a un depósito de seguridad externo. Ello, después de no tener éxito un proceso de encapsulamiento con cemento que habría permitido su disposición en el sitio de la explotación (Araya, 13).

El tema del arsénico ha recibido una bien merecida atención por dos razones principales. La primera es su bien conocida toxicidad (es un veneno favorito de las novelas de misterio), aunque los principales casos de envenenamiento progresivo masivo con arsénico de origen ambiental (Bangladesh, China, México) no se asocian a actividades mineras. La segunda es su abundancia en minerales de mena principales (como enargita: sulfoarseniuro de cobre) o que los acompañan (arsenopirita). En consecuencia, se han diseñado varios procedimientos para enfrentar el problema, a través de su encapsulamiento, (p.ej., en escorias silicatadas), o su incorporación a fases químicas de baja solubilidad (p.ej., arseniato de Ca y Fe, análogo a la apatita o a escoradita ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )). Esta materia está bien reseñada en un artículo de Mitchell (2: 258-281).

En el estudio de suelos contaminados por metales pesados, han tenido una importante aplicación las metodologías geoestadísticas, desarrolladas inicialmente para la evaluación de reservas metálicas de los yacimientos. También los estudios se han facilitado y hecho más completos gracias al desarrollo de metodologías analíticas instrumentales para multielementos, como ICP. Al respecto, van der Waals et al (3: 815-828) describen el uso de ambas metodologías en la preparación y control de planes de cierre.

Un aspecto complementario a considerar es el referente a la biodisponibilidad de los metales. En principio, puede ser razonable pensar que más que sus contenidos totales, interesa aquella fracción

que por su forma químico-mineralógica puede ser efectivamente incorporada al metabolismo de los seres vivos. Por ejemplo, en el distrito de El Almadén, España, explotado desde la antigüedad como la mayor mina de mercurio del mundo, existe una extensa y elevada contaminación. Sin embargo, sólo una pequeña fracción de ella es, efectivamente, biodisponible (Molina et al, 14). Respecto a este tema, Almendras et al (3: 859-866) presentan la comparación de dos metodologías para evaluar la biodisponibilidad de cobre, zinc, plomo y hierro, además de arsénico. La metodología BIOMET utiliza biosensores bacterianos, mientras la de carácter químico PBASE trabaja sobre la base de la distribución de los metales entre las fracciones solubles y no solubles en agua de los metales pesados. Los autores citados concluyen que ambas metodologías son útiles y complementarias para realizar esta evaluación.

El mismo tema es analizado también por Diacomantis et al (3: 191-198), que reportan cifras de biodisponibilidad de arsénico comprendidas entre 1.6 y 8.9 % en suelos contaminados por faenas mineras en Australia. La forma más común en los desechos mineros es la pentavalente (arsenato), la cual presenta valores de biodisponibilidad inferiores a 5 % (comparada con más de 5 % para la trivalente). Sin embargo, los autores aconsejan utilizar por prudencia la cifra de 10 %. Respecto al plomo, se midieron valores de 0.6 a 1.4 %, recomendándose utilizar 2 % para fines de evaluación de riesgos.

Sin embargo, reconociendo la importancia que reviste la biodisponibilidad, hay dos aspectos importantes a considerar. El primero se refiere a los cambios que se generan en la forma químico-mineralógica por efecto de reacciones químicas y actividad bioquímica, los que pueden hacer biodisponibles contenidos metálicos que hoy no lo son.

El ejemplo clásico al respecto es la catástrofe ambiental de Minamata, Japón, en los años 1950's, donde la actividad bacteriana del fondo de una bahía llevó el mercurio a una forma biodisponible (metil mercurio) produciendo un grave y progresivo envenenamiento de los pobladores del lugar.

Otra reserva concierne al riesgo de recibir los metales pesados a través de la respiración, por efecto de la erosión eólica de los suelos, lo que es muy factible en condiciones de clima árido y semi árido. En consecuencia, tanto en éste como en otros aspectos sometidos a incertidumbre, es mejor adoptar el principio de “precaución” y procurar eliminar las fuentes de riesgo.

## **8.2: Otros Tipos de Contaminación de Suelos.**

Durante la explotación de un yacimiento y del beneficio metalúrgico de sus minerales, existen variadas e importantes posibilidades de contaminación, que implican distintos niveles de riesgo. Desde luego, están las referentes al uso de combustibles, lubricantes y otros hidrocarburos, cuyo almacenamiento (filtraciones desde estaqués), uso, recambio, etc., va generando variados grados de contaminación. A ello hay que agregar el depósito de residuos peligrosos y no peligrosos, el de desechos “domésticos” generados por los campamentos, el efecto de aguas residuales (que infiltradas en el punto A puede reaparecer formando una vertiente de B...) etc. Algunos de los desechos ocupan considerable volumen y son notablemente persistentes, como los neumáticos usados. Otros, mucho más peligrosos, pueden ocupar poco volumen, y pasar desapercibidos entre los grandes volúmenes de materiales banales.

Al respecto, la actual “minería responsable” (que requiere algo más que una certificación ISO – 14001) procura mantener un stock limitado y ordenado de tales contaminantes. Sin embargo, la política de “póngalo debajo de la alfombra” ha sido y continúa siendo utilizada (y los acopios de estéril pueden ser una atractiva alfombra). En consecuencia, ésta es una de las tareas más complejas y que demandan más laboriosidad y paciencia de un programa de cierre.

Por otra parte, ciertos contaminantes tienden a ser sobreestimados en sus efectos nocivos, probablemente complicando y encareciendo innecesariamente las tareas. Al respecto si uno menciona “una contaminación de varios m de ancho y más de 100 km de largo formada por una capa de hidrocarburos pesados” las personas tienden a imaginar una catástrofe ambiental. En cambio, si se les habla de un camino

asfaltado de igual longitud (vale decir lo mismo) nadie evoca tal catástrofe...

El tema de los hidrocarburos en suelos del desierto del norte de Chile, producto de la operación y mantención de maquinaria, fue considerado por Godoy-Faúndez et al (3: 407-411), quienes proponen un método de bioremediación para tratar los materiales contaminados (suelos y aserrín usado en su recolección). El método propuesto consigue un 35 a 60 % de remoción al cabo de 42 días de continuo tratamiento.

Una solución tentadora para deshacerse de materiales molestos durante la operación minera o al enfrentar su cierre es licitarlos a bajo o cero coste. Sin embargo, si ello se realiza sin una efectiva consideración y aseguramiento del destino de esos materiales, puede causar mucho más daño que si simplemente se los dispusiera en el sitio de la explotación. Hace algunos años, un memorista (= tesinando) genuinamente preocupado por el tema ambiental y cuya memoria se relacionaba con el manejo de este tema en una gran empresa minera, decidió seguir la pista de las baterías usadas licitadas. Su descubrimiento de que ellas terminaban desparramadas sobre un sitio eriazado de Santiago, generando una efectiva y peligrosa contaminación por plomo, fue recompensado con el reproche de su supervisor en la empresa, quien no deseaba recibir noticias molestas.

En suma, este es un tema complicado, que requiere un manejo especialmente responsable por parte de la empresa, así como un inteligente y honesto análisis de riesgos, tanto por parte de la empresa como de las autoridades reguladoras. Es necesario centrarse en lo que de veras importa y hacerlo bien, aunque otras cosas sean más decorativas y se presten más al lucimiento (incluyendo publicaciones científicas...). Desde luego ello implica aceptar algunas imperfecciones, porque siempre los medios humanos y materiales serán limitados.

## Capítulo 9: **Estabilización y Protección de Desechos Minero-Metalúrgicos.**

### 9.1: **Principales Tipos de Desechos Sólidos Minero-Metalúrgicos.**

Como señalan Fourie y Tibbett (3: 3-12) la restauración, y en particular la cubierta de protección de los desechos sólidos mineros, representan uno de los mayores desafíos en materia de diseño y costes de un cierre minero, por lo que demandan especial atención. Estos desechos sólidos pueden ser agrupados en tres grupos principales: depósitos de relaves, pilas de lixiviación (*heap leaching*) y botaderos de estériles (= escombreras). Como veremos a continuación existen variaciones importantes al interior de los dos primeros grupos, tanto en materia de composición como del proceso físico de depósito.

Los depósitos de relaves constituyen el desecho de un proceso de flotación, precedido por una molienda fina del material a tratar. Aunque la mayoría de los depósitos corresponden al tratamiento de minerales sulfurados, los hay también de la minería no metálica (concentración de bauxita), de la flotación del carbón, etc.

En el caso de los minerales sulfurados, el relave está constituido por agua, restos de la roca encajadora de la mineralización, minerales de ganga (carbonatos, sulfatos, etc.) y pirita (más otros sulfuros de nulo valor económico), que han sido “deprimidos” para evitar que rebajen la ley del concentrado. Además, contienen restos de las sustancias orgánicas e inorgánicas utilizadas para el manejo del pH y de las propiedades de superficie (“surfactantes”) de los minerales, que permiten controlar el proceso de flotación. Inicialmente, los relaves de flotación de sulfuros presentan un pH básico, debido a los requerimientos del proceso. Sin embargo, su evolución posterior, dependiente del porcentaje de pirita y otros sulfuros incluidos, puede determinar que evolucionen a condiciones de menor pH, lo que implica el riesgo de generación del drenaje ácido. Por otra parte, el molibdeno contenido en el agua del relave es soluble en condiciones básicas oxidantes, por lo cual puede ser un contaminante importante en percolados de relaves “frescos”.

Los depósitos de relaves se presentan generalmente en embalses o “tranques” construidos en depresiones o en quebradas, y contenidos por un muro de material sólido o bien por la fracción más gruesa, que sedimenta en esa zona (con o sin la ayuda de ciclónado), mientras la fracción fina acompaña al “sobrenadante”, formando un pequeño lago donde sedimenta. Se forma así un depósito cuya granulometría varía en la horizontal (entre arena y limo fino), que en un corte vertical presenta el aspecto típico de un sedimento lacustre finamente estratificado. Sin embargo, esta situación puede alterarse en el caso de los relaves “en pasta”, que poseen la consistencia de un mortero, debido a la extracción del agua por un proceso avanzado de centrifugación y que por lo tanto pueden disponerse libremente sobre la superficie del terreno.

Aparte de los riesgos de percolación de soluciones contaminantes, los depósitos de relaves pueden ser muy inestables frente al efecto de ondas sísmicas, cómo se manifestó en el flujo de los relaves de la mina El Soldado (Región de Valparaíso), que arrasaron el pueblo de El Cobre, causando más de 400 muertes en 1965 (Aliste, et al 15). Otro riesgo importante en el caso de zonas áridas o semiáridas, se refiere a su erosión eólica. Aparte del efecto que ello tiene en términos del incremento de partículas respirables en el aire, algunos de los minerales presentes en el relave pueden tener efectos particularmente negativos. Es el caso, por ejemplo, de las fibras de asbesto derivadas de la alteración de actinolita, mineral presente en muchos relaves de la faja de Fe-Cu-Au de la Cordillera de la Costa del norte de Chile.

Finalmente, la posición de muchos depósitos de relaves al interior de quebradas o en la planicie aluvial de los ríos, implica riesgos importantes de erosión hídrica, y por lo tanto de contaminación de los cursos fluviales y canales de regadío.

Las pilas de lixiviación de minerales corresponden a dos tipos: a) pilas de lixiviación alcalina cianurada para extracción de oro y b) pilas de lixiviación ácida para lixiviación de minerales de cobre. También en este caso hay distintas modalidades de operación, y se distingue entre pilas estáticas, que se mantienen y desarrollan en el mismo sitio, y pilas dinámicas, cuyos materiales “agotados” son retirados y dispuestos en otro sitio.

Tanto en el caso de las pilas alcalinas como de las ácidas, el material es sometido a tratamiento previo, que puede incluir molienda, aglomeración y “curado” con ácido (en el caso de la lixiviación ácida). Sin embargo, en casos especiales (minerales de baja ley que no resisten los costes de la preparación), el mineral puede ser puesto a lixiviar después de una molienda previa gruesa. En el caso de la lixiviación de minerales de cobre, éstos pueden estar constituidos por sulfuros ricos (principalmente calcosina  $\text{Cu}_2\text{S}$ ), oxidados (sulfatos, carbonatos, silicatos, etc.) o mezclas de sulfuros y oxidados. Aunque la acción bacteriana genera ácido sulfúrico por oxidación de sulfuros, en los tres casos se utiliza una solución lixivante que contiene ese ácido.

Aunque el fondo de la pila de lixiviación se prepara cuidadosamente y está protegido por geomembranas, necesarias para colectar los metales lixiviados (sean Cu o Au), es normal que existan ciertas pérdidas, que tienden a aumentar cuando los materiales envejecen o son sometidos a estrés (p.ej., sísmico). Por lo tanto es necesario adoptar medidas de protección durante y después de su uso.

Respecto a posibles fugas, las pilas de cianuración despiertan especial recelo en la población local y fueron seguramente la principal causa del rechazo al proyecto de Meridian Gold en Esquel, Argentina. Ello es normal, considerando que el cianuro es un veneno tan conocido como el arsénico, aunque tiene la ventaja de ser un compuesto de relativamente fácil degradación a formas químicas inofensivas.

Como los depósitos de relaves, las pilas de lixiviación deben ser protegidas tanto de pérdidas por percolación como de la erosión eólica, materias que serán consideradas en las siguientes secciones.

Finalmente, los botaderos de estériles (o minerales de ley sub-económica acumulados considerando posibles cambios de precios o tecnologías), ofrecen la ventaja de su mayor estabilidad física, producto de su granulometría de bloques. Ello los protege de la erosión y de las vibraciones sísmicas, aunque al mismo tiempo los hace más vulnerables a la infiltración de agua, constituyendo posibles fuentes de drenaje ácido, si su litología y mineralogía así lo determinan.

## 9.2: Factores a Considerar en el Diseño de Cubiertas Protectoras.

Se entiende que la base de los depósitos de desechos sólidos de la actividad minero-metalúrgica debe ser preparada (ojalá para resistir el paso del tiempo y de los sismos) al inicio de su construcción. En consecuencia, si no hay muestras de fallas en ese aspecto, corresponde al plan de cierre preocuparse de rectificar sus taludes e instalar una cubierta que los proteja de la infiltración de agua y de la erosión eólica. En cuanto a la erosión hídrica, corresponde también al plan de cierre prevenirla (ver Capítulo 7), entendiendo eso sí que el diseño original tuvo el buen criterio de no situar los depósitos de desechos sólidos cerca del paso de posibles torrentes o cursos fluviales.

En la presente sección hay dos materias importantes a considerar, las que por otra parte están bastante ligadas entre sí. Ellas corresponden respectivamente a las condiciones climáticas del sitio y a los factores generales a considerar en el diseño y la composición de la cubierta.

En condiciones áridas o semiáridas, la infiltración de agua representará un problema menor. En cambio, la cubierta debe ser lo suficientemente estable para proteger el depósito de la erosión eólica, favorecida por la falta de humedad y vegetación.

Lacy y Barnes (3: 767-775) analizaron el cierre de depósitos de relaves en las regiones áridas de Australia Occidental. Los autores recomiendan aprovechar la etapa de explotación del yacimiento para probar distintas soluciones y variables, junto con una clara comprensión inicial (pre-explotación) de las propiedades mineralógicas y geoquímicas del material que integrará los relaves. Por otra parte, es importante responder a una serie de interrogantes que incluyen los objetivos del cierre, el uso final del sitio en restauración y las expectativas de las partes interesadas. En materias científico-técnicas, interesan en particular las variables climáticas cuantía y distribución de las precipitaciones, y potencial de evaporación, drenaje superficial y subterráneo, potencial de drenaje ácido del material de los relaves, presencia de metales pesados tóxicos y materiales disponibles para la construcción de la cubierta.



La selección de la vegetación a utilizar se realiza principalmente a través de métodos empíricos. En el área considerada por Larcy y Barnes las precipitaciones son inferiores a 300 mm (similares a las de Chile central) y se distribuyen esporádicamente en el año; la elevación es de unos 500 m. Las temperaturas fluctúan en verano entre 23° y 38° C y en invierno entre 7° y 20° C y la topografía es suavemente ondulada. Las pruebas de selección de vegetación utilizaron cubiertas de material de 100 a 250 mm, y se dejaron áreas sin cubrir como control. También se utilizaron barreras para proteger el sitio de animales. Las pruebas incluyeron, además, un tratamiento físico y químico, para evaluar la influencia de la textura y composición (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.) en el comportamiento de las plantas a lo largo de un período de 5 años, con controles bianuales. Estas pruebas fueron seguidas por una segunda serie en sitios más complejos. Las conclusiones finales mostraron la importante influencia del material de la cubierta, especialmente en términos del control de la capilaridad.

Aunque se utilizaron especies de plantas nativas propias de la región semiárida, algunas muy resistentes a la salinidad (halófitas), ese factor, así como el efecto de años secos, se mostraron como los problemas principales, siendo necesario proveer externamente la humedad para asegurar su supervivencia.

Otra experiencia de cierre, que incluye tanto protección de relaves como botaderos en ambiente árido, ha sido descrita por O'Kane et al (3: 709-722) para la mina Bajo de la Alumbraera, Catamarca, Argentina. En el caso descrito, el mayor desafío consiste en evitar la contaminación del Río Vis Vis a través del drenaje superficial o subterráneo del sitio, que será cubierto por 500 ha de botaderos y 900 ha de relaves. Las precipitaciones en la zona alcanzan unos 160 mm anuales, de los cuales la mitad puede ser depositada en un solo mes (Enero – asociada al Invierno Altiplánico). El potencial de evaporación alcanza unos 1400 mm.

La estrategia de la empresa (Minera Alumbraera) consulta el cierre progresivo de los depósitos a lo largo de la explotación del yacimiento. Se han evaluado varios tipos de recubrimientos, considerando también modelaciones de su comportamiento: relaves con cubierta de 0.5 m de material molido no-reactivo de la mina, botaderos con 1.5 m de material de desecho "benigno". Después de tres años de monitoreo, los diferentes

materiales utilizados han mostrado su capacidad para mantener una mínima percolación, en acuerdo con las predicciones del modelo calibrado. Al respecto, es obvio que la favorable relación entre las bajas precipitaciones anuales y el alto potencial de evaporación han colaborado con el efecto de las cubiertas. En el caso de los relaves no cubiertos, se estima que la percolación no pasará de un 1.5 % de la precipitación total en el período modelado de 10 años.

Considerando la información entregada por el trabajo reseñado, se puede estimar que en casos como el descrito los riesgos mayores se asocian a la erosión eólica de los relaves no cubiertos, así como al eventual efecto erosivo hídrico de precipitaciones intensas (lo que puede ser manejado a través del diseño del drenaje superficial).

Una situación opuesta se registra en regiones lluviosas como en el sitio de Pierina, explotación aurífera a cielo abierto de Barrick en el Departamento de Ancash, Perú (Zhan et al; 3: 633-644), ubicada entre 3800 y 4200 m de altitud. La precipitación anual del sitio llega a unos 1200 mm, contra 1060 mm de evaporación potencial, y en su mayor parte cae entre los meses de Octubre y Abril, asociada a tormentas.

La explotación, que incluye el beneficio de la mena mediante pilas de lixiviación cianurada, se inició en 1998, y de inmediato se consideró su futuro cierre, el que comprende cubiertas protectoras para los depósitos de estéril y las pilas de lixiviación agotadas. La cobertura diseñada incluye una capa de baja permeabilidad (arcilla/limo), sobre la cual se dispone una cubierta de suelo vegetada con propiedades evapotranspirativas. El material de cubierta arcillo-limoso se dispuso en los ensayos con grados de compactación distintos (compactado a 35 cm, no compactado 55 cm) y sobre él se situó un suelo de 30 cm. Esto, sobre una pendiente de la pila 2.5:1. También se colocaron dispositivos de drenaje, a intervalos regulares en la capa de suelo, los que se mostraron muy efectivos para reducir la infiltración. Las pruebas realizadas demostraron que la infiltración se redujo a un 6-15 % del agua precipitada y que la capa no compactada de arcilla/limo presenta una mayor capacidad de reducir la infiltración que aquella compactada. Aunque la vegetación implantada no afectó significativamente la infiltración, sí contribuyó a disminuir la velocidad de escorrentía y la erosión.

Las experiencias también mostraron que áreas planas facilitan el encharcamiento del agua, y por lo tanto la infiltración, por lo cual el diseño debe evitarlas en condiciones de clima húmedo. Respecto al contenido de oxígeno del agua infiltrada, sólo se observó una ligera disminución por efecto de la capa arcillo-limosa.

El uso de material de cubierta constituido por “pasta de roca” (roca molida mezclada con material de relaves) en la protección de depósitos de relaves fue evaluada en el sitio de Copper Cliff en Notario, Canadá (Miskolczi y Wilson 3: 689-700) durante un año (2001). Los resultados obtenidos fueron positivos respecto a la capacidad de una cubierta de 600 o más mm de espesor para actuar como una barrera efectiva contra la infiltración de agua, la cual puede ser aún mejorada, agregando 1.5 % de bentonita. Al contrario de los resultados reportados por Zhan et al (op. cit.) para Pierina, en este caso la compactación jugó un rol positivo en la reducción de la infiltración. (Nota: en principio, se debería esperar que la compactación siempre implicará mayor impermeabilidad. Sin embargo, es posible que en algunos casos genere estructuras secundarias verticales que produzcan un resultado opuesto).

El uso de materiales geotécnicos (geomembranas) en conjunto con aserrín, para proteger “relaves” derivados del tratamiento de purificación de bauxita, fue descrito por Worthington et al (3: 655-664). En este caso la protección se refiere al efecto de la erosión hídrica durante lluvias intensas en Collie, Australia. Aunque la vegetación podría cumplir también ese rol, ella puede ser inestable bajo pendientes fuertes como la de los relaves considerados (2.25:1). Por otra parte, esas superficies son muy vulnerables a la erosión en el período entre su construcción y el establecimiento de la vegetación. El método utilizado demostró una muy buena protección contra la erosión, pero implicó un pobre crecimiento vegetal sobre el depósito. Al respecto, los autores señalan que, aunque la vegetación es el mejor control de la erosión (intercepta la lluvia, disipa la energía del escurrimiento, atrapa sedimentos, es permanente (si el clima es adecuado) y sus raíces afirman el suelo, al mismo tiempo facilita la infiltración del agua (lo que puede tener efectos negativos en términos de contaminación).

Finalmente, dos trabajos presentan una perspectiva general sobre los problemas e incertidumbres que implica esta materia, en particular cuando se trata de evaluar efectos a largo plazo.

Weeks y Wilson (3: 683-688) sostienen que aunque la importancia de cubrir los depósitos de desechos sólidos mineros está bien establecida, las metodologías de predicción de su comportamiento están aún en evolución. En particular, aspectos como la orientación de las pendientes y su efecto en la evaporación no son considerados por los modelos y pueden tener efectos serios en su comportamiento. Por su parte, Fourie y Tibbett (3: 3-12) analizan lo referente al comportamiento a largo plazo de las cubiertas. Ellos afectan a sus propiedades hidráulicas, en particular las de cubiertas destinadas a actuar como barreras, siendo la actividad de los procesos pedogénicos una causa principal del daño.

En relación con el tema del comportamiento a largo plazo de las cubiertas es importante definir que se entiende por tal ¿décadas? ¿siglos?. Es evidente que ni los ejecutores del cierre ni las autoridades que lo aprobaron deberán responder cuando tal plazo se cumpla. Pero esa es una razón más para actuar con la mayor responsabilidad posible, porque al fin y al cabo se trata de un legado al futuro...

### 9.3: Estabilización y Protección de Depósitos de Relaves.

En esta sección consideraremos algunos aspectos específicos de la estructura, riesgos y protección de los depósitos de relaves. El Manual del ITGME (= IGME) (1) presenta en sus páginas 45 a 57 un completo resumen de los métodos de construcción de las presas o tranques de relaves o “residuos”. Entre los principales factores a considerar en su ubicación y diseño, señala:

- A) **Factores locales:** a) Geología; b) Sismicidad; c) Topografía; d) Red de drenaje; e) Hidrogeología; f) Clima.
- B) **Características de los lodos:** a) Granulometría; b) Contenido de arcilla; c) Mineralogía y química; d) Método de vertido; e) Densidad; f) Lixiviabilidad.

- C) **Características de los efluentes:** a) pH; b) Cationes metálicos; c) Potencial redox; d) Toxicidad; e) Volumen; f) Necesidad de evaporación.
- D) **Limitaciones ambientales:** a) Calidad del aire; b) Calidad de aguas superficiales y subterráneas; c) Requerimientos de restauración; d) Drenaje superficial.

El tema de la sismicidad debe ser considerado con especial seriedad en los países andinos, especialmente si existen poblaciones en la posible ruta de los lodos, o si hay recursos importantes que el flujo de lodos pueda contaminar aguas abajo. Al respecto, la vibración sísmica eleva las presiones de poro, y el agua que actúa como adhesivo tipo van der Waals entre las partículas finas, se separa (efecto tixotrópico) con el resultado de que el sólido fluye como un líquido denso. Troncoso y Garcés (3: 31-41) señalan que la resistencia a la cizalla, la resistencia cíclica y la rigidez del material del relave aumentan con el paso del tiempo, favoreciendo su resistencia a eventos sísmicos. Sin embargo, en el caso del flujo de los relaves de la mina El Soldado (ver 9.1) tanto los relaves jóvenes como el relave “viejo” fallaron, causando una catástrofe en pérdida de vidas humanas. Por otra parte, no fue el único sitio afectado por fallas de depósitos de relaves, pero era el único que tenía cerca, pendiente abajo, un poblado, El Cobre, que ya existía cuando se inició el depósito de los relaves. En consecuencia, es mejor suponer que los relaves efectivamente fallarán y disponerlos donde no impliquen peligros importantes si ello ocurre. Un ejemplo importante de falla de un embalse de relaves producto de un error geotécnico en su fundación y sin intervención de actividad sísmica, ocurrió en Aznalcóllar, Sevilla, España (de Vallejo et al, 16), afectando a un afluente del río Guadalquivir y al Parque Nacional de Doñana. La ruptura del embalse de 28 m de altura, perteneciente a la empresa minera Boliden-Aprisa, se debió a un deslizamiento de muy bajo ángulo producido en margas azules de su fundación, sometidas a alta presión intersticial de agua. Por efecto del derrame se produjo una fuerte y extendida contaminación con metales pesados a lo largo del río, que requirió una larga y prolija limpieza para mitigar sus efectos. Ello ilustra la importancia de realizar estudios geotécnicos serios al decidir la fundación de estas estructuras.

El Manual del ITGME (= IGME) distingue cuatro tipos de métodos de construcción de presas de residuos, a saber:

- A) **Presa convencional “de escollera”**. Implica la construcción de un dique inicial de material rocoso y finos para impermeabilizarlo. Su resistencia sísmica y capacidad para almacenar agua son buenas, pero su coste es alto.
- B) **Construcción “aguas arriba”**. Es el método más utilizado. Construido un dique inicial, se van levantando sucesivos diques más altos hacia el interior de la presa, formados con los materiales más gruesos, arenosos, del lodo, ya sea decantados naturalmente o mediante ciclonado. Es el sistema más económico, pero su capacidad para resistir sismos es mala, al igual que su capacidad para almacenar agua.
- C) **Construcción “aguas abajo”**. Como su nombre lo indica su modo de construcción es el inverso del anterior. Es más seguro para almacenar residuos, y se asemeja a las presas de tierra convencionales. Parte de un dique inicial construido con materiales naturales y puede incluir núcleos impermeables y elementos de drenaje para control del nivel freático y filtraciones. Su capacidad para almacenar agua y su resistencia sísmica son buenas, pero implica un alto coste de construcción.
- D) **Construcción “centrada”**. Combina los dos métodos anteriores. Su estabilidad sísmica es intermedia, al igual que su capacidad de almacenamiento de agua y su coste relativo.

Otro modo de construcción es el de **“descarga espesada”**, con una concentración de sólidos de 55 – 65 %, los que se descargan en un solo punto, de manera que el depósito adopta forma cónica. Aunque no requiere la construcción de una presa, se debe instalar un sistema de recolección, represado y decantación del efluente líquido. Es muy inestable frente a eventos sísmicos.

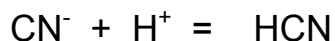
Al cerrar un depósito de relaves es conveniente remodelar su topografía, con el objeto de reducir las tensiones en la base del dique. Esto se puede hacer descargando parcialmente el material de

coronación, que puede ser usado como refuerzo al pie del depósito, sobre una capa de material filtrante. Puesto que frente a la erosión eólica el material ofrece escasa resistencia, es necesario cubrirlo, y en lo posible vegetarlo (tema de la sección anterior).

Finalmente, Williams (3; 533-542) analiza las distintas estrategias propuestas para reducir la infiltración de líquidos percolados desde depósitos de relaves durante las etapas de operación y de post-cierre. El hecho de que sean cubiertos (para prevenir otros problemas, ya discutidos en 9.2) implica que se impide la pérdida de líquido por evaporación. Mientras parte del agua permanece retenida en el material del relave, otra es recogida en su base y evaporada en una laguna de decantación. Para impedir que parte del agua escape bajo la base o por las paredes del depósito, conviene que el relave sea depositado tan seco como sea posible, y permitir la evaporación durante el proceso de depositación. También es importante asegurarse de que la zona vadosa bajo el relave permanece insaturada. Respecto al tema de la erosión, Williams sostiene que en regiones áridas o semi áridas como las de Australia, la vegetación natural es incapaz de proteger el relave y que se requiere de una estructura protectora de soporte para los arbustos implantados.

#### **9.4: Estabilización y Protección de Pilas de Lixiviación y Botaderos.**

Como ya hemos señalado, el riesgo de contaminación con cianuro desde pilas de lixiviación alcalina de oro, constituye un tema de mucha importancia real, el que además se magnifica en la percepción de la opinión pública. El cianuro es un conocido veneno y su forma ácida (HCN) se utiliza en USA para ajusticiar a los condenados a muerte en la cámara de gases. Si baja el pH de la solución cianurada, se forma el gas HCN:



En consecuencia, no es de extrañar la desconfianza con que las comunidades cercanas a una explotación activa o cerrada ven este tema (p.ej., caso Meridian Gold, en Esquel, Argentina, ya antes mencionado).

Sin embargo, a diferencia del As, que es un elemento químico, el cianuro está formado por la combinación de dos elementos inofensivos, tiende a descomponerse naturalmente en condiciones favorables y la velocidad de tal descomposición puede ser acelerada mediante varios procesos. Por otra parte, mientras As se acumula en el organismo, el cianuro no es acumulativo, lo cual es otro punto a su favor.

Mitchell (2: 270-273) presenta una completa revisión de las alternativas de tratamiento del cianuro, no todas las cuales se prestan para su degradación en las pilas, pero sí para el de sus percolados. Dichas alternativas incluyen:

- Degradación natural
- Proceso con peróxido
- Proceso  $SO_2$ /aire de INCO
- Método Cyanisorb
- Cloración alcalina.
- Bio – Tratamiento
- Humedales artificiales
- Intercambio iónico
- Precipitación de  $CN^-$  libre

El hecho de que el cianuro sea utilizado para lixiviar el oro, responde a su capacidad para formar complejos solubles con muchos metales pesados (Zn, Cd, Hg, Fe, etc.). El oro, que requiere un elevado ambiente oxidante para disolverse como  $Au^+$ , al formar complejos puede hacerlo en condiciones oxidantes moderadas, lo que permite su disolución en forma de complejo cianurado. Los complejos cianurados se encuentran en equilibrio con otras formas químicas, de modo que si el pH disminuye se forma **naturalmente** HCN, reacción catalizada por la luz ultravioleta. Sin embargo, este proceso no es satisfactorio debido a su lentitud (especialmente si no hay tiempo suficiente para exposición a la luz uv) y a su difícil control.

El proceso con **peróxido de hidrógeno** (“agua oxigenada”) destruye directamente el  $CN^-$ , sin formación de compuestos intermedios, de modo que da lugar a la formación de amoníaco y carbonato.

El proceso  **$SO_2$ /aire de INCO**, que usa cobre como catalizador, sirve para oxidar cianuros metálicos a cianatos, con la formación de cianuro de Fe insoluble y de sales estables de ferrocianuro. Su empleo requiere que el material lixiviado sea tratado antes de su disposición.



La **cloración alcalina** es el método más antiguo y el más conocido. La aplicación de cloro oxida el cianuro pero da lugar a la formación de compuestos intermedios (como cloroaminas) que deben ser tratados, junto con el exceso de cloro, antes de disponer el material. La tendencia actual es la de preferir otros métodos de oxidación.

El **biotratamiento**, como se practicó con éxito en la mina Mc Laughlin de Homestake desde 1983, utiliza *Pseudomonas*, en asociación con nitrificación bacteriana de amoníaco y adsorción/precipitación de metales libres en biofilms.

**Humedales (*wetlands*) artificiales** podrían ser utilizados para degradar efluentes líquidos con cianuro, pero no se conocía con exactitud (al año 2000) ni su efectividad ni el mecanismo de degradación involucrado.

**Intercambio iónico.** Puede ser utilizado para extraer cianuro de efluentes líquidos. Las resinas son luego limpiadas acidulándolas para llevar el  $\text{CN}^-$  a HCN, que a su vez es neutralizado con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o NaOH (método **Cyanisorb**).

**Precipitación de cianuro libre**, utilizando Fe, para inmovilizarlo como cianuro de Fe. Es un método sencillo para remover  $\text{CN}^-$  de efluentes líquidos. Sin embargo, a largo término el cianuro de Fe puede liberar cianuro nuevamente, lo que debe ser considerado.

Ninguna de las tecnologías reseñadas resuelve todas las posibles necesidades. Por el contrario, hay situaciones en que se requiere combinarlas como es justamente el caso del tratamiento de pilas de lixiviación y de sus efluentes líquidos. En consecuencia se recomienda seleccionarlas considerando las condiciones específicas y requerimientos de cada sitio.

La lixiviación se puede practicar de tres maneras: *heap* (en pilas), *dump* (sobre botaderos = escombreras) e *in situ*, aparte de la denominada *vat* (en estanques). La lixiviación en pilas se realiza sobre materiales relativamente homogéneos, dispuestos en pilas construidas sobre superficies especialmente preparadas. La construcción persigue lograr una lixiviación homogénea e impedir pérdidas del lixiviado, que implicarían daño tanto ambiental como económico. Pueden ser

removidas y reemplazadas por material fresco (pilas dinámicas) o simplemente crecer vertical y horizontalmente. En todo caso, sobre ellas existe permanente control, al menos durante la etapa de explotación.

Un análisis de las tendencias para el cierre de operaciones de lixiviación en pilas en Nevada, USA, realizado por Frechette (3: 613-617) señala que los esfuerzos se han centrado en dos aspectos: a) Estabilización y rehabilitación de la pila agotada; b) Control del drenaje a corto y largo término desde la pila. En el segundo aspecto, la práctica general ha sido utilizar las anteriores piscinas como dispositivos de evaporación (o celdas de evapo-transpiración si se utiliza vegetación). Es común que el drenaje de la pila continúe uno o dos años (a veces más) después de su cierre. Si la química del drenaje no permite su exposición al aire libre, se conduce a una piscina rellena, donde la evaporación ocurre desde el líquido, situado a poca profundidad bajo la superficie del relleno (efecto que puede ser incrementado mediante la transpiración de plantas). Naturalmente, el clima juega un rol principal en el éxito de estos procesos, que se facilitan en condiciones áridas.

A diferencia de la lixiviación en pilas, el *dump leaching* consiste en la lixiviación en botaderos de minerales de baja ley, amorfos y heterogéneos, acopiados en espera de que circunstancias económicas favorables (alza del precio del metal, disponibilidad de ácido sulfúrico barato, en el caso del cobre) permitan su recuperación (p.ej., de cobre en botaderos de Chuquicamata). El artículo de amplio enfoque de Bridge (2: 175-201) revisa el conjunto de los desafíos que implica la protección de la calidad del agua de los riesgos asociados a la operación y al cierre de operaciones de lixiviación de botaderos. Bridge considera de especial seriedad los riesgos que implica la contaminación del agua subterránea, la dificultad que implica remediar esa contaminación y los costes de su monitoreo a largo plazo. Ello, aparte de la grave responsabilidad que implican los daños a la salud y el ambiente.

Respecto a los riesgos para el agua subterránea, ellos se refieren a la ausencia de una superficie aislante que brinde una efectiva protección a los cuerpos de agua subterránea. En Arizona (USA) se reconoce tal situación y sólo se exige que esa contaminación no tenga una extensión importante, lo que se maneja a través del control de gradientes hidráulicos. En zonas áridas, la alta tasa de evaporación puede permitir

que el mismo rajo abierto de la mina actúe como un receptáculo para el agua subterránea contaminada.

En los Estados Unidos (USA) el cierre de operaciones de lixiviación en botaderos se había completado a fines de la década de los 1990's para varias operaciones auríferas, pero no aún para operaciones cupríferas. Típicamente han incluido la neutralización de la mena y los residuos, la eliminación de líquidos libres, la estabilización geotécnica, erosiva y química del sitio y la restauración y cubierta de la superficie. Las características del sitio influyen mucho en el éxito o falla de lo realizado y es importante considerarlas al seleccionar las tecnologías a aplicar. En general, se reconocen dos categorías de técnicas de tratamiento, las que procuran reducir la contaminación a través del tratamiento previo de los contaminantes potenciales, y las que buscan lograrlo reduciendo su potencial de migración y aislando la fuente de contaminantes.

Aparte del riesgo de contaminación acrecentado que implica la lixiviación de botaderos, este tipo de depósitos, por su sola presencia, interfiere con la hidrología del sitio y favorece la contaminación del agua subterránea. Al respecto, Williams y Rohde (34: 521-532) describen el efecto del botadero en la reducción de la evaporación del drenaje superficial original. A ello se agrega la alta permeabilidad de estos depósitos, que facilita la infiltración de las precipitaciones atmosféricas y su almacenamiento en la base del depósito, así como la lixiviación de sus materiales solubles, facilitada por la progresiva oxidación de los fragmentos acumulados. En condiciones desfavorables, como fuertes lluvias o una continua acumulación de agua, se puede generar un flujo casi continuo de agua contaminada hacia el drenaje subterráneo. Ello hace necesario cubrir los botaderos con un material que reduzca efectivamente la infiltración, después de aplanar su parte superior (y que ofrezca garantías de "durabilidad" en las condiciones climáticas del sitio). Sin embargo, si esa cubierta se coloca tardíamente (vale decir, sólo en el momento del cierre), el botadero puede seguir percolando aguas contaminadas durante varios años. De ahí la necesidad de cerrar los botaderos progresivamente durante la etapa operacional activa de la explotación.

El Manual del ITGME (= IGME) (1) analiza la estabilización física de los botaderos y la necesidad de asegurarla en la etapa de abandono (pp 40-43). Entre los factores que intervienen está el tamaño, peso específico y angularidad de los bloques. Si ellos son favorables (bloques grandes, angulares, de rocas ígneas poco alteradas, su resistencia al corte puede ser bastante alta, incluso frente a las vibraciones generadas por eventos sísmicos. En todo caso conviene analizar esta materia cuidadosamente (Al respecto, la Universidad de La Serena dispone de un equipo de gran tamaño para medir la resistencia al corte de agregados de bloques de tamaño decimétrico).

### **9.5: La Estabilidad a Largo Plazo de las Cubiertas Protectoras.**

El concepto básico de los planes de cierre de explotaciones mineras se enmarca en los del desarrollo sustentable y la equidad intergeneracional. Ello implica considerar horizontes de tiempo que exceden en mucho la hoy cada vez más corta vida de las empresas mineras. Lo segundo obedece a su vez a dos causas principales. Por una parte, los análisis financieros recomiendan (y las tecnologías permiten) completar las explotaciones en el plazo más breve posible. Por otra, las empresas mineras han entrado en una vorágine de adquisiciones y fusiones que hace difícil incluso su seguimiento y cuyos propietarios y ejecutivos están en permanente cambio.

Algo parecido ocurre en los Estados, cuando se les confunde, como es frecuente, con los Gobiernos, también en cambio permanente. En los países con mayor solidez institucional, como Inglaterra o Francia, ello se resuelve a través de sistemas administrados por funcionarios muy estables y competentes, que van moldeando políticas “de Estado”, al margen de los vaivenes de los cambios de gobierno. No ocurre así, sin embargo, en nuestros países, donde cada elección suele significar una diferente política minera, ambiental, etc. (y en Chile eso ocurre ahora cada cuatro años...).

En consecuencia, cada vez se aleja más la toma de decisiones de la responsabilidad por sus consecuencias, tanto para los proponentes por parte de la empresa minera como para las que deben autorizar o rechazar tales proposiciones.

Por otra parte, si bien las fallas de un cierre pueden hacerse patentes pocos años después de realizado, su éxito sólo puede comprobarse décadas o siglos después. En consecuencia es necesario lograr una razonable seguridad de que lo propuesto tiene efectivas probabilidades de no fracasar en los aspectos más importantes. Puesto que los cierres de minas planificados datan sólo de las últimas dos décadas, (y las EIAs de proyectos mineros de las últimas tres), es temprano aún para recoger los frutos de las experiencias positivas y negativas, excepto en casos de desastres ambientales como los de Panguna, Ok Tedi, Summittville, etc.

Sin embargo, si buscamos orientación en disciplinas como la geomorfología, que estudia procesos a escala de tiempo adecuadas a estas materias, podemos hacer algunas proyecciones básicas. Consideremos, por ejemplo, tres situaciones características, dos extremas y una intermedia para el caso de un yacimiento sulfurado con potencial de generación de drenaje ácido situado en: a) Topografía montañosa, en condiciones de alta pluviosidad; b) Topografía intermedia, en clima templado moderadamente lluvioso; c) Topografía suave, en condiciones de clima árido.

En el primer caso, la erosión hídrica y los procesos de remoción en masa serán los principales problemas, y si no se manejan adecuadamente (lo cual es difícil) se puede llegar a desastres como los de Panguna u Ok Tedi. Tanto el manejo del drenaje como el de las pendientes será esencial, pues la remoción en masa no respeta ni las laderas mejor vegetadas. Mientras el drenaje ácido que llegue a liberarse será diluido por el medio, el material en suspensión puede dañar seriamente la calidad del agua de los ríos. Por otra parte éste es un ambiente muy dinámico y cambios importantes pueden ocurrir en cortos intervalos de tiempo.

En el segundo caso, cuyas condiciones se aproximan a las de Montana (USA), el drenaje ácido puede constituir el principal problema. En cambio, se puede esperar un buen comportamiento de la estabilidad de los depósitos de desechos sólidos si fueron morfológicamente restaurados y bien cubiertos y vegetados. Ello, puesto que existen las condiciones para el sustento de una vegetación permanente, que incluya el desarrollo de hierba junto a arbustos y árboles.

En el tercer caso, el drenaje ácido puede o no ser un problema mayor, dependiendo de la ubicación del yacimiento respecto a poblaciones, cultivos y la red de drenaje. Aunque la evaporación ayuda a minimizar el drenaje, a su vez incide en la concentración de metales pesados. Por otra parte, los ríos de zonas áridas tienden a tener menor flujo, por lo cual la contaminación ejerce mayor efecto. Sin embargo, el mayor riesgo puede estar ligado a la erosión eólica, en particular si quedan grandes superficies de depósitos de relaves, si la zona está afectada por fuertes vientos y si hay poblaciones o cultivos que pueden ser alcanzados por esos materiales.

Este último caso es importante en Chile, donde la mayoría de sus explotaciones se encuentra en zonas áridas, al igual que los nuevos proyectos en construcción o evaluación. La observación del paisaje natural sometido al efecto del viento muestra la vulnerabilidad de los materiales de baja granulometría en el norte de Chile. En tales condiciones, un gran depósito de relaves pasa a ser una anomalía geomorfológica que, tarde o temprano será corregida por el efecto del viento o de las esporádicas (pero a veces muy intensas) precipitaciones.

Como señalan Ginocchio et al (3: 465-474), los esfuerzos por detener la erosión de depósitos de relaves abandonados mediante forestación no han logrado una implantación sustentable, la cual requiere "más que trasplantar las especies adecuadas de plantas". Por otra parte, es fácil observar como las sequías prolongadas en esta zona transicional (Chile norte-central) terminan incluso con la vegetación natural bien implantada. Con mayor facilidad entonces lo lograrán sobre un depósito de relaves, que es análogo a una gran duna. Ello no implica que las operaciones mineras no puedan mostrar bonitos ejemplos de relaves vegetados, pero ellos requieren riego y otros cuidados que no estarán presentes décadas después del cierre (especialmente considerando, aparte de los problemas logísticos, la creciente escasez y coste del agua).

En suma, se requiere diseñar soluciones tecnológicas que aseguren a los depósitos de relaves situados en zonas áridas una protección de largo plazo respecto a la erosión eólica e hídrica. Ello es especialmente importante si se encuentran en una posición topográfica elevada que favorezca su dispersión eólica, como es el caso de los voluminosos y

extensos depósitos de relaves que generará el proyecto Andacollo Hipógeno en la Región de Coquimbo, Chile.

## Capítulo 10: Aspectos Socio-Económicos de un Plan de Cierre

### 10.1: Experiencias y Desafíos en el Manejo de Aspectos Socio-Económicos.

Como es natural, la materia de este capítulo es especialmente compleja y cambiante. A ello contribuyen varias e importantes razones. En primer lugar, se trata de seres humanos, cuyo comportamiento puede ser muy difícil de comprender y prever, porque responde a causas de distinta índole, algunas de las cuales escapan bastante a las posibilidades del método científico. Un solo ejemplo: la “fijación” de los mineros del carbón por un oficio cuyo peligro, dureza, mala remuneración etc., son los primeros en reconocer! De ello se desprende una segunda razón, relacionada con el distinto medio cultural, social y económico en que se realiza la explotación. El clima, la topografía, las rocas, el yacimiento, su método de explotación y la empresa pueden ser los mismos, pero si la explotación se ha realizado en continentes distintos, el impacto socio-económico del cierre puede diferir mucho. Una tercera razón: en las últimas décadas la minería ha cambiado drásticamente en sus relaciones con las comunidades vecinas. El último gran campamento – ciudad minera, el de El Salvador, fue construido en Chile en los 1960’s. Después, todas las nuevas explotaciones han preferido contar con instalaciones destinadas sólo al alojamiento del personal de turno. Puesto que los turnos son de varios días y están separados también por varios días de descanso, las remuneraciones son relativamente altas y hay buena disponibilidad para viajes aéreos o en buses modernos, muchos trabajadores residen en ciudades alejadas de su sitio de labor (elegidas por razones familiares o de calidad de vida). En cambio, se han fomentado los “clusters” o encadenamientos productivos regionales, de manera que las empresas vitalicen el desarrollo general de la región respectiva.

En suma, la materia es compleja y cambiante. Desde luego debe ser evaluada desde antes de la implantación del proyecto, pero aún así puede ser que la situación cambie mucho durante los años de la explotación. Aparte de eso, hay que considerar el hecho de que en muchas culturas las palabras no significan lo que parecen decir, por lo



cual encuestas o consultas a la población local pueden entregar resultados engañosos.

Warhurst et al (2: 81-98) resumen su visión al respecto en los siguientes puntos:

- Es necesario realizar Evaluaciones de Impacto Social (EIS) a través de todas las etapas de la vida de la explotación y considerarlas al formular el plan de cierre final.
- El plan de cierre debe considerar efectos y soluciones no sólo para los trabajadores formales o informales de la empresa, sino que también para las comunidades cercanas o lejanas involucradas directa o indirectamente en sus actividades.
- La política de recursos humanos de la empresa debe considerar el futuro laboral de los trabajadores (tanto de aquellos cesados por razones de producción como por el cierre final de la explotación).
- La empresa debe prevenir, tanto durante la explotación como después del cierre, cualquier daño a otras actividades productivas de la zona, como la agricultura (efectos del drenaje ácido, de la contaminación particulada, etc.).
- El plan de cierre puede considerar usos alternativos para las instalaciones de la empresa, con el objeto de apoyar el trabajo de redes comunitarias de protección social.
- Es necesario procurar la mayor participación posible y prudente de la comunidad en la preparación del futuro cierre.
- Es necesario asegurar la disponibilidad de recursos para enfrentar los aspectos socio-económicos del cierre.
- Es necesario continuar la investigación de estas materias, en particular establecer las lecciones que entregan éxitos y fracasos.

- La investigación debería establecer qué tipo de capacidad y experticias deben ser desarrolladas para alcanzar el éxito, así como establecer indicadores de la calidad y probabilidad de éxito en materias socio-económicas del plan de cierre.

Desde luego, el cierre de una explotación minera puede variar en sus efectos sociales, entre ser una experiencia traumática y socialmente destructiva por un extremo, y no tener efectos sociales significativos por otro. Por ejemplo, el cierre de la actividad carbonífera en Lota y Coronel (Región del Bío-Bío, Chile) ha tenido prolongados efectos. En cambio, actualmente (2008) el cierre de cualquier explotación cuprífera o aurífera mediana del dinámico mundo minero del norte de Chile pasaría socialmente desapercibida. No solamente sus trabajadores residen en diferentes ciudades, sino que serían rápidamente absorbidos por otras faenas. Naturalmente, en esto influye mucho el ciclo de oferta-demanda de los productos mineros, así como la actitud del trabajador, en especial su preparación, confianza en sí mismo y disposición al cambio (en general, bastante altas en los trabajadores de empresas modernas, que destinan muchos recursos a capacitación).

En lo que resta de esta sección, consideraremos la experiencia del manejo de aspectos socio-económicos en cierre de explotaciones mineras en distintos continentes.

Los aspectos sociales del cierre de explotaciones carboníferas en la República Checa están reseñados en un trabajo de Dvoracek (3: 123-127). En el caso descrito, no se trató de un cierre en sentido estricto, sino del cese del 80 % de los trabajadores de la mayor empresa minera carbonífera del País en un período de 16 años (1990-2006), la cual había llegado a tener unos cien mil empleados en los 1970's y debió reestructurarse en 1989. Por tratarse de una empresa estatal en curso de privatización y ocurrir el cierre de sus actividades menos productivas en una época de transición política-económica, los trabajadores en exceso no fueron forzados a dejar la empresa. Eso sí, se establecieron distintas causales de cese, como faltar a la disciplina, obtención de un nuevo empleo satisfactorio, jubilación pactada anticipada etc. En consecuencia, el cierre parcial no tuvo repercusiones sociales graves. En cambio, la empresa perdió parte de su status frente a la población y actualmente tiene dificultades para contratar nuevos trabajadores para

sus labores subterráneas. Los costes de las medidas de mitigación fueron asumidos por el Estado.

Considerando la menor magnitud de las operaciones carboníferas de Lota-Coronel en Chile, su cierre presentó mayores problemas. También en este caso el Estado financió jubilaciones anticipadas, así como capacitación para la reconversión laboral de los trabajadores. Sin embargo, se presentaron dos dificultades principales. La primera, el sentimiento de los mineros de una pérdida de status, al dejar su oficio de minero del carbón. Ella se unió a su resistencia a desplazarse en busca de nuevas oportunidades laborales. Probablemente, contribuyó también la falta de adecuación de la capacitación recibida, así como el hecho de que la economía de ambas ciudades colindantes (Lota y Coronel) estaba centrada en el carbón y presentaba escaso dinamismo.

Weber y Brandt (3: 129-138) presentan una metodología de planificación para enfrentar los aspectos socio-ambientales del cierre de minas en Brasil. Sin embargo, esa metodología está centrada en los usos post-cierre del sitio de la explotación y su entorno. Por lo tanto, será tratado en el Capítulo 15, destinado a considerar esa materia específica.

El impacto socio-económico del cierre de minas en Ghana (NW de Africa) fue analizado por Nyamekye (2: 397-413). En general, la situación descrita por dicho autor es muy negativa. El sector minero opera como un enclave, con muy poca relación con la economía local y un 60 – 80 % del valor de los minerales exportados queda ajeno a ello y es manejado por las empresas a través de cuentas privadas. Tampoco el País cuenta con políticas para la restauración de sitios mineros, lo que queda a la libre decisión de las empresas. En lo referente a cierre de minas, el Estado ha optado por mantener en operación algunas minas cerradas por las empresas, a fin de proteger el sustento de los trabajadores y la actividad de los pueblos mineros.

El punto de vista de un consultor en materia de evaluación de impacto social (EIS) aplicada al cierre de minas en Australia fue presentado por Ferguson (3: 139-144). El autor, preocupado por la falta de estándares definidos para la EIS y los consiguientes riesgos en calidad y credibilidad, presenta una serie de proposiciones. Ellas parten de la definición de la EIS como: “El proceso de evaluar o estimar

anticipadamente las consecuencias sociales que probablemente se derivarán de políticas específicas de acción o del desarrollo de proyectos”.

Ellas incluyen:

- Mantener conversaciones entre los responsables del proyecto, especialistas de distintas disciplinas involucradas y científicos sociales sobre el proyecto, antes de su presentación, centrándose en las consecuencias sociales deseadas.
- Ser claros y transparentes sobre el mismo propósito ante las comunidades afectadas, sin temer la implicación de todas las partes interesadas desde el principio.
- Seleccionar cuidadosamente el enfoque de la EIS y apreciar debidamente el aporte de los científicos sociales y los planificadores.
- Seleccionar las propuestas de los especialistas con un enfoque de manejo de riesgos.

El autor señala finalmente que un enfoque de este tipo minimizará sorpresas desagradables en materias como gastos por sobre el presupuesto, interferencias y agitación política, vencimiento de plazos y procesos legales.

De la breve revisión realizada, se desprende la gran variedad de escenarios en los cuales se puede realizar el cierre de una mina. Desde luego los casos de Ghana y Australia representan situaciones polares, en cuanto las empresas mineras forman parte de un mundo por completo ajeno al medio local en el primer caso, y plenamente identificado con él, en el segundo. Naturalmente, aún suponiendo la mejor buena fe de ambas partes (empresa y comunidad local), lo que se puede y conviene hacer será distinto en cada situación, y deberá ser objeto de un cuidadoso análisis.

## 10.2: **¿Cómo Dejar un Legado Sustentable de la Explotación Minera y Minimizar los Impactos Socio-Económicos de su Cierre?**

Las consideraciones de la presente sección se centrarán en aquellas explotaciones mineras que se realizan en zonas en las cuales existen otros tipos de actividad económica y en las cuales la empresa minera desempeña un papel importante. En esas condiciones se espera que la empresa desarrolle iniciativas propias del campo de la “Responsabilidad Social Corporativa”, y se involucre en el desarrollo y progreso de su área geográfica de influencia.

Es lógico que su primera responsabilidad se refiera al cuidado ambiental de sus operaciones, procurando que éstas no dañen las posibilidades de desarrollo de otras actividades económicas, como la agricultura, agroindustria, pesca, turismo, etc. Sin embargo, la empresa puede ir más lejos en las mismas materias, contribuyendo con mesura y criterio técnico a su puesta en valor. Al respecto, varias iniciativas de Cía. Minera Los Pelambres en el valle del Río Choapa, Región de Coquimbo ilustran esta posibilidad, las cuales pusieron en valor “subproductos” de sus estudios de impacto ambiental (p.ej., observatorio de aves en una laguna litoral cercana al puerto de embarque de minerales, museo de sitio arqueológico, aprovechando los hallazgos de la EIA etc.). En materia de agricultura, una empresa minera puede contribuir a desarrollar mejores prácticas agrícolas en una estación experimental (como CMP en el Valle del Huasco, Región de Atacama) ojalá adelantándose a eventuales protestas – justas o injustas - de los agricultores por descensos de productividad.

Otro, y seguramente el principal campo de responsabilidad corporativa, es el de la educación. Al respecto, la empresa minera moderna maneja inteligencia, conocimientos, tecnologías y recursos que pueden hacer mucho por el cambio cualitativo de la educación en su área de influencia. No se trata aquí de asumir responsabilidades que no le competen. La idea es distinta: se trata de apoyar o llevar a cabo iniciativas que permitan a la comunidad el acceso a ese “presente” que puede estar tan lejano en la práctica. Al respecto, la empresa puede actuar a través del “efecto demostración” promoviendo la incorporación

de conceptos y tecnologías educacionales avanzadas, en cooperación con los sistemas educativos locales.

El objetivo de las actividades descritas a modo de ejemplo debería ser el de buscar la máxima independencia de la comunidad respecto a la empresa, preparando el momento del cierre de sus labores. Esto implica lo opuesto de la situación histórica tradicional, donde todo dependía de la empresa, y su desaparición equivalía al desplome de la comunidad ligada a ella. Tal independencia, confianza en sí misma, disposición a enfrentar nuevos desafíos, constituyen el mejor y más sustentable legado que una empresa puede entregar al momento de su cierre.

## Capítulo 11: Aspectos Legales y Normativos de los Cierres Mineros.

### 11.1: Aspectos Legales y Normativos de PCM en Diversos Países.

**India:** Dhar (2: 295-310) describe el estado de las políticas y sistemas de manejo ambiental minero en India a la fecha de su publicación (2000). Aunque el autor citado no menciona una legislación específica para el cierre de minas, algunos de sus requerimientos están implícitos en las Reglas para la Conservación y Desarrollo de los Minerales de 1957, modificadas en 1958, 1988 y 1994. Bajo dicha regulación el operador está obligado, entre otras cosas, a la rehabilitación de los terrenos afectados, a la prevención de la contaminación y a la restauración de la flora. Por otra parte, la Política Nacional sobre Minerales de 1993 incluye la necesidad de resguardar el uso alternativo del territorio para fines forestales, ecológicos y de desarrollo ambiental en general, la revegetación de las áreas afectadas en acuerdo con normas específicas, así como la necesidad de evitar explotaciones mineras en zonas biológicamente ricas pero ecológicamente frágiles. Por otra parte, la misma Política dispone que en caso de cierre, éste debe ser realizado de modo ordenado y sistemático y que en la rehabilitación respectiva deben participar los trabajadores de la empresa y los miembros de la comunidad afectada por el cierre. En general, las condiciones climáticas de ese continente son favorables para reforestar los terrenos afectados por las explotaciones mineras, lo que ha facilitado ese aspecto del cierre de minas.

En otro artículo de la misma obra (2: 481-496), Noronha señala que 95 % de la actividad minera en India corresponde a minería a cielo abierto, mayoritariamente de hierro, lo cual ha contribuido a degradar tanto la tierra como el drenaje y ha requerido mucho espacio para botaderos de estéril. En cambio, ellas implican menos riesgos de contaminación por metales pesados y drenaje ácido que los depósitos de tipo sulfurado. Los principales daños producidos se refieren al efecto del drenaje de botaderos y rajos (= cortas) inundados. Puesto que la minería se ha efectuado en áreas forestadas, cubiertas de suelos gruesos, ello ha implicado una erosión importante (aunque en parte mitigable a través de reforestación).

**Sud Africa:** La información resumida aquí proviene de un artículo de Sutton y Weiersbye (3: 89-102). Los autores citados señalan que la ley básica destinada a prevenir los impactos de la actividad minera y petrolera es la Ley para el Desarrollo de los Recursos Minerales y Petroleros (MPRDA) del año 2002, y revisan la legislación aplicable a cierre de minas para verificar su consistencia con las exigencias de dicha ley. También consideran las provisiones de otras leyes relacionadas, como la Ley de Gestión Ambiental Nacional (NEMA), de 1998 y la Ley Nacional del Agua (NWA). Un requerimiento básico de la MPRDA es la obligación de las empresas de presentar un estudio de costes del futuro cierre, así como hacer la correspondiente provisión de fondos, conforme a las guías establecidas por el Departamento de Minerales y Energía (DME). También la MPRDA ha establecido una “ruta de salida”, a través de la cual empresas que han demostrado un buen cumplimiento ambiental pueden transferir sus responsabilidades al Estado o a otra empresa, junto con los respectivos fondos. Si estos últimos se demostraran como insuficientes, la empresa minera, sus directores y empleados deben asumir la responsabilidad (incluso a nivel personal). Los principales problemas pendientes se refieren a la reutilización de los sitios de anteriores explotaciones cerradas y a las restricciones que deben formularse al respecto (p.ej., cuando ellas implican el uso agrícola de terrenos potencialmente contaminados). Los autores estiman que la rehabilitación de minas abandonadas o muy deterioradas podría costar al Estado unos 100 mil millones de rands (cerca de 15 mil millones de dólares al cambio del 2007).

Un aspecto notable de la legislación sudafricana es el alto grado de responsabilidad personal que se asume por las fallas en materia ambiental. Por ejemplo, bajo las disposiciones del Departamento de Asuntos Ambientales y Turismo (DEAT): “Corresponde a las siguientes personas remediar las fallas totales o parciales de cumplimiento de disposiciones ambientales o asumir los costes respectivos:

- Cualquier persona responsable de contaminación o degradación ambiental o que haya directa o indirectamente contribuido a ella.
- El dueño de la tierra afectada en el momento en que el daño ocurrió, o su sucesor.



- La persona en control de la tierra o que tenía el derecho a utilizarla cuando se produjo el daño.
- Cualquier persona que, por negligencia, falló en prevenir la actividad o proceso causante del daño. ”

Por otra parte, la responsabilidad por infracciones serias a los compromisos o normas ambientales, por ejemplo, del Programa de Manejo Ambiental (EMP), puede ser condenada a una multa de hasta 500 mil rands (unos 70 mil dólares) o a una pena de cárcel de hasta 10 años.

Finalmente, incluso después del otorgamiento del certificado de cierre conforme, entregado por el DME, las disposiciones de otras leyes (por ejemplo, conectadas con la NWA) siguen prevaleciendo frente a futuros daños ambientales. Como antes se mencionó, persiste sin embargo cierta debilidad de la legislación en material de los futuros usos de los sitios de anteriores explotaciones mineras, en particular lo referente al efecto de la contaminación minera o metalúrgica en los suelos destinados a uso agrícola.

**Australia:** Como señala Clark (2: 441-454), el desarrollo de las prácticas de cierre en Australia se inició a principios de los 1970's siguiendo el desarrollo de la sensibilidad despertada en esa década respecto al tema ambiental. Antes de esa década "la sociedad no atribuía valores a los recursos hasta que eran explotados, ni valorizaba el ambiente natural". Sin embargo, la toma de conciencia pública sobre el ambiente desarrollada en los 1980's y 1990's, ha dado lugar al crecimiento de un vigoroso movimiento conservacionista. Ello condujo a la realización de EIAs para los nuevos proyectos, junto con la conceptualización de que "la minería constituye un uso temporal de la tierra", lo que implicaba que ésta debería ser retornada a su uso original al término de la explotación. La misma consideración fue otorgada a las explotaciones en operación, con énfasis en la necesidad de su posterior rehabilitación. Por su parte, los gobiernos tomaron interés en labores abandonadas y destinaron grandes sumas de dinero a su limpieza ambiental (p.ej., en el caso de una mina de uranio abandonada en los Territorios del Norte, que estaba contaminando con metales pesados el drenaje local).

Aunque al menos hasta el año 2000 no existía legislación gubernamental específica referente al cierre de minas, el Departamento del Ambiente, Deporte y Territorios estableció guías específicas para el cierre de explotaciones que involucran minerales radioactivos. Por otra parte, en cada uno de los estados y territorios de Australia hay un cierto número de agencias involucradas en el cierre de minas (p.ej., 6 en Victoria, 3 en New South Wales, 1 en los Territorios del Norte). En cada estado y territorio hay también una norma minera que sitúa la seguridad como elemento principal del cierre minero. En la mayoría de los casos, la agencia minera desempeña el rol regulador principal, secundada por las agencias del agua, de la protección ambiental y de la conservación. Puesto que Australia es un continente con variadas características de clima y tipos de suelos, no existen criterios o estándares ambientales generales, aunque sí guías amplias, así como documentación más detallada para estados en particular, como Queensland y Western Australia. El criterio básico es que el sitio quede en condiciones apropiadas para el futuro uso acordado. Naturalmente, aspectos como la preservación de la calidad del agua por contaminación ácida y metálica son temas centrales. En Western Australia, no se consultan trabajos de rehabilitación en tierras de propiedad privada, y los reguladores sólo tienen autoridad respecto a impactos externos al sitio del proyecto. En cambio, en Queensland se incluyen criterios relativos al tipo y densidad de la vegetación a implantar, así como a la prevención de la erosión de los suelos (control de pendientes, drenaje, etc.). En general, los distintos estados y territorios concuerdan en que los objetivos del cierre deben centrarse en:

- Seguridad física del sitio.
- Estabilidad del sitio.
- Condición de la tierra apta para el futuro uso acordado.
- Prevención de la contaminación, en particular del drenaje superficial y subterráneo.
- Sustentabilidad de la restauración realizada.

En cuanto a las responsabilidades, ellas varían bastante entre los diferentes estados y territorios. En la mayoría de los casos, completado satisfactoriamente el cierre, se extingue la responsabilidad de la empresa minera y ésta pasa a ser asumida por el dueño de la tierra (estatal o privado). Respecto a los plazos no hay mínimos o máximos fijados. En

cuanto a la sustentabilidad de la cubierta vegetal implantada, ella debe auto mantenerse al menos unos 20 años (New South Wales) mientras en Western Australia los períodos de evaluación del éxito del cierre van de sólo 5 a 10 años. Como se ve, una amplia diversidad de criterios! Finalmente, Clark señala cinco áreas en las que quedan problemas importantes por resolver, los que requieren más investigación y mejores soluciones:

- Criterios de “completación” de la rehabilitación.
- Problemas con las cavidades de los rajas abiertos y su posible uso (almacenamiento de agua, vertederos, humedales).
- Botaderos.
- Depósitos de relaves.
- Drenaje ácido de minas.

En un artículo algunos años posterior (2007), Lobby (3: 103-110) describe la aproximación del estado de Western Australia a la aprobación de nuevas explotaciones y al cierre de minas. Ellas incluyen recientes enmiendas (2006 y 2007) y políticas administrativas destinadas a mejorar la eficiencia, transparencia y responsabilidad de estas decisiones. También se han elaborado guías, incluida la Western Australian Mine Closure Planning Guidelines (WAMCPG) y una serie de guías del gobierno australiano referentes a cierre, rehabilitación de minas, manejo de relaves, manejo de drenaje ácido, y participación y desarrollo comunitario. También se observa un desplazamiento desde un enfoque regulador tradicional a otro basado en el manejo de riesgos.

El nuevo enfoque descrito partió de cambios y desarrollos en tres áreas claves, a saber:

- Un criterio más centrado en la planificación del cierre.
- Revisión de los costes por daños que podrían revertir al Gobierno.
- Logro de mayor claridad y certeza respecto a estándares de cierre.

En cuando al segundo punto, los costes por rehabilitación de sitios mineros en Western Australia se incrementaron 40 % entre 2005 y 2006, mientras las garantías financieras entregadas por las empresas mineras representan menos del 25 % de los costes totales efectivos de las rehabilitaciones comprometidas. En consecuencia, se han fijado

estándares más exigentes para los cálculos que realizan las propias empresas respecto a esos costes (Australian Accounting Standard Board 137).

Finalmente, un artículo de Grounds et al (3: 619-629) ilustra el desarrollo de un cierre de mina en North Queensland, así como la devolución de la garantía financiera entregada, 11 años después del cese de la explotación de la mina de oro Mount Hogan en 1995. Dicho cierre requirió la resolución de varios y serios problemas (drenaje ácido, calidad de agua en un rajo abierto y percolación de soluciones desde los botaderos rehabilitados). Las acciones de remediación y rehabilitación fueron completadas en 2003, a lo que siguieron dos años de monitoreo, obteniéndose la aprobación del plan de manejo del sitio (SMP) en marzo 2006, el que considera los posibles problemas futuros asociados a cualquier contaminación residual. Ello permitió la liberación de la garantía económica (equivalente a unos 124 mil dólares). Aunque se trató de un proyecto de reducida magnitud, que sólo llegó a procesar unas 200 mil t/año de mena entre 1992 y 1995, la reseña de Grounds et al ilustra la característica principal de la legislación australiana: flexibilidad dentro del cumplimiento de objetivos básicos. Lo anterior, unido a cierto grado de confianza en los procedimientos y la responsabilidad de la empresa respecto al SMP y expresado en el corto plazo de monitoreo exigido.

**Canadá y USA:** Como señala Isnor (2: 463-480) Australia, Canadá y USA comparten ciertos rasgos comunes en su aproximación al manejo ambiental de los asuntos mineros. Ellos tienen su origen en distintos factores, como una cultura común, que tiende a desconfiar de las legislaciones rígidas y de los gobiernos poderosos, el aprecio por la iniciativa privada y la fe en la capacidad de la tecnología para resolver los problemas. Los tres países fueron originalmente colonias británicas (con la excepción del estado “francófono” de Québec en Canadá) y se organizaron como estados federados, que dejan espacio a un amplio grado de libertad y posibilidades de diferenciación local (aunque ello se ha ido reduciendo progresivamente, en particular en USA).

Por otra parte, en los tres países se ha contado con agencias técnicas responsables del desarrollo y transferencia de tecnología, que han promovido la búsqueda en común con las empresas mineras de

soluciones tecnológicas. Esta aproximación es importante porque también marca una diferencia con aquella de los estados de inspiración europea continental” (reproducidos en Latinoamérica) donde la autoridad se sitúa sobre y aparte del privado, provista de una rígida y nutrida legislación de control. Así, en USA el Bureau of Mines (USBM) hoy desaparecido, en Canadá el CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology) y el CSIRO – IMEC (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Institute of Minerals, Energy and Construction) en Australia, han desempeñado roles importantes en la búsqueda de soluciones prácticas a los principales problemas. Sin embargo, Isnor distingue rasgos característicos que diferencian a la política minero-ambiental de estos países. Así, Canadá, respecto a USA:

- Muestra un menor grado de fragmentación en agencias técnicas federales.
- Sus agencias estatales, provinciales o territoriales son más importantes.
- Presenta un mayor grado de coordinación intergubernamental.
- Los grupos aborígenes tienen mayor influencia local.

En materia de investigación, los departamentos de minería de Canadá que cuentan con cátedras de investigación industrial desarrollan una importante investigación financiada por el gobierno en materias relativas al cierre de minas. Por otra parte, los científicos e ingenieros de CANMET participan activamente en el programa MEND (ya descrito en la sección 4.2 de este curso) y la misma institución es responsable de los principales programas de investigación relativos al cierre de minas. Parte de estos programas se realizan en colaboración con las empresas mineras, unas 20 de las cuales participan en el programa MEND. Además, el gobierno nacional se ha esforzado – y ha sido exitoso – en asociar a los investigadores del gobierno (incluidos los de CANMET y de las universidades), con las empresas mineras, para buscar soluciones prácticas a los problemas planteados por los cierres de minas.

En suma, más allá de las reglamentaciones, principalmente elaboradas a nivel de cada estado, el rasgo esencial de la aproximación canadiense a esta materia se basa en tres principios básicos.

- Colaboración entre las entidades de gobierno (central o estatal), las empresas y las universidades; en la búsqueda de soluciones prácticas.
- Confianza en la capacidad de la investigación científica y tecnológica para desarrollar las soluciones requeridas.
- Flexibilidad en el enfoque caso a caso, sin el peso de una legislación rígida que la dificulte.

La aproximación en USA al tema minero ambiental ha variado después del cierre del USBM (cuyas funciones fueron distribuidas entre el US Geological Survey y el Department of Energy). El USBM había llegado a tener 77 proyectos relativos a materias de minería-ambiente en 1991 y colaboraba estrechamente con EPA en estas materias. En cambio, se han desarrollado requerimientos más precisos, complicados por los muchos diferentes sistemas de cierre de minas existentes en ese país. Sin embargo, de acuerdo con Danielson y Nixon (2: 311-350), todos ellos comparten los siguientes elementos en común:

- Exigencia de contar con un plan de cierre.
- Estándares en continua evolución, basados en los resultados de anteriores experiencias y que consideran factores como clima, geografía y otras operaciones mineras en el área.
- Necesidad de aprobación del plan propuesto.
- Flexibilidad del plan. Considerando el carácter dinámico de las operaciones mineras, se acepta que éste pueda ser reformulado (sujeto a aprobación de los cambios) en el curso de las mismas.
- Necesidad de una garantía financiera de cumplimiento del plan.
- Necesidad de efectuar monitoreos, informes, inspecciones y acciones de las agencias reguladoras que aseguren el cumplimiento.

Una experiencia importante se refiere a los problemas que implica el hecho de que los cierres de minas tienden a ocurrir en “oleadas”, por ejemplo los de minas de uranio en los 1960’s y 1980’s, lo que implica una seria presión sobre las agencias reguladoras.

Danielson y Nixon destacan la diversidad de respuestas que los distintos estados de USA dan a la importante pregunta de los objetivos

fundamentales del cierre de minas. Así, en Colorado, ellos se definen como “restaurar las tierras afectadas por las operaciones mineras de modo que puedan ser de beneficio al pueblo del Estado”. Otros estados lo definen en términos como “prevenir la degradación indebida e innecesaria del ambiente” o “proteger la salud y seguridad”, “lograr un ecosistema autosustentable después del cierre”, etc.

Los mismos autores señalan que los problemas que más preocupan a las empresas mineras en USA no se refieren a la legislación relativa al cierre de minas, la cual ha operado satisfactoriamente, sino a la legislación nacional relativa a la calidad del agua (Clean Water Act) y a la limpieza de sitios (CERCLA y legislación del superfondo). Ellas implican serios riesgos de responsabilidad a largo plazo, en materias como el drenaje ácido que puede ocurrir “a perpetuidad” sin que existan tecnologías capaces de detenerlo en el tiempo. A ello se agrega el principio de la responsabilidad retroactiva, que puede obligar a una empresa minera que hoy inicia una explotación a pagar por la limpieza de contaminación generada en los 1890’s.

Los dos problemas recién señalados pueden comprometer seriamente la competitividad de la industria minera en USA, que ya en la práctica está reducida a unos pocos Estados. En este aspecto, los Estados Unidos se ha ido aproximando más a los estados europeos occidentales, que conceden una alta prioridad a la protección y calidad del ambiente y en los cuales la minería ha sido severamente restringida.

**Brasil:** Como destacan Flores et al (3: 79-88), Brasil carece aún (2007) de legislación o normas específicas relativas al cierre de minas.

En consecuencia, la evaluación de impacto ambiental (EIA), que incluye los requerimientos de un plan de rehabilitación de tierras degradadas, se utiliza para manejar lo relativo al cierre minero. Hasta el año 2001, la obligación básica del poseedor de la concesión minera consistía en rehabilitar el área explotada de acuerdo con un “plan para la rehabilitación de áreas degradadas” (PRAD) aprobado por la agencia ambiental competente. El año 2001, el Departamento Nacional de Producción Mineral (DNPM) estableció normas de regulación minera (NRM-20) para manejar lo relativo a la suspensión o el cierre de una explotación minera. Al respecto, corresponde a la empresa comunicar su

intención, justificarla y presentar un plan de cierre. Sin embargo, no establece plazos para hacerlo ni para su evaluación por parte del DNPM.

El estudio de Flores et al analiza la calidad y especificidad de los PRAD presentados en el estado de Minas Gerais, donde se sitúa la mayoría de los cierres mineros, y que corresponden a explotaciones de Fe, Mn y Au. En general, su calidad fue deficiente. Rara vez se observa en ellos un enfoque interdisciplinario y en cambio parece haber mucho “copiar y pegar” y poca especificidad a las condiciones propias de cada situación por parte de las firmas consultoras que los realizaron. Tampoco parece haber existido mayor análisis crítico por parte de las agencias gubernamentales, afectadas por falta de financiación y de recursos humanos. La mayoría de los PRAD analizados enfocaron la rehabilitación sólo en términos de un proceso de revegetación y no incluyeron monitoreos ni acciones de mantenimiento post-cierre. Por otra parte, puesto que se carece de criterios respecto al cierre, tampoco las empresas mineras pueden obtener una certificación de su cumplimiento ni una liberación de su responsabilidad ambiental por futuros daños.

Lo anterior no implica que no hayan habido cierres de minas exitosos en Brasil, pero ello ha sido fruto mas bien de la responsabilidad corporativa empresarial que de la acción del gobierno o de la calidad de la legislación y de la normativa respectiva. Por otra parte, el hecho de que muchas explotaciones cerradas se encuentren en áreas remotas permite que su impacto ambiental pase desapercibido para la opinión pública. En las conclusiones de los autores “se necesita de una legislación clara y transparente, que proteja los intereses de las partes involucradas. El sistema de regulación debería ser de fácil acceso, imprescriptible, específico en sus objetivos y contar con la fuerza de la ley”.

En otro estudio, relativo específicamente al “estado del arte” de los cierres de minas en el estado de Minas Gerais, Lima et al (3: 413-424) señalan que: “muchas compañías mineras procuran aún adoptar las mejores prácticas y enfrentan el desafío de cerrar la mina adecuadamente, ante la opción de simplemente cumplir la actual legislación o abandonar el sitio de la explotación”. Esto, frente a la ausencia de regulaciones para el cierre de minas en Brasil. Los autores describen, en cambio, el ejemplo exitoso del cierre de la mina de hierro



de Aguas Claras, que ha pasado a ser una referencia técnica por su calidad. En contraste, mencionan los riesgos que corren los cierres de varias explotaciones de uranio, oro, hierro y otras sustancias, debido a la forma en que han sido enfrentados, posibilitada por una legislación escasa, imprecisa y permisiva.

### **11.2: El Cierre de Minas en Chile. Una Legislación Postergada.**

La legislación ambiental de Chile debió buena parte de su impulso inicial a las empresas mineras trasnacionales que llegaron al país en los 1970's y 1980's.

Esas empresas organizaron, a mediados de los 1980's, el primer seminario sobre los aspectos ambientales de la minería (al cual CODELCO concurrió sólo en calidad de observador, manifestando los riesgos que esta temática presentaba para el país). El interés por contar con una legislación formal se relacionaba con su necesidad de "reglas claras", en materias como propiedad minera, tributación, etc., a lo cual se agregaba el tema ambiental, las que se requerían para planificar con tranquilidad su futuro desarrollo. Por otra parte, lo ambiental había pasado ya a formar parte de sus políticas corporativas en el exterior, por lo cual no buscaban situaciones permisivas que pudieran afectar sus propios estándares y su prestigio internacional. Cuando en 1994 se contó con la Ley 19.300 que estableció el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, las primeras EIAs correspondieron a proyectos mineros, los que mantuvieron su predominio por varios años y permitieron el desarrollo de las primeras firmas consultoras ambientales en Chile.

Sin embargo, aunque se empezó a hablar tempranamente (ya en los 1980's) de contar con una legislación reguladora específica del cierre de minas, ella ha sido postergada por los sucesivos gobiernos. De ahí que el primer cierre minero importante (Compañía Minera El Indio, ver Robledo y Meyer 3: 53-65, mencionado en Capítulos 4, 6, 7 y 8) fuera en buena parte estructurado conforme a la iniciativa y criterios de la propia empresa.

Las disposiciones reguladoras chilenas respecto a planes de cierre minero están contenidas en el Decreto Supremo D.S. n° 132/04, el cual comprende 23 artículos. Estos incluyen la obligación de presentar un proyecto de cierre, el cual debe “determinar las medidas a implementar para prevenir, minimizar y/o controlar los riesgos o efectos negativos que puedan surgir o continuar surgiendo después del cierre de la mina, respecto a la vida e integridad de las personas que trabajen en ella, o puedan estar bajo circunstancias específicas y definidas asociadas a ellas, en sus instalaciones e infraestructura”. Como señala Quiroz (3: 313-324), esta definición está centrada en el tema de la seguridad y no establece obligaciones legales de considerar los riesgos ambientales al desarrollar el plan de cierre conceptual. Sin embargo, la idea de operaciones mineras sustentables contenida en el mismo reglamento las incluiría indirectamente, aunque en términos poco precisos.

Puesto que el D.S. N° 132/04 está orientado esencialmente en términos de seguridad de las faenas mineras, tarea que le compete al Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), es natural que esa institución desempeñe un rol central en materia de cierre de minas. Otros servicios o instituciones que tienen intereses y atribuciones importantes en la materia son CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente), los COREMA (Comisiones Regionales del Medio Ambiente), y la Dirección General de Aguas (DGA). En el caso de los COREMA, les corresponde analizar y autorizar el plan de cierre propuesto (considerado como un proyecto en sí mismo), y a la DGA fiscalizar el efecto de sus acciones en la calidad de las aguas. Otra participación de los COREMA puede ser ejercida a través de la evaluación de los EIA de los proyectos mineros (D.P. N° 95/01), los que deben, al menos, esbozar un futuro plan de cierre (pese a que la dinámica de los proyectos mineros hace muy difícil predecir la situación final).

Específicamente para los fines de la pequeña minería, SERNAGEOMIN ha elaborado guías para la planificación y ejecución de las acciones de cierre que siguen las prácticas normales en estos casos (retiro de instalaciones, cierre de accesos, estabilización de taludes, protección de depósitos de relaves, bloqueo de ingreso a labores subterráneas, uso de calizas para neutralizar aguas ácidas etc.).

Igualmente le corresponde a ese Servicio aprobar y fiscalizar lo propuesto por la empresa.

Al respecto, SERNAGEOMIN distingue entre **cierre temporal** (que implica la obligación a notificarlo a dicho servicio, así como de ejecutar un plan de cuidado y mantención), **cierre total**, cuando involucra a toda la faena y **cierre parcial**, cuando implica a sólo parte de ella.

Por otra parte, la Corporación del Cobre de Chile, CODELCO, que controla y explota los grandes yacimientos de cobre porfírico de propiedad estatal, ha desarrollado su propia estrategia para enfrentar el cierre de sus operaciones. Ésta ya se está implementando en la mina de El Salvador, cuyas explotaciones de minerales oxidados y sulfurados cesarían (aunque en minería nunca se sabe...) en los años 2010 y 2011 respectivamente. Como señalan Marshall y Domínguez (3: 207-210), las explotaciones mineras de CODELCO tienen un amplio rango de antigüedad, que llega hasta 105 y 110 años respectivamente en Chuquicamata y El Teniente. Todas ellas se sitúan en ambiente cordillerano (El Teniente, Andina) o precordillerano (El Salvador – Potrerillos, Gabriela Mistral y el complejo CODELCO Norte, que incluye Chuquicamata y otras operaciones). Mientras las primeras se encuentran en Chile central, las segundas están en los territorios áridos del norte del país. La estrategia de CODELCO considera la relativamente escasa normativa existente: el reglamento de seguridad minera D.S. N° 132/04 y el de Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Presas de Relaves (Decreto Presidencial N° 248/06). Por otra parte, el Decreto Presidencial N° 95/01 completa las provisiones de la Ley 19.300 en cuanto a la necesidad de presentar el efecto del cierre de las operaciones como parte de la EIA de una nueva explotación minera. Aunque por su antigüedad las principales explotaciones de CODELCO no fueron objeto de un EIA previo, es posible considerar el cierre como un proyecto minero en sí mismo, y por lo tanto someterlo a evaluación como tal.

La estrategia de CODELCO descrita por Marshall y Domínguez consulta medidas a corto y mediano – largo plazo. Aparte del complemento de las normas existentes citadas y del reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos, CODELCO ha decidido incorporar las consideraciones relativas al cierre en todas las fases de sus

operaciones, desde su etapa de diseño. Por otra parte, los planes de cierre de todas sus operaciones serán periódicamente revisados y actualizados. Esto y otras acciones complementarias, con el objeto de ir más allá del cumplimiento de las normas, de modo de asegurar tanto la seguridad como la salvaguardia del medio ambiente al enfrentar un cierre minero. En todo caso, los autores citados señalan que la mayoría de los expertos coinciden en la necesidad de que el País cuente con normas específicas más completas relativas al cierre de minas.

En un reciente seminario de capacitación sobre “Planes de Cierre de Faenas Mineras” (La Serena, 4/07/08), SERNAGEOMIN expuso las obligaciones derivadas del D.S. N° 72 de 1985, así como lo referente al Proyecto de Ley sobre Cierre de Faenas”, aplicable a faenas con capacidad de extracción superior a 5.000 t/mes. Dicho proyecto implica auditorías periódicas del plan de cierre (cada 5 años) por empresas externas, así como una garantía financiera de cumplimiento.

En cuanto al Reglamento de Seguridad Minera (D.S. N° 72) se entiende que su objetivo principal es la “prevención, minimización y/o control de los riesgos y efectos negativos que se generen o continúen presentándose con posterioridad al cese de las operaciones de una faena o instalación minera, sobre la salud y seguridad de las personas y/o sobre el medio ambiente”. Para facilitar su implementación SERNAGEOMIN elaboró una detallada Guía (19), elaborada sobre la base de las normas del D.S. 72, cuyo texto refundido y sistematizado fue incorporado al D.S. n° 132/04 del Ministerio de Minería. Tanto de lo expuesto en la Guía como de las explicaciones complementarias entregadas en el Seminario, se desprende que el énfasis de SERNAGEOMIN está en la seguridad y estabilidad física del sitio afectado por las explotaciones mineras.

## Capítulo 12: **Costes, Financiación y Garantías de los Planes de Cierre.**

### 12.1: **Costes y Financiación de los Cierres Mineros.**

El Manual del ITGME (= IGME) (1: 305-316) presenta una descripción pormenorizada de la evaluación económica de los proyectos de restauración. Sin embargo, dicha descripción no incluye aspectos centrales (y de alto coste) de cierres mineros, como los referentes al drenaje ácido, y se presta más bien para situaciones simples, como el cierre de canteras.

Wilde (3: 383-391) resume las “lecciones del pasado” relativas al coste de cierres de minas y proyectos de restauración. En primer término, ellos dependen en alto grado de la ubicación del cierre y la vulnerabilidad ambiental de su entorno, de la edad de la explotación, los métodos mineros y metalúrgicos utilizados, los minerales explotados, las características de los desechos mineros y los costes laborales. En particular, problemas relativos a desechos generadores de acidez y aguas de minas pueden ser de larga y costosa solución. Por otra parte, también los aspectos socio-económicos pueden implicar altos costes (en particular para el Estado, que debe hacer frente a los disturbios y compensaciones cuando la explotación minera representa la principal o única fuente de ingresos para una gran población, como en el cierre de grandes explotaciones carboníferas).

El autor citado divide su análisis en cuanto a los **aspectos internos** y al **coste externo**. Respecto a los primeros, señala los problemas que implican las explotaciones mineras iniciadas con anterioridad a la práctica de evaluaciones de impacto ambiental, cuyo diseño y operación careció de acciones de prevención y mitigación de impactos. Por otra parte, las antiguas tecnologías implicaban impactos ambientales que las modernas procuran minimizar. Al respecto, menciona el hecho de que en el Reino Unido (Gran Bretaña) aún se sufren los impactos ambientales de minas cerradas hace 150-200 años atrás. Otro factor central es la química de la mena explotada, en particular el contenido de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que favorece la producción de drenaje ácido, así como los efectos tóxicos de los metales pesados presentes en ella.

En materia del **contexto externo**, hay situaciones particularmente difíciles (y por lo tanto costosas), como el cierre de minas en el Ártico, al que podríamos agregar aquellos en topografías montañosas con alta pluviosidad, como Papúa – Nueva Guinea. También pueden representar costes muy altos los aspectos relativos a fragilidad social antes citados, en particular cuando la explotación había llegado a ser la única fuente de ingreso para una numerosa y económicamente aislada población. Una situación de este tipo es tratada por Loayza (2:351-356), quien describe el efecto social del cierre de las operaciones mineras de estaño en Catavi, Bolivia.

Wilde revisa finalmente varios cierres mineros, sus características y sus costes. Ellos incluyen una provisión equivalente a US\$ 40.8 M (millones) para enfrentar problemas de drenaje ácido posteriores al cierre de las operaciones de British Coal (que afectaba a unos 100 km lineales del drenaje superficial). A ello se agregan otros US\$ 746 M del sector público para la restauración y reconversión de terrenos (1946 hectáreas) de anteriores explotaciones carboníferas, y otros costes menores. En el caso de Minera Alumbraera (Catamarca, Argentina), cuyo rajo abierto tiene unas 280 ha de superficie y 530 m de profundidad, se han provisto unos US\$ 30 M, que no incluyen el coste de la protección de los botaderos, una cifra que se estima con una incertidumbre de  $\pm 50\%$ . Otro sitio (no especificado por razones de confidencialidad) corresponde a una explotación de mineral de hierro a cielo abierto en Australia, que requiere el relleno de una serie de rajos, así como desmantelar una compleja infraestructura. El coste estimado (con  $\pm 40\%$  de seguridad) se estima en este caso en US\$ 156 M, incluidos los de orden social.

Finalmente, el autor destaca que los costes del cierre tienen una alta dependencia de factores específicos, lo que hace muy difícil entregar cifras estimativas generales.

Por otra parte, la mejor manera de enfrentar la financiación de dichos costes es incorporarlos gradualmente a las operaciones mineras, en lugar de dejarlos para el final, cuando los recursos pueden ser muy insuficientes por diversas razones.

La necesidad de mantener un plan de cierre actualizado es resaltada por Peralta – Romero y Dagdelen (3: 393-404). Ello, porque la

estimación realista de sus costes permite estimar las responsabilidades financieras que la empresa enfrentará al cerrar sus operaciones y que pueden llevar a su quiebra por la incapacidad de haber identificado y mitigado aquellas situaciones más costosas de remediar. A lo anterior se agregan grandes diferencias en la manera de calcular o estimar los costes, y por lo tanto en las cifras que resultan. Los autores citados proponen una metodología de cálculo que permite modelar distintos escenarios, de manera de efectuar a tiempo los ajustes necesarios, para evitar posteriormente acciones de remediación de alto coste. La metodología propuesta parte con un “mapa de actividades”, basado en las actividades más relevantes que han sido identificadas para los fines de cierre de la explotación. Cada actividad de cierre se compone a su vez de tareas individuales o procedimientos, relativos a cuatro categorías: 1) Movimiento de tierras; 2) Revegetación; 3) Manejo del drenaje; 4) Tratamiento de aguas, cada uno de ellos con su propio sistema de monitoreo. El “Mapa” se completa con una declaración de inventarios y con las actividades de movilización y desmovilización de equipos. El modelo computacional, que opera con los costes a través de un flujo de información lógico y estructurado, dispone de una interfase gráfica y de unas 50 hojas de trabajo.

Un procedimiento temprano de evaluación de los costes de cierre incorporados al diseño de rajos (= cortas) mineros abiertos, está descrito por Ramírez – Rodríguez y Rozgonyi (3: 357-363). La idea básica es que el diseño del rajo debe considerar no sólo la eficiencia económica operacional, sino también los costes que involucrará su posterior cierre. Naturalmente, la diferencia entre las circunstancias ambientales del sitio implica que éste último factor presente un peso muy diferente en distintos contextos (de clima, drenaje, topografía, etc.).

## **12.2: Distribución de Costes del Cierre Durante la Operación.**

El ejemplo de la Cía. Minera Río Tinto de Australia (RTCA) es reseñado por Grimshaw (3: 289-300), como ilustración de una empresa que incorpora las acciones de cierre y su coste desde la etapa de diseño de sus operaciones. Río Tinto desarrolla y opera un conjunto de minas de carbón, tanto subterráneas como a cielo abierto. La estimación temprana de dichos costes permite incluirlos (en sus aspectos sociales,

ambientales y económicos) en los estudios de factibilidad. Sin embargo, enfrenta la “paradoja” de evaluar el cierre de algo que aun no existe (excepto en cuanto a su contexto). En consecuencia se ha preferido incluirlo como parte del “plan de vida de la mina”. Aparte de la ventaja de incluir esta materia en las evaluaciones de factibilidad económica de nuevos proyectos, se obtiene la posibilidad de estudiar las mejores soluciones técnicas para enfrentar los principales problemas que se visualicen.

Una aproximación similar, pero concerniente a la minería metálica, es descrita por Lang et al (3: 283-288), quienes señalan que la mejor “filosofía del cierre” consiste en manejar todas las operaciones con dicho cierre en la mente. Ello implica, entre otras cosas, contar con un sistema de gestión ambiental comprensivo, realizar un cuidadoso manejo de las aguas y optimizar las posibilidades y precauciones que implican las condiciones naturales del sitio. Lo anterior, agregado a un programa proactivo de relaciones con las partes interesadas (y las afectadas...) y un buen uso de la mejor ciencia y tecnología disponibles. Esto último, en materias como balance de aguas y materiales, geoquímica ambiental, hidrogeología e hidrología. Las proposiciones de Lang et al no sólo son económicamente lógicas, sino que constituyen la mejor manera de evitar daños que pueden llegar a ser irreparables, particularmente en lo referente a la generación de drenaje ácido. Se podría agregar que tal enfoque es necesario desde el diseño y evaluación del proyecto, lo que podría evitar la realización de explotaciones que terminan siendo un desastre para todos (como la reapertura de Summitville, en Colorado, USA).

El mismo tema es analizado también en un artículo de Morrey (2: 243-256), que sitúa los costes de cierre y restauración como los más significativos a través del ciclo de vida de la explotación, y que por lo tanto deben ser incluido en el análisis de factibilidad del proyecto minero. El artículo señala también la oportunidad de reducir los costes del futuro cierre y restauración a través de su progresiva incorporación a las operaciones mineras en curso. También analiza las incertidumbres y riesgos como factores que deben ser considerados en el diseño y en el manejo de los costes. En lo fundamental, el autor destaca que los componentes más costosos de un plan de cierre se refieren a la rehabilitación física del sitio, así como a la eliminación de los factores de



mayor riesgo post-cierre (como el drenaje ácido). Al respecto, una planificación cuidadosa, el uso de tecnología adecuada y un buen diseño pueden reducirlos mucho, especialmente si las acciones de restauración requeridas se realizan preferentemente durante la etapa de operación del proyecto minero.

### 12.3: Planes de Cierre de Minas y Garantías Financieras.

Esta materia, junto a la referente a los plazos de responsabilidad post-cierre de las empresas son, seguramente, las más controvertidas en relación a la gestión del cierre de explotaciones mineras. Su tratamiento en esta sección está basado en un artículo de Anderson (2: 283-293).

En los conceptos de Anderson, las garantías o seguros financieros constituyen un instrumento económico “híbrido”, en el sentido que su implementación debe ser complementada por otras medidas, como evaluaciones de impacto ambiental, inspecciones y fiscalización (incluidas penalidades por incumplimiento). Su objetivo es asegurar que los costes del cierre y restauración de explotaciones mineras será pagado directa o indirectamente por la empresa minera. Esos costes están destinados a asegurar la seguridad de las personas, la protección del ambiente y las futuras posibilidades de uso del sitio de la explotación y su entorno.

Existen diversos mecanismos para entregar esta seguridad financiera, incluidos los depósitos (*bonds*), fondos de seguridad (*trust bonds*), planes de seguridad (*insurance plans*) etc. Entre ellos, los planes de responsabilidad ambiental (*environmental liability insurance plans*) son provistos por pocos agentes financieros y entregan una cobertura muy limitada. También existen las garantías emitidas por la corporación de la que depende la empresa en cuestión, que no son incluidas en el artículo de Anderson.

Los depósitos en forma de seguros (*surety bonding*) implican que un consorcio asegurador se hace responsable por los costes que conllevan los fallos en el logro de los objetivos del plan de cierre. Su objetivo es que tales costes sean pagados por un privado en lugar de serlo por el Estado (y en último término por los contribuyentes). Desde luego, la idea

es que la suma comprometida por el seguro será invertida en restaurar el daño causado o en completar las actividades no realizadas. Por su parte, la entidad aseguradora puede exigir al asegurado que asuma un coste colateral, correspondiente a un porcentaje de la suma asegurada. Puesto que también la aseguradora puede fallar financieramente, esta debería considerar el mecanismo de los reaseguros (donde otras firmas comparten el riesgo). Por otra parte, la firma aseguradora debería tener un positivo interés en verificar que la empresa minera hace bien las cosas, lo cual es bueno para todos.

Depósitos en común (*bond pools*) tienen por objeto garantizar el pago de los gastos de cierre de pequeñas empresas, en el caso de que alguna del grupo (una especie de “mutual”) sufra la quiebra u otro problema mayor. Esas asociaciones se forman voluntariamente y los nuevos miembros son aceptados (o rechazados) considerando sus antecedentes de cumplimiento y los riesgos que implican, tanto por dichos antecedentes como por la magnitud y complejidad de sus operaciones. En todo caso, estos riesgos implican pagos diferenciados (según su nivel) a la asociación que los respalda.

Auto depósito o pruebas financieras (*self-bonding or financial tests*) se basan en la evaluación de la “salud financiera” de la misma empresa y consisten en apartar una suma que puede ser depositada a interés para responder por sus obligaciones de cierre. Su riesgo radica en la posible quiebra de la empresa, cuya solidez debe ser evaluada cuidadosamente para aceptar esta forma de garantía.

En cualquier caso, es importante calcular la magnitud del seguro financiero sobre la base de los costes probables del plan de cierre, así como revisar periódicamente la situación de la explotación. Esto último implica considerar muchos factores, como expansión de la vida de la mina debido al descubrimiento de nuevas reservas, cambios en los precios del producto y de los insumos de producción (en particular energía), cambios tecnológicos y reguladores, cambios en el estado financiero de la empresa, etc.

En la sección 11.1 reseñamos un artículo de Grounds et al (3: 619-629) que relata la liberación de una garantía después del cierre exitoso de una mina de oro en Australia. También un trabajo de Mc Kenzie et al

(3: 365-374) describe un proceso de liberación progresiva de reducción de responsabilidades y recuperación de garantías financieras en Western Australia, proceso basado en el reconocimiento de éxitos en las operaciones de rehabilitación. Los autores citados exponen el caso como demostración de que el ente regulador “responde positivamente a las empresas mineras que presentan evidencias claras y utilizan herramientas de monitoreo de calidad respecto al cumplimiento de los criterios de rehabilitación”.

## Capítulo 13: Seguimiento y Control de los Cierres Planificados

### 13.1: Metodologías de Seguimiento y Control.

Un artículo de Nichols y Latham (3: 789-801) considera la evaluación del éxito de las actividades de rehabilitación en ambientes semiáridos, difíciles de prever en su comportamiento, así como la importancia de esta materia en los criterios de finalización satisfactoria del cierre. En efecto, en estos ambientes (en los cuales se desarrolla parte importante de la minería chilena) es difícil prever el curso de la rehabilitación ecológica procurada, dado el riesgo de prolongadas sequías, incendios forestales, etc. En tales condiciones, la suerte de la vegetación implantada es dudosa, y con ella sus funciones de protección de la erosión de los desechos mineros sólidos. Como señalan los autores, en áreas donde no se ha perturbado el ambiente, se encuentran importantes extensiones desprovistas de vegetación (en particular después de algunos años secos). Por lo tanto habría que pensar sobre por qué la vegetación implantada tendrá mejor suerte que la natural, que ha tenido mayor tiempo y mejores oportunidades (p.ej., fracturas en las rocas con mayor humedad) para sobrevivir.

Edraki (3: 821-828) describe una metodología desarrollada en Australia para evaluar el éxito de la rehabilitación de sitios mineros. La metodología, basada en una gran base de datos de monitoreo ambiental correspondientes a varios sitios mineros rehabilitados, fue elaborada por el Centre for Mined Land Rehabilitation (CMLR) de la Universidad de Queensland. Se basa en el análisis de tendencias en el tiempo de la información monitoreada, relacionándola con el manejo ambiental post-cierre del sitio. En particular se considera la carga de contaminantes, ya sea en forma soluble o insoluble que sale del sitio, como una medida cuantitativa central de la rehabilitación realizada. En consecuencia, va más allá del enfoque común, centrado en la concentración (no en la cantidad) de los contaminantes monitoreados. La metodología propuesta es interesante, porque el efecto de los contaminantes depende más de la cantidad que llega al drenaje que de la concentración con la que lo hace. Por otra parte, el material en suspensión transportado por las aguas da una buena idea de la tasa de erosión que se produce. Sin embargo, queda fuera lo relativo a la erosión eólica de material particulado, que

puede ser muy importante en zonas áridas o semiáridas. Por otra parte, en zonas semiáridas es común una cierta ciclicidad del clima (p.ej., Ciclo ENOS entre el norte de Chile y Perú), lo cual debe ser considerado en el análisis de tendencias. En todo caso, la metodología propuesta es muy útil para el seguimiento de fenómenos como el drenaje ácido, una de las mayores fuentes de preocupación en la minería del oro y de los metales de base.

La evaluación post-cierre de la calidad del agua percolada desde una pila de lixiviación de oro agotada de la mina Landusky, Montana (USA) es descrita en un artículo de Shaw (3: 803-813). Puesto que el operador de la mina quebró en 1995, la responsabilidad por el manejo del sitio fue asumida por el Montana Department of Environmental Quality (DEQ), usando fondos de garantía depositados por el operador. Muchas de las decisiones concernientes a la rehabilitación se basaron en predicciones geoquímicas y en el análisis del potencial contaminante del material agotado de la mayor pila de lixiviación. Ello, debido a que ese material había mostrado cierta tendencia a generar acidez lo que podía facilitar la lixiviación de metales pesados. En consecuencia, dicho material no fue utilizado para fines de relleno. En cambio fue dejado in situ sobre el revestimiento aislante y su evolución vigilada, lo que permitió estudiarla desde el cese de su operación, a través de los años de rehabilitación (2000-2002) y post-cierre (2003 en adelante, hasta 2010). Lo realizado ha sido importante para contrastar las predicciones con los resultados efectivos, lo cual puede ser útil para futuras tomas de decisión en otros proyectos de cierre. En cuanto a los resultados obtenidos, se confirmó la tendencia a generación de acidez y a la lixiviación de metales pesados. La predicción de concentración de estos últimos fueron acertadas en algunos casos y erróneas en otras (como en el caso del hierro, que alcanzó concentraciones muy superiores a las estimadas).

Un artículo de Didier y Daupley (3: 179-190) describe el método normalmente utilizado en Francia para evaluar los riesgos potenciales subsistentes en sus antiguas explotaciones mineras (la mayoría de los sitios mineros de Francia están definitivamente cerrados). El método MRPP (plan de prevención de riesgos mineros) está centrado en la prevención de riesgos para fines de planificación urbana y construcción. Comprende cuatro etapas:

- Recolección de información, basada en revisión de archivos y en visitas al terreno, así como en investigaciones suplementarias si se estima necesario.
- Evaluación de peligros para localizar zonas que por distintas razones puedan presentar ese potencial y representarlas en mapas.
- Evaluación de intereses presentes (p.ej., establecimientos públicos) o futuros (proyectos de construcción) en las áreas de peligro. Igualmente se representan en un mapa.
- Definición reguladora de zonas homogéneas en términos de las prohibiciones, obligaciones o recomendaciones para el uso de tierras por los actuales y nuevos proyectos situados en ellas.

En la evaluación del riesgo, se considera tanto la magnitud del peligro (muy baja, baja, moderada, alta) como la probabilidad de que él se materialice (iguales calificaciones), las que cruzadas determinan riesgos bajos, moderados o altos.

Un riesgo de la etapa post-cierre que puede ser pasado por alto es la penetración de mineros artesanales de las localidades vecinas a las faenas cerradas. En países en desarrollo, esto es muy difícil de impedir y ciertamente implica un alto riesgo de accidentes, así como un deterioro de las obras de rehabilitación. Este tema es analizado en un trabajo de Reichardt y Reichardt (3: 145-152) que describe graves situaciones en varias operaciones de cierre en Africa.

En Chile hemos tenido experiencias de este tipo durante el cierre (posteriormente revertido) de las faenas auríferas de la compañía minera Dayton, en Andacollo. Por otra parte, puesto que estas situaciones involucran siempre un aspecto social y por lo tanto político, ello dificulta la acción de las autoridades. El resultado final puede implicar, aparte de graves accidentes para los mineros furtivos, el fracaso, al menos parcial, del cierre ejecutado.

### 13.2.: El Problema de los Horizontes de Tiempo.

¿Cuánto tiempo se necesita seguir y monitorear los resultados de un cierre, para asegurarse de su conformidad y corregir las desviaciones observadas? ¿Cuánto tiempo se requiere para afirmar que un cierre ha sido exitoso? Desde luego no puede haber respuestas definidas para ninguna de las dos preguntas. Por una parte, ambas dependen de muchos factores que han sido considerados a lo largo de este curso: Tipo y magnitud del yacimiento, mineralogía, contexto litológico y estructural, métodos y tecnologías de explotación minera y beneficio metalúrgico, clima, altitud, topografía, posición en la red de drenaje, relación con centros poblados y cultivos, fragilidad ecológica o ambiental, etc. Ello, sin contar la complejidad del ambiente humano, que puede presentar serios e interminables problemas.

Sin embargo, las empresas mineras requieren, en su situación contractual con el Estado, contar con cifras definidas en años, al cabo de las cuales, si el cierre ha sido razonablemente exitoso, puedan verse liberadas de ulteriores responsabilidades (y recuperar la correspondiente garantía financiera).

Existen, entonces, dos clases de plazos. Unos de naturaleza física o biológica, que pueden ser efectivamente muy largos y que necesariamente deberían ser asumidos por el Estado, como “guardián de la equidad intergeneracional”. En Alemania, este tipo de plazos se ha situado en unos 500 años, lo que puede parecer muy exagerado en nuestro Continente. Sin embargo, obedece a razones geológico-geomorfológicas fundadas. Al respecto un artículo reciente (2008) de Gandy y Younger (20) describe la aplicación de un modelo predictivo a la capacidad de generación de drenaje ácido de una pila de estériles con pirita de la minería del carbón en el norte de Inglaterra, y concluye que ella puede durar varios siglos. En particular, la estabilidad física de los desechos mineros puede requerir un largo tiempo de evaluación, en especial si se trata de materiales finos en zonas áridas o semiáridas, sometidos a esporádicas precipitaciones torrenciales y a la acción erosiva del viento, sin el resguardo de una cubierta vegetal efectivamente sustentable.

Este tema fue analizado por Erskine et al (3: 211-216) respecto al criterio de finalización de la rehabilitación forestal de anteriores explotaciones mineras en Australia. Dichos autores señalan que “hay pocas esperanzas de que los sitios rehabilitados presenten composiciones florísticas similares a las de sitios no explotados dentro de unas pocas décadas” y que ello no debe sorprender, dado que los sitios de referencia “no han sido expuestos al grado de trastorno de un sitio antes explotado, donde un material altamente dispersivo, no consolidado y salino, cubierto por un suelo delgado, retarda y limita el reestablecimiento de vegetación”.

En consecuencia puede ser razonable distinguir entre costes ambientales a corto (o mediano) y a largo plazo. Los primeros (desde años a 2 a 3 décadas) deberían ser asumidos por la empresa, a través de acciones de rehabilitación aseguradas mediante garantías financieras, mientras los últimos necesariamente tendrían que ser de cargo del Estado (y de las generaciones próximas). Correspondería a la etapa de evaluación de impactos ambientales del proyecto considerar seriamente esos costes ambientales y el valor monetario que implica su rehabilitación o manejo (p.ej., el tratamiento permanente del drenaje ácido). De esa evaluación surgiría para la empresa o el Estado la conveniencia o no de realizar el proyecto. En cierto modo, países europeos como Francia y algunos estados de USA que en la práctica han renunciado a la minería metálica, han realizado una evaluación de ese tipo, que arrojó resultados negativos. Otros países en cambio, como Chile, necesitan y desean continuar realizando minería. Lo importante es que lo hagan con los ojos bien abiertos y una efectiva responsabilidad intergeneracional.



## Capítulo 14: Reutilización de los Sitios e Instalaciones.

### 14.1: Aspectos a Considerar en la Reutilización de Sitios.

Como señala Skinner (17), la minería ocupa un espacio reducido de la superficie de la Tierra, y buena parte de ella se realiza en sitios que son inadecuados para otras actividades productivas. En ese sentido, se podría pensar que la reutilización de sitios de anteriores explotaciones mineras podría tener escaso interés, especialmente considerando sus posibles riesgos residuales. Sin embargo, hay razones importantes para considerar esa reutilización. En primer término, hay muchas labores mineras realizadas en terrenos que hoy se sitúan en áreas de alto valor económico. Este es un caso frecuente en Europa, donde la minería se situó cerca (o debajo) de las antiguas ciudades, y donde la tierra para habitar o cultivar tiene una alta plusvalía. También lo es en antiguos distritos mineros de USA, como Colorado, donde la belleza del paisaje ha favorecido la implantación de *resorts* turísticos de montaña así como de cabañas de “fin de semana”. El trabajo de Didier y Daupley reseñado en la sección 13.1 considera justamente la necesidad de asegurar la adecuación de los antiguos sitios mineros a los nuevos usos propuestos. Similar objetivo tiene la cartografía geoquímica polaca a distintas escalas, que se utiliza para asignar posibilidades de uso industrial, poblacional o agrícola a los suelos, considerando su grado de contaminación por metales pesados.

En Brasil, se ha desarrollado una metodología (Weber y Brandt, 3: 129-138) para asignar posibles usos a los sitios rehabilitados desde el punto de vista socio-ambiental. Los autores presentan una metodología enfocada en el desarrollo a largo término de la respectiva región, a través del impulso al desarrollo humano y ambiental, creando condiciones favorables a la paz social y a la inclusión de grupos culturales y étnicos diversos. La metodología consta de cinco etapas, a saber:

- Mapeo (= cartografía) de factores múltiples (ambientales, uso de la tierra, etc.) a escala 1:10.000, como base multidisciplinaria de diagnóstico.

- Análisis y discusión de la información obtenida, en términos del posible uso económico del territorio posterior al cierre de la explotación.
- Comparación de las distintas posibilidades de uso, desde el punto de vista de los costes que implica cada una de dichas posibilidades, así como de los beneficios que ellas implican.
- Presentación de las proposiciones a las partes interesadas para su evaluación.
- Refinamiento y modelación de los efectos de la (o las) soluciones seleccionada(s), con vistas a su maduración.

El trabajo completa su exposición con la descripción de varios casos. En uno de ellos (mina de hierro en Minas Gerais), se optó por destinar el sitio a proyectos comerciales y residenciales y en parte a hoteles y turismo ecológico, en otro (también una mina de hierro), a un proyecto eco-turístico, etc.

El Manual del ITGME (= IGME) (1:210) propone la consideración de los siguientes factores culturales geo-ambientales para evaluar futuros usos de los terrenos rehabilitados:

#### Culturales:

- Localización
- Accesibilidad
- Tamaño y forma
- Propiedad del terreno
- Limitaciones legales
- Características de la población
- Intereses de la empresa minera

#### Geo-Ambientales:

- Relieve (topografía)
- Altitud y pendiente
- Drenaje
- Exposición al sol
- Temperatura y precipitaciones
- Características de los estériles
- Características de los suelos.

Desde luego habría que agregar a los primeros los factores de orden económico, y a los segundos, lo referente a los riesgos producto de las anteriores labores mineras (metales pesados, riesgos de subsidencia, etc.). El mismo Manual propone (p 201) una matriz de compatibilidad

entre los distintos usos que se podrían asignar a diferentes sectores del sitio rehabilitado.

El riesgo de que el uso asignado al terreno rehabilitado sea equivocado y llegue a dañar la restauración realizada, fue analizado por Hattingh et al (3: 261-271), basados en experiencias de Sud Africa. A modo de ejemplo, se cita la agricultura en condiciones de secano, que puede llevar a la erosión de los suelos rehabilitados. Los mismos autores proponen una aproximación probabilística para enfrentar este problema, el que, sin embargo, puede ser afectado por la presión de factores socio-económicos que se impongan a los criterios técnicos.

#### **14.2: Principales Tipos de Reutilización de Sitios Rehabilitados.**

**Agrícola o Forestal:** El uso agrícola de terrenos restaurados es uno de los más comunes, en particular cuando la explotación se situaba en terrenos originalmente destinados a tal uso. La opción es buena, a condición de que no implique riesgos de contaminación de los productos agrícolas ni efectos erosivos serios. Por otra parte, los suelos no deben ser ácidos (1: 205-206) y deben ser adecuadamente acondicionados con nutrientes y materia orgánica. La pendiente máxima para uso agrícola es 10 % (5°) y para pastizales 25 % (15°). Si ella es superior, se puede considerar un uso forestal (hasta 70 % o 35°). Si no se dispone de agua para riego (agricultura de secano), crecen los riesgos de erosión, puesto que es necesario roturar la tierra, sin que exista seguridad de suficiente lluvia. Una alternativa de cultivo en el caso de suelos ricos en metales pesados, es el de flores, practicado con éxito en Chile en el contaminado distrito de La Higuera, al norte de La Serena.

Un especial tipo de agricultura es el cultivo de hongos en galerías de minas abandonadas, que ha sido realizado con cierto éxito en las antiguas explotaciones carboníferas de la Región del Bío-Bío, Chile.

**Urbanístico o Industrial:** Para estos fines es necesario descartar riesgos relativos a la presencia de sustancias tóxicas, incluidos metales pesados como Pb, Cd y As (21), a fenómenos de remoción en masa, subsidencia y erosión, así como a problemas de drenaje (1: 202). Desde luego, la ubicación geográfica del sitio rehabilitado tiene especial

importancia para este fin. Ella es muy atractiva, cuando el sitio se encuentra en el entorno de una ciudad o en un lugar apto para fines recreacionales (montaña, costa, etc.).

**Recreativo, Deportivo o Educativo:** Un sitio minero rehabilitado puede ser apto para estos usos, a condición de que no presente riesgos serios y sus características topográficas, geológicas, históricas, etc. le agreguen valor. Por ejemplo, puede ser interesante como “parque de aventuras”, para moto o bicicross (= *mountain bike*), escaladas, etc. (1: 202-203). Lo importante es que exista equilibrio, de manera de no agregar mucho riesgo a dichas actividades recreativas.

**Conservación de la Naturaleza y Refugio Ecológico:** En los fondos oceánicos, los buques naufragados, los restos de plataformas petroleras, etc., se convierten en hábitats privilegiados para la flora y fauna marinas. Análogamente, un sitio minero rehabilitado puede constituirse en un valioso refugio para las cada vez más acorraladas flora y fauna silvestres. Desde luego, este uso requiere protección y es poco rentable (salvo a través del turismo). Sin embargo, constituye una buena manera de devolver algo a la naturaleza... después de haber extraído su riqueza mineral.

**Turístico – histórico:** La minería ha desempeñado un rol importante en la historia, y cuando se han conservado restos significativos de su actividad, ellos pueden constituir un valioso atractivo turístico, aparte de su mérito cultural. En la puesta en valor de estos atractivos se destacan países como Polonia y España. Al respecto, un artículo de Popielak y Zieba (3: 869-877) describe la mina subterránea de sal de Bochnia, en el sur de Polonia, que ha sido explotada continuamente entre 1248 y principios de los 1990's. Esta mina, cuya pique central original es aún accesible y puede ser visitada por los turistas, cumple actualmente el rol de un museo, así como el de un *spa* y sanatorio para pacientes con enfermedades respiratorias. En términos económicos, sus actuales funciones contribuyen de modo importante a la economía local, dado que la mina atrae anualmente decenas de miles de turistas.

En España, donde la minería data desde antes de los tiempos del Imperio Romano, se ha conservado un rico patrimonio histórico, que incluye restos arqueológicos de dispositivos hidráulicos, utilizados en la

minería del oro aluvial. Estos y muchos otros museos de sitio no solamente enriquecen la historia del País, sino que generan ingresos importantes por concepto de turismo. Igual cosa ocurre en Francia, Alemania, Inglaterra, y otros países de Europa así como en USA y Canadá. En Chile, se han rescatado algunos sitios histórico-mineros, como Sewell, y algo se ha procurado salvar de las antiguas salitreras, que durante años fueron objeto de saqueo continuo. Igualmente se ha procurado resolver parte de la cesantía de la antigua zona carbonífera de Lota habilitando algunas labores para visitas turísticas. Sin embargo, distintos factores han limitado el éxito de estas iniciativas.

**Depósitos de agua:** En Nevada (USA) muchas cavidades correspondientes a explotaciones a cielo abierto se utilizan como depósitos de almacenamiento de aguas. Como señala el Manual del ITGME (= IGME) (1: 210), este tipo de uso puede servir a fines diversos: regulación hidráulica, riego, abastecimiento de agua, recarga de acuíferos, deporte, fines ornamentales, etc. Desde luego, ello requiere que el depósito no implique riesgos de contaminación del drenaje.

**Depósitos de hidrocarburos:** Su uso es más restringido pero puede ser importante en el caso de minas subterráneas de sal, que por la impermeabilidad y plasticidad de sus paredes ofrecen condiciones favorables para el almacenamiento de petróleo. (Este uso imita el rol de los domos de sal en los reservorios naturales de petróleo).

**Vertederos y Depósitos de Seguridad:** Un uso frecuente para excavaciones a cielo abierto cercanas a áreas urbanas e industriales es su uso en vertederos de estériles y basuras (1: 203-204). Naturalmente, ello requiere condiciones hidrogeológicas, climáticas, geográficas y topográficas propicias y puede exigir una previa impermeabilización de la cavidad.

Por otra parte, algunas minas subterráneas pueden ofrecer condiciones propicias para su uso como depósitos de seguridad de sustancias peligrosas. Este tema ha sido estudiado por centros de investigación de Alemania, como la Universidad Técnica de Berlín. Por supuesto exige condiciones favorables en aspectos tales como la litología, estructura y mineralogía del lugar, siendo los aspectos

hidrogeológicos y las estructuras presentes (fallas, diaclasas) de especial importancia.

**Científico:** Una explotación minera cerrada puede ofrecer notable interés científico. En USA existe un proyecto para convertir la gran mina subterránea de Urad – Henderson en un centro de investigaciones. Aparte de temas de frontera, como el estudio de penetración de partículas de origen cósmico como los neutrinos, una mina de esas características se presta para estudiar mecánica de sólidos, flujo térmico, comportamientos biológicos, etc. Al respecto, el complejo de El Indio (Coquimbo, Chile) podría ser un centro privilegiado para estudiar el proceso de generación de drenaje ácido y materias relacionadas.

## Capítulo 15: **Los Pasivos Mineros Abandonados**

### 15.1: **Consideraciones Generales Sobre el Problema.**

Al igual que “el tema ambiental” y su influencia en la legislación y en la predicción y control de impactos sobre el medio, la preocupación por los efectos ambientales del cierre de minas data sólo de las últimas décadas del recién pasado siglo. Antes, existía una cierta idea de que la naturaleza absorbería paulatinamente los posibles efectos negativos de esa actividad, a los cuales tampoco se concedía mayor importancia. Un caso ilustrativo de esta mentalidad es la acumulación en la Bahía de Chañaral, de relaves procedentes de la explotación del pórfido cuprífero de El Salvador, los que eran transportados por el Río Salado. A lo largo de ese río se habían instalado una serie de faenas que recuperaban parte de los sulfuros transportados. Cuando la empresa minera decidió construir tranques de relaves, los propietarios de las faenas de recuperación la demandaron ante la justicia, aduciendo un cierto “derecho de propiedad” sobre las aguas y sedimentos del Río, y obtuvieron un fallo favorable. Finalmente, la situación se resolvió, pero ya entonces se había formado una especie de “yacimiento secundario” de cobre de decenas de Mt y ley cercana al 0.3 %, constituido por un material endurecido, que eliminó toda forma de vida marina en y bajo su superficie. El autor de estas líneas, recorrió más de una vez la zona, y no observó mayor preocupación al respecto. En cambio, compartió con científicos extranjeros el interés por el proceso metalogénico artificial que estaba ocurriendo, y que presentaba cierta analogía con el origen natural atribuido a los grandes yacimientos sedimentarios de cobre del cinturón africano. Ello se explica porque la irrupción del tema ambiental constituyó un verdadero cambio de paradigma, que modificó rápida y radicalmente la visión de nuestra relación con la naturaleza. En consecuencia no cabe protestar por la irresponsabilidad que caracterizó esa época (que todos compartimos), sino encontrar soluciones prácticas a aquellos problemas efectivamente graves. Por lo tanto, es necesario evaluar para priorizar, así como buscar soluciones efectivas del menor coste posible, para resolver dichos problemas.

En Canadá (Tremblay y Hogan, 3: 43-52) existen más de 10.000 sitios mineros abandonados que requieren distintos grados de restauración. En el año 2002 se estableció la Nacional Orphaned/Abandoned Mines Initiative (NOAMI), que tiene la calidad de un programa cooperativo. En su dirección participan la industria minera, instancias federales, provinciales y locales de gobierno, organizaciones ambientalistas (ONGs) y representantes de los aborígenes canadienses. Su dirección, tiene el carácter de un comité consultivo y debe evaluar la importancia de los distintos aspectos implicados y establecer recomendaciones que guíen la colaboración y sus objetivos de remediación a través de todo el País. Un objetivo principal de NOAMI fue el desarrollo de capacidades para desarrollar un inventario compatible para cada provincia o territorio, vale decir una base de datos realizada conforme a criterios comunes de clasificación y jerarquización. Al respecto, la mayor dificultad estaba en la diversa manera de describir hechos y peligros, así como en establecer qué peligros debían ser considerados en el inventario (situación complicada por la diversidad de agencias participantes, así como por la diversidad territorial y política de la nación canadiense. Al respecto se optó por un sistema de alto nivel disponible en la red (web) que incluye todos los sitios inactivos, provisto de una interfase de mapas y que actúa como un portal respecto a los inventarios locales y de las agencias. El Programa debió enfrentar algunas barreras legislativas respecto a la colaboración, así como la tarea de identificar posibles fuentes de financiación para los estudios y trabajos de restauración, generando manuales sobre ambos temas (como "Potencial Funding Approaches for Orphaned/Abandoned Mines in Canada). También NOAMI se ocupa de la transferencia de tecnología respecto a limpieza y restauración de sitios. Considerando lo reciente de la iniciativa, el trabajo de Tremblay y Hogan se centra en las tareas de planificación y estructuración de esta vasta iniciativa y no incluye información respecto al avance concreto ya logrado en materia de rehabilitación de sitios mineros.

En cambio, el estudio de Nahir y David (3: 777-785) concierne a un programa más concreto, circunscrito a tres territorios del norte de Canadá, ejecutado por el "Northern Affairs Contaminated Sites Program" (CSP) del Gobierno de Canadá. El CSP ha inventariado unas 25 minas abandonadas en los territorios de Yukon, Northwest Territories y Nunavut. Las tierras públicas de esos territorios tienen carácter federal y son manejadas por el Departamento Federal de Asuntos Indios y del



Norte. Las 25 minas abandonadas implican responsabilidades financieras por rehabilitación del orden de mil millones de dólares canadienses. Hasta la fecha, el CSP ha colocado 247 millones, sobre la base de una evaluación científica de los riesgos y su jerarquización, establecida por el Federal Contaminated Sites Action Plan. Por su parte, el Gobierno Federal anunció en el 2003 la financiación de un programa a 15 años, que implica una inversión del orden de 3500 millones de dólares canadienses (cotizados en paridad con US\$). El sitio de mayor prioridad es el Giant Mine Project, situado en Yellowknife, Northwest Territories, a unos 5 km de la ciudad del mismo nombre. La mina explotó oro asociado a minerales ricos en arsénico, y la metalurgia de la mena incluyó un proceso de tostación (análogo al utilizado por Cía. Minera El Indio en Chile), que llevó a la acumulación de 237.000 t de trióxido de As en labores subterráneas de la mina, entre 20 y 75 m bajo la superficie. Inicialmente se pensó que no existía mayor riesgo de percolación del compuesto, debido al sello que implicaba el permafrost en superficie. Sin embargo, éste se fundió progresivamente y el agua que percola de la explotación contiene unos 4000 mg/L (siendo la norma para agua potable 0.025 mg/L). El sitio presenta también otros riesgos como contaminación difusa de arsénico, pérdidas desde depósitos de relaves, edificios contaminados con arsénico, asbesto, etc., así como 8 rajos (= cortas) abiertos y 35 accesos a labores subterráneas, que igualmente presentan peligros. El río Baker Creek fluye a través del sitio por un canal “acomodado para permitir las operaciones mineras y tanto sus aguas como sedimentos están contaminados con arsénico”. Lo notable y preocupante es que esto ocurrió en un país desarrollado, que cuenta con ciencia y tecnología avanzada – no en un “país en desarrollo” y que la producción minera del sitio cesó hace sólo ocho años..!!

En cambio, el gobierno de Canadá está colaborando con el de Perú (Canadian international Development Agency – CIDA – Ministerio de Energía y Minas de Perú – PMEM) a través del Programa PERCAN. Dicho programa busca priorizar las numerosas minas abandonadas en Perú conforme a criterios científicos de evaluación de riesgos respecto a su necesidad de medidas de rehabilitación y limpieza. El Programa utiliza información de un esfuerzo anterior (1995-2003) y realiza sus análisis a nivel de cuenca, considerando:

- Grado de desarrollo humano de los alrededores del sitio.

- Sensibilidad ambiental de la cuenca.
- Probabilidad de impactos por descargas históricas o actuales.

Lo anterior se enfoca en cada cuenca, analizando las posibles consecuencias de las actuales, o de futuras condiciones adversas, en la salud humana y en los componentes ecológicos más valiosos del ambiente. Naturalmente se trata de un esfuerzo valioso y bien dirigido, pero que para ser exitoso en sus frutos deberá contar con fondos suficientes en la etapa de realizaciones concretas (lo que puede representar un paso difícil de dar en nuestros países en eterno desarrollo).

En suma, las explotaciones mineras abandonadas representan un muy costoso pasivo, que para la mayoría de los países será muy difícil de asumir. En término del tema de los planes de cierre, cabe esperar al menos que su éxito permita que no se conviertan a mediano o largo plazo en otros pasivos que se añadan a la ya larga lista.

### **15.2: Los Pasivos Ambientales Mineros en Chile: ¿Cómo Resolver al Menos los Casos más Graves?**

A principios del presente año (2008), la prensa de la ciudad de Coquimbo informaba sobre un posible caso de cáncer en el vecino pueblo de La Higuera, situado unos 45 km al norte. La Higuera es un típico pueblo minero y el médico local relacionaba el caso diagnosticado con la posible presencia de asbesto en un depósito de relaves cercano a la residencia de la persona afectada. Cuando visitamos el sitio con el objeto de tomar algunas muestras para verificar lo señalado por el médico, nos encontramos con la sorpresa de que el depósito en cuestión se encontraba al frente, y a menos de 50 m del centro de salud local (una moderna y bien decorada construcción). Aunque no contamos aun con las determinaciones precisas, el material del relave presenta efectivamente fibras microscópicas y corresponde al tipo de mineralogía rica en actinolita, cuya alteración puede generar asbesto del tipo más peligroso. El punto es qué hacía ese relave en medio del pueblo y por qué se construyó un centro de salud frente a él, sin removerlo o cubrirlo previamente.

Cuando se llega a la ciudad de Andacollo, la vista desde el camino es impresionante: la gran basílica, las explotaciones mineras a cielo abierto, las pilas de lixiviación de Carmen y Dayton, y las casas del pueblo con los numerosos restos de relaves y pilas de otros desechos mineros en medio de ellas. Sin duda, representa una atracción turística por la fusión entre pasado y presente y los cerros multicolores que rodean esta cuenca, situada a unos 1000 m de altura. El problema es que Andacollo está a punto de ser declarada zona saturada por el polvo en suspensión y que es difícil convencer a los visitantes extranjeros de nuestra seriedad en materias de protección ambiental ante tal abundancia de desechos mineros en medio de una ciudad.

Al respecto, nos han explicado que se ha procurado mitigar el problema a través de iniciativas como vegetar esos desechos, pero que los propietarios de ellos se oponen, y cuentan con los derechos legales para hacerlo. Si ello es efectivo, habría que partir modificando la legislación. Parece de sentido común el que un desecho minero deba ser considerado como un residuo peligroso si se encuentra en el radio urbano, de modo que la responsabilidad por aislarlo o removerlo recaiga en el propietario. Por otra parte, son muchas las situaciones de descuido a este respecto presentes en distintas ciudades del norte de Chile, como para pensar en cambiar la actitud puramente legalista o modificar leyes equivocadas por otras de efectiva protección de la salud y la calidad de vida de las personas. En consecuencia, no hace falta un largo y sofisticado estudio para concluir que se debe partir por el problema de los desechos mineros en el radio urbano y que el aspecto legal debería ser resuelto en primer lugar.

Al priorizar entre los pasivos mineros situados fuera del radio urbano es importante considerar tanto sus posibles efectos contaminantes sobre el agua cómo sobre el aire. En el caso del agua, interesa en particular lo relativo a su flujo subterráneo, por la mayor dificultad de su monitoreo, así como por el consumo directo que de ella se hace en el medio rural. En cuanto al aire, es igualmente importante lo relativo al tamaño de las partículas como a su composición química y su estructura mineralógica (p.ej., posible presencia de asbesto en relaves ricos en actinolita, mineral abundante en yacimientos de la Cordillera de la Costa del norte de Chile). Otras consideraciones pueden perfectamente ser adaptadas de las metodologías de priorización desarrolladas en Canadá y aplicadas

también en Perú (ver 15.1). Lo esencial en todo caso es pasar lo antes posible a la acción, simplificando los estudios, para hacerlos lo más prácticos que sea posible y privilegiando las acciones concretas que resuelvan, al menos, los problemas más serios. Ello, de modo realista y sustentable, vale decir, considerando el contexto de cada sitio.

## Referencias

**Nota:** El presente Curso está basado sobre tres obras principales, correspondientes a las citas 1 a 3, cuya adquisición se recomienda para un estudio más detallado de las respectivas materias. Complementariamente, se citan otros trabajos, en parte correspondientes a los resultados obtenidos por el grupo de estudios geoquímica-ambientales integrado por investigadores de las Universidades Complutense y Rey Juan Carlos de Madrid, de Castilla – La Mancha (Escuela de Minas de Almadén), España y de La Serena, Chile, así como por tesis de la carrera Ingeniería Civil Ambiental de esta última Universidad.

- 1- ITGME (1989). Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid, 321.
- 2- Washurst, A. y Noronha, L. (2000). Environmental Policy in Mining. Corporate Strategy and Planning for Closure. Lewis Publishers, Boca Ratón, Florida, USA, 513 P.
- 3- Fourie, A., Tibbett, M. y Wiertz, J. Eds. (2007). Mine Closure 2007. Proceedings of the Second International Seminar on Mine Closure, Santiago, 16-19 Octubre 2007, 880 p.
- 4- Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J. y Maturana, H. (2004). Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio – Tambo discrit) vs. Geologic processes. Journal of Geochemical Exploration 84: 53-64.
- 5- Galleguillos, G., Oyarzún, J., Maturana, H. y Oyarzún, R. (2008). Retención de arsénico en embalses: el caso del río Elqui, Chile. Ingeniería Hidráulica en México, 23, 3: 29-36.
- 6- Oyarzún, J. (2003). Los riesgos de contaminar aguas con metales pesados. Sustentare, pp 1-4, en Minería Chilena 266.

- 7- Oyarzun, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. e Higuera, P. (2007). Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion – contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Geology*, 53: 283-294.
- 8- Guevara, S., Oyarzún, J. y Maturana, H. (2006). Geoquímica de las aguas del Río Elqui y de sus tributarios en el período 1975-1995: factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu y As. *Agricultura Técnica, Chile*, pp 57-69.
- 9- Kleinmann, B. y Booth, C., Eds. (2006). Special Issue N° 2, v 25 de *Mine Water and the Environment* (Springer) dedicado a la hidrología y drenaje ácido del área de Butte, Montana, USA, incluye 8 artículos, 69 p.
- 10- Blanco, R., Watson, R., Carvajal, A. y Chávez, M. (2004). Zonificación preliminar del área del Casco Urbano de Zaruma, según el grado de riesgo geodinámico, p 465 a 476 en *Actas I Semana Ibero-Americana de Engenharia de Minas*. Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo, 689 p.
- 11- Galleguillos, G. (2004). Efecto de la actividad minera y de las obras hidráulicas en la calidad de las aguas del Río Elqui y de sus afluentes. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, 247 p.
- 12- ITGME (1995). *Contaminación y Depuración de Suelos*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid, 330 p.
- 13- Araya, F. (2005). Cuantificación y remediación de suelos contaminados del Distrito El Indio. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, 150 p y anexos.
- 14- Molina, J., Oyarzun, R., Esbrí, J. e Higuera, P. (2006). Mercury accumulation in soils and plants in the Almadén district Spain, one of the most contaminated sites on Earth. *Environmental Geochemistry and Health*, 28: 487-498.

- 15- Aliste, N., Moraga, A. y Alvarez, L. (1966). Efectos del sismo de Marzo de 1965. Provincias de Aconcagua y Valparaíso. Instituto de Investigaciones Geológicas (actual SERNAGEOMIN) Boletín N° 20, 71 p y anexos.
- 16- de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid, 715 p.
- 17- Skinner, B.J. (1994). Mineral myopía pp 10-16, en: Maintaining Compatibility of Mining and the Environment Brimhall G. y Gustafson, L. Eds. Society of Economic Geologists, 72 p.
- 18- Oyarzún, J., Maturana, H., Paulo, A. y Pasiieczna, A. (2003). Heavy metals in stream sediments from the Coquimbo Region (Chile): effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid Andean basin. Mine Water and the Environment 22: 155-161.
- 19- SERNAGEOMIN (2008). Guía para la presentación de Proyectos de Planes de Cierre de faenas mineras. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, 26 p.
- 20- Gandy, C. J. y Younger, P. L. (2008). Predicting long-term contamination potential of perched groundwater in a mine-waste heap using a random-walk method. Hydrogeology Journal, 16: 447-459.
- 21- Oyarzún, J. (2001). Algunos metales y metaloides con propiedades tóxicas o carcinogénicas: distribución natural y riesgos por contaminación en Chile. Revista Chilena de Salud Pública v 5; 2-3: 96-101.

[Volver a Cursos GEMM](#)