

## DRENAJE DE MINAS A CIELO ABIERTO \*

**Luis Enrique Sánchez**

*Departamento de Engenharia de Minas  
Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo*

### 1. INTRODUCCION

El agua transita por las diversas «esferas» que componen el planeta Tierra: se precipita desde la atmósfera, se incorpora al suelo, a las rocas y a los seres vivos, se escurre hacia los océanos y vuelve a la atmósfera. Es el llamado ciclo hidrológico, que puede ser presentado por un modelo de flujos y reservas. El mayor reservorio son los océanos, donde está almacenado 97,39% del agua del planeta, mientras que 2,01% corresponde a las reservas de los casquetes polares y apenas 0,60% a las aguas

dulces continentales. De ellas, solamente 0,02% se encuentra en ríos y lagos y 0,58% en acuíferos.

En cuanto a los flujos, se estima que el total anual de precipitación en todo el planeta (lluvia y nieve) sea del orden de  $496 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , siendo el volumen evaporado o producto de la transpiración de las plantas virtualmente igual (La Rivière, 1989).

Todas las actividades humanas de alguna manera interfieren con las aguas, y la explotación minera no es una excepción.

---

\* Trabajo publicado en "Aspectos Geológicos de Protección Ambiental", Volumen I, UNESCO, 1995.

## 2. LA INTERFERENCIA DE LA EXPLOTACION MINERA EN LA HIDROSFERA

Comparándose con la mayoría de las actividades industriales y agrícolas, la explotación minera no es una gran consumidora de agua. Muchas veces el problema es el inverso y tiene que liberar grandes cantidades de agua no deseables. Este es el problema del drenaje de las minas, el de captar, transportar y eliminar al medio ambiente flujos de agua de manera que no ocasionen daños.

El agua de lluvia o de infiltración en contacto con el mineral, con los estériles, con los desechos y con las áreas operativas se cargan muchas veces de sustancias contaminantes, que sólo pueden ser liberadas mediante procedimientos adecuados.

La mayor parte de las veces, las interferencias de la actividad minera en la hidrosfera tiene efectos locales, ocasionalmente regionales, como es el caso de las cuencas de los ríos Tubarão, Uruçanga y Araranguá, en Santa Catarina, tremendamente contaminados por las actividades de la explotación minera de carbón.

Esta interferencia se da de varias maneras, tanto en la cantidad como en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, de acuerdo con la figura 1.

Esa figura está estructurada en cuatro columnas que representan algunos componentes o actividades de las iniciativas de explotación minera (1); los principales efectos ambientales resultantes directamente de esas acciones (2); los procesos ambientales afectados por esas acciones (3); y los impactos ambientales resultantes (4), o sea, modalidades de alteración de la «calidad ambiental» que pueden asociarse a las modificaciones de los procesos ambientales mencionados.

Como en cualquier discusión sobre los impactos ambientales de la explotación minera como un todo, el diagrama de la figura 1 es genérico, en el sentido que es válido para una iniciativa que tuviera todos los componentes. No siempre es necesario bombear agua desde la cava o desde las galerías subterráneas en todas las minas, por ejemplo. De la misma forma, la disposición de residuos sólidos como estériles y desechos no siempre ocasionará una elevación significativa de la napa freática.

## 3. DRENAJE DE MINAS

El estudio de los problemas de drenaje de minas tiene dos aspectos. El primero es el de mantener condiciones adecuadas de trabajo tanto a cielo abierto como en subterráneo, para lo que es frecuente la necesidad de bombeo de las aguas. Tal asunto no será tratado aquí por ser mucho más de carácter interno a la operación que a sus impactos sobre el medio ambiente.

El segundo aspecto del drenaje en las minas es la gestión de las interferencias de la operación en la hidrosfera. Esta gestión tiene normalmente los siguientes objetivos:

- (i) minimizar la cantidad de agua en circulación en las áreas operativas;
- (ii) reaprovechar el máximo de agua utilizada en el proceso industrial;
- (iii) eliminar aguas con ciertas características para que no afecten negativamente la calidad del cuerpo de agua receptor.

Para alcanzar estos objetivos, la gestión incluye la implantación y operación de un sistema de drenaje adecuado a las condiciones de cada mina, además de un sistema de recirculación del agua industrial. Este capítulo abordará principalmente los sistemas de drenaje.

### 3.1. Concepción y dimensionamiento de sistemas de drenaje

Un sistema de drenaje tiene por objetivo proporcionar la recolección, transporte y lanzamiento final de aguas de escurrimiento superficial de modo que la integridad de los terrenos y las características de los cuerpos de agua receptores sean preservadas. De esta forma, el drenaje tiene por objetivo el control de la erosión, la minimización de la colmatación y la mantención de la calidad física y química de los cuerpos de agua receptores.

Los principales componentes de un sistema de drenaje, mostrados en la figura 2, son los siguientes:

- una o más canaletas perimetrales implantadas en torno de la cava, de las pilas de estéril, eventualmente de las cuencas de desecho y de las áreas de apoyo operativo, con el objetivo de reducir la cantidad de agua de escurrimiento superficial que penetra el área de operación;

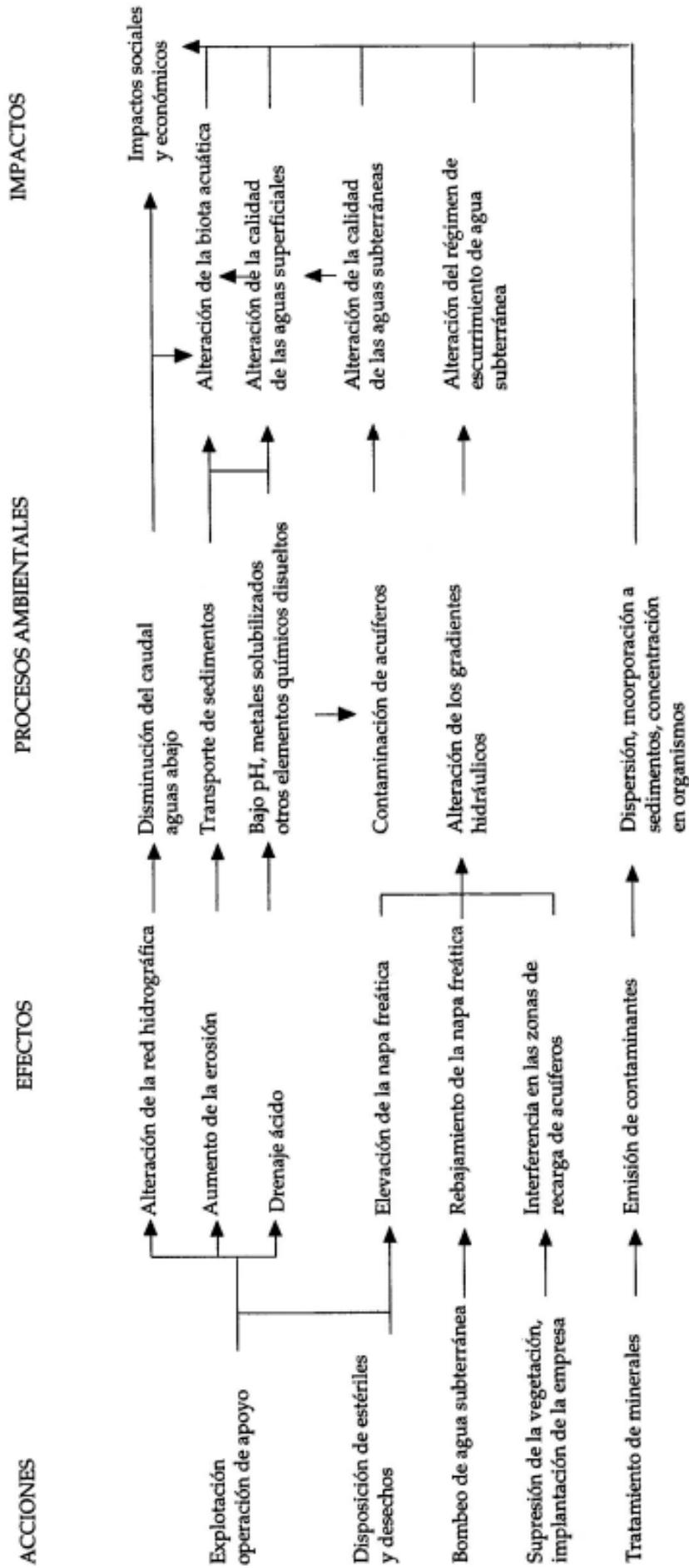


Figura 1 - Principales impactos de la minería en la hidrosfera

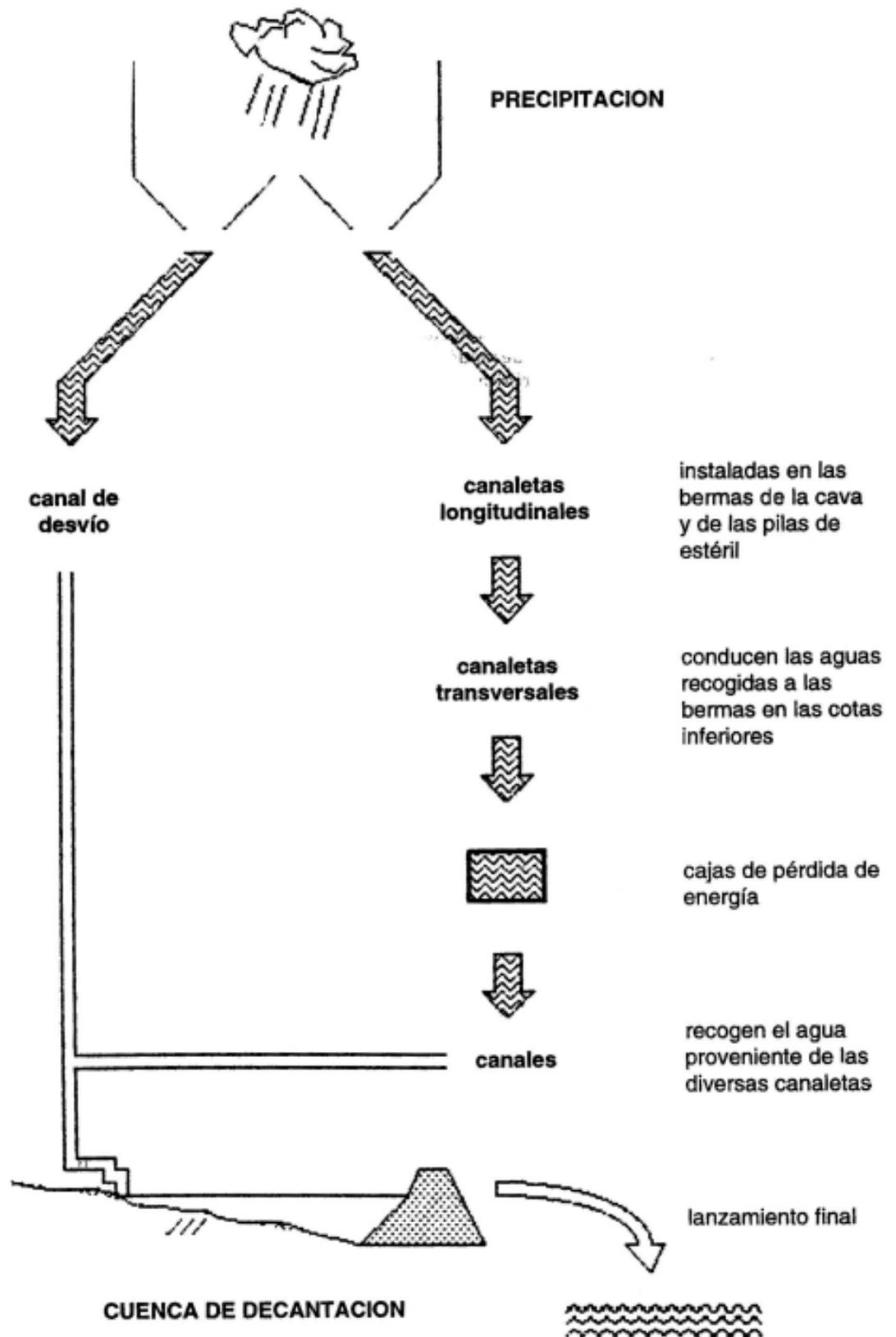


Figura 2 - Sistema de drenaje - Concepción general

- canaletas longitudinales instaladas en las áreas más susceptibles a la erosión tales como taludes de corte en suelo, en las cavas, taludes de corte y de relleno de caminos y, principalmente de pilas de estéril; son canaletas en general implantadas al pie de los taludes y que recogen el agua que se escurre por ellos y por las cunetas;
- canaletas transversales instaladas conjuntamente con las longitudinales, conducen las aguas recogidas en las cunetas hacia cotas inferiores;
- cajas de pérdida de energía, que tienen la función de disminuir la energía cinética de las aguas que escurren por el sistema; están instaladas en la base de las canaletas transversales;
- cuencas de decantación, instaladas en los puntos más aguas abajo de la mina, como por ejemplo al pie de las pilas de estéril, con el objetivo de promover la sedimentación de las partículas sólidas antes del lanzamiento de las aguas a los cuerpos receptores.

### 3.2. Criterios hidrológicos para dimensionamiento

Un sistema de drenaje debe ser capaz de funcionar satisfactoriamente todo el año, o sea, particularmente durante lluvias intensas. ¿Cuál es el índice pluviométrico a utilizarse en el dimensionamiento? Los climatólogos y los hidrólogos desarrollaron métodos de cálculo de las máximas lluvias probables para diversos intervalos de tiempo, denominados períodos de retorno o períodos de recurrencia.

Para un determinado lugar de la superficie de la Tierra, el régimen de lluvias se determina por una serie de factores de grande o pequeña escala, a partir de la circulación de las grandes masas de aire en escala planetaria hasta factores topográficos como la existencia de barreras a la circulación local de las masas de aire húmedo.

Las lluvias se distribuyen desigualmente en el espacio y en el tiempo. Inclusive en una pequeña cuenca hidrográfica pueden haber variaciones significativas de los totales anuales de lluvia, en función de factores de orden local. De este modo, la cuenca del río Itatinga, en la Serra do Mar paulista, que drena un área de apenas 260 km<sup>2</sup> de la meseta hacia el litoral entre los

municipios de Mogi das Cruzes e Bertioga, dos puestos pluviométricos instalados uno a 700 m de altitud y otro en la cota 14, registran valores medios de 4600 mm anuales en el puesto de la parte alta de la sierra y 2600 mm anuales en el puesto al pie de la sierra, situado a pocos kilómetros de distancia.

Pero las lluvias también varían significativamente en el curso del tiempo. En Brasil Central la pluviosidad de los meses de julio y agosto es generalmente cero, mientras que en los meses de enero y febrero alcanza 300 mm o más. De un año a otro la variación puede ser grande. Lo que más preocupa en el dimensionamiento de cualquier sistema hidráulico, sin embargo, son las lluvias intensas y concentradas en un corto período y son evidentemente estos valores máximos que deben ser empleados como criterio de proyecto.

En climas tropicales es común medirse lluvias concentradas, digamos de 200 mm en 24 horas o inclusive de 100 mm en una hora. La cantidad de lluvia por unidad de tiempo (mm/h) es llamada intensidad pluviométrica y es el parámetro empleado en el dimensionamiento. Las intensidades pluviométricas a través de medidas sistemáticas y periódicas tomadas en los puestos pluviométricos. Los períodos de observación, sin embargo, son cortos. La mayoría de los puestos pluviométricos brasileños funcionan solamente hace pocas decenas de años: ¿cómo afirmar que las lluvias más intensas no pueden producirse con menor periodicidad? A través de extrapolaciones, los hidrólogos consiguen estimar lluvias y crecientes máximas para períodos de retorno de hasta diez mil años, que son utilizadas para el proyecto de grandes obras, como las represas para generación de energía eléctrica, las llamadas crecientes decamilenarias. El cuadro 3 muestra períodos de recurrencia para lluvias intensas en diversas ciudades de Brasil.

Al estudiarse el proyecto de una nueva mina raramente se dispone de informaciones pluviométricas para el lugar específico, siendo necesario extrapolar datos de otros puestos pluviométricos. Felizmente casos como los de la cuenca del río Itatinga no son tan comunes, y los hidrólogos también desarrollaron métodos de interpolación que permiten estimar las lluvias en diversos puntos a partir de datos conocidos de otros puestos pluviométricos. Todos estos procedimientos de cálculo hidrológico pueden ser encontrados en los manuales de hidrología.

Pasemos ahora a considerar los otros factores

Cuadro 3 - Precipitaciones pluviométricas para algunos lugares de Brasil (mm)

Localidad	Tiempo de recurrencia 10 años				Tiempo de recurrencia 25 años				Tiempo de recurrencia 50 años			
	Duración (min)											
	15	30	60	120	15	30	60	120	15	30	60	120
Belo Horizonte	38	53	63	64	48	69	79	89	57	83	92	102
Blumenau	31	50	72	80	37	65	97	106	42	79	121	131
Corumbá	42	70	87	98	52	95	118	130	65	121	148	161
Cuiabá	36	55	68	80	42	64	81	93	48	73	92	102
Goiania	39	54	76	95	48	66	92	121	56	78	109	143
Ouro Preto	37	44	58	73	48	55	75	90	60	66	90	108
Paso Fundo	27	36	43	54	33	44	52	66	38	51	59	77
Porto Alegre	31	2	50	70	38	53	64	93	44	64	77	115
Sao Paulo	34	39	46	51	41	52	54	59	49	50	60	66
Santos	39	63	95	119	48	83	129	159	58	101	162	200
Viamao	25	34	38	48	29	39	44	56	32	44	49	63

Fuente: Sousa Pinto et al. (1976)

que influyen en el dimensionamiento de un sistema de drenaje. No toda la lluvia que cae sobre un área determinada se escurre inmediatamente, parte de ella se infiltra y parte queda retenida en las hojas de los árboles y otras plantas y sólo lentamente alcanza la superficie del suelo. La relación entre la cantidad de agua que se escurre superficialmente y la cantidad de lluvia es llamada coeficiente de descarga (C) y naturalmente depende de las condiciones de la superficie, tales como el material, la cobertura vegetal y la inclinación de las laderas. Superficies revestidas tales como calles asfaltadas tendrán un coeficiente de descarga próximo a 1, mientras que áreas forestadas de suave relieve presentarán un bajo coeficiente de descarga. El cuadro 4 muestra valores de C que pueden ser utilizados en proyectos de explotación minera.

Para el dimensionamiento del sistema es necesario conocer el caudal afluente, particularmente en el caso de las cuencas de decantación. Ese caudal puede ser calculado a través de la fórmula racional, multiplicándose el total de agua precipitada en la cuenca de drenaje por el coeficiente de descarga; la cantidad de agua precipitada, a su vez, puede ser asumida

como el producto de la intensidad pluviométrica (en milímetros de lluvia por unidad de tiempo) por el área de drenaje. De esta forma, la expresión de la fórmula racional será:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6}$$

donde:

Q = caudal (m<sup>3</sup>/s);

C = coeficiente de descarga (no dimensional);

i = intensidad de precipitación pluviométrica (mm/h);

A = área de la cuenca de drenaje (km<sup>2</sup>)

El caudal obtenido dependerá del tipo de precipitación utilizado, o sea, de cuál es la intensidad pluviométrica adoptada. Sólo presentan interés en el dimensionamiento de sistemas de drenaje los caudales de pico. El período de retorno deberá adoptarse en función del tipo de la obra. Evidentemente no tiene sentido dimensionar una cuenca de decantación en una mina, que tiene una vida útil limitada, por lluvias

**Cuadro 4 - Coeficientes de descarga**

Tipo de cobertura del suelo	Textura del suelo e inclinación de la vertiente (en porcentaje)								
	Arenosa			Limosa			Arcillosa		
	0-5	5-10	10-30	0-5	5-10	10-30	0-5	5-10	10-30
Bosque	0,10	0,20	0,30	0,30	0,40	0,50	0,40	0,50	0,60
Pasto	0,10	0,20	0,30	0,30	0,40	0,50	0,40	0,50	0,60
Superficie expuesta / cultivada	0,30	0,40	0,50	0,50	0,60	0,70	0,60	0,70	0,80

Fuente: Lyle (1987)

decamilenarias, siendo razonable utilizar valores de 10 a 100 años dependiendo del tipo de estructura, de su porte y de los riesgos ambientales aguas abajo.

Ya el vertedero de una represa de desechos no debe ser dimensionado para períodos de 10 años, pues las consecuencias de un accidente en general son más graves. Además, las estructuras deben permanecer íntegras luego de la desactivación de la empresa, lo que no es el caso de cuencas de decantación que deben ser objeto de medidas de rehabilitación. Períodos de retorno de 1000 e inclusive de 10000 años son recomendados para represas de desechos.

El sistema de drenaje de pilas de estéril debe presentar también, buenas condiciones de funcionamiento luego de su desactivación. Sin embargo la situación más crítica es al comienzo de su implantación, cuando los taludes y cunetas no fueron cubiertos todavía con nueva vegetación. A largo plazo, suponiendo un método constructivo adecuado, la pila debe presentar un buen drenaje interno y protección contra la erosión en superficie, de forma que el coeficiente de descarga disminuirá y los caudales serán menores.

**3.3. Dimensionamiento de canaletas**

Las canaletas de drenaje deben transportar las aguas a una velocidad suficiente para que los sedimentos no se depositen en ellas. En general, pueden ser de tres tipos en cuanto a su sección transversal: circulares, triangulares y trapecoidales y pueden o no estar revestidas.

El caudal proporcionado por una canaletta es dado por la siguiente expresión:

$$Q = V.A$$

donde V = velocidad del agua (m/s) y A = área de la sección mojada (m<sup>2</sup>)

La velocidad del agua es dada por la «fórmula de Manning»:

$$V = \frac{1,49}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

donde:

V = velocidad del agua (m/s)

n = coeficiente de rugosidad del canal (no dimensional)

R = radio hidráulico (m) [área de la sección transversal/perímetro mojado <sup>(1)</sup>]

S = gradiente de la sección longitudinal del canal (%)

El cuadro 5 suministra valores típicos de coeficientes de rugosidad para canaletas excavadas en el suelo y revestidas. Los gradientes típicos para canaletas longitudinales deben ser como mínimo de 2% para garantizar el escurrimiento, pero, con canaletas adaptadas a la forma de la superficie del terreno, pueden ser bastante más altos. El cuadro 6 muestra valores máximos de velocidad de flujo que deben ser observados para evitar erosión de las canaletas no revestidas, en función del gradiente.

**Cuadro 5 - Coeficientes de rugosidad típicos**

Tipo de canaletta	Coeficiente de rugosidad
Revestida con cemento (hormigón), terminación fina	0,015
Revestida con cemento (hormigón), terminación gruesa	0,013
Suelo excavado, recto, sección uniforme, sin vegetación	0,022
Suelo excavado, recto, sección uniforme, laterales cubiertos con césped	0,030
Suelo excavado, en curva o irregular, sección no uniforme, con arena o piedra en el fondo	0,030
Canal natural, recto, sin vegetación	0,030
Canal natural, en curva o irregular, sin vegetación	0,035
Canal natural, en curva o irregular, con vegetación	0,100

Fuente: Lyle (1987)

<sup>(1)</sup> Perímetro mojado es el perímetro de la sección transversal del canal que estará en contacto con el agua en el caso de flujo máximo

De esta forma, conociéndose el caudal máximo a drenar por las canaletas (que puede obtenerse a partir de la fórmula racional), la fórmula de Manning permite el cálculo de la sección transversal de la canaleta y la determinación de la necesidad o no de revestimiento.

**Cuadro 6 - Valores máximos de velocidad de flujo para evitar erosión**

Tipo de fondo	Vel. máxima (m/s)	Inclinación (%)
Arcillo-arenoso	0,75	0,5
Arcillo-siltoso	0,90	1,0
Arcilloso	1,20	2,0
Mezcla de arcilla y pedrisco	1,50	2,5
Roca	2,40	4,0

Fuente: Lyle (1987)

Teniéndose en mente la recuperación del área degradada y su uso futuro, las canaletas sin revestimiento son mejores, pues representan una menor interferencia paisajística. Pero esto depende del uso futuro previsto y del lugar de la mina en que ellas serán instaladas.

Los principales tipos de revestimiento son, piedra partida, mezcla con piedra común, cemento (hormigón) y tubos de acero. Los más usados, debido al costo relativamente bajo y facilidad de implantación, son secciones circulares de cemento (hormigón) pre-fabricadas. Los cuidados en la implantación son principalmente la buena compactación del suelo donde se asentarán y la unión cuidadosa de las secciones de forma de evitar la infiltración de agua.

### 3.4. Dimensionamiento de cuencas de decantación

Las cuencas de decantación son necesarias aunque un buen sistema de drenaje haya sido implantado en la mina. Durante la vida útil de la empresa siempre habrán superficies expuestas a la acción de las aguas y del viento y por ende suministrando material transportado aguas aba-

jo. Una mina puede tener diversas cuencas de decantación de portes variados. Por ejemplo, se puede disponer de una cuenca al pie de cada escombrera y de pequeñas cuencas distribuidas en puntos convenientes a lo largo de las vías de circulación. Cuando el área de la mina ocupa más de una micro cuenca hidrográfica es usualmente necesario disponer de por lo menos una cuenca de decantación en cada cuenca hidrográfica.

Cuencas excavadas y pequeñas represas de enrocamiento, de bloques o inclusive de bolsas de arena pueden formar buenas cuencas de decantación si se implantan en las proximidades de la fuente generadora.

La función de una cuenca de decantación es promover la sedimentación de las partículas sólidas transportadas por las aguas de drenaje antes de verterlas al cuerpo receptor. Las partículas más gruesas decantarán más rápidamente que las partículas finas, de modo que la cuenca debe ser dimensionada en función de la granulometría del material transportado. La velocidad de decantación de una partícula en el agua se estudia por la mecánica de los fluidos y puede ser expresada por la ley de Stokes:

$$V_{sed} = \frac{g}{18\mu} (s - 1) D^2$$

donde:

$V_{sed}$  = velocidad de sedimentación (cm/s)

$g$  = aceleración de la gravedad (=981 cm/s<sup>2</sup>)

$\mu$  = viscosidad de fluido (cm<sup>2</sup>/s)

$s$  = densidad de la partícula (2,65 para cuarzo)

$D$  = diámetro de la partícula, supuesta esférica (cm)

La viscosidad del agua, que depende de la temperatura, es dada en el cuadro 7. Los diámetros adoptados dependerán de la granulometría del material transportado. El cuadro 8 muestra las dimensiones de las principales fajas granulométricas.

**Cuadro 7 - Viscosidad Cinemática del Agua**

Temperatura (° C)	Viscosidad (cm <sup>2</sup> /s)
0	0,01792
5	0,01519
10	0,01308
15	0,01141
20	0,01007
25	0,00897
30	0,00804

Fuente: Lyle (1987)

**Cuadro 8 - Fajas granulométricas**

Granulometría	Diámetro (cm)
Arena gruesa	0,02 a 0,2
Arena fina	0,002 a 0,02
Limo	0,0002 a 0,002
Arcilla	< 0,0002

Se producirá sedimentación en la cuenca cuando el tiempo de residencia de las partículas fuere suficiente para permitirla. El tiempo de residencia, por otra parte, depende del caudal afluente (supuesto, por razones de simplificación, idéntico al efluente) y del volumen de la cuenca, o sea:

$$t_r = vol/Q$$

La velocidad de decantación, a su vez, suponiendo que no hay movimiento horizontal de las partículas (aproximación razonable para superficies suficientemente grandes) será el cociente entre la profundidad de la cuenca p y el tiempo de residencia t<sub>r</sub>:

$$V_{dec} = p/t_r$$

sustituyendo el tiempo de residencia y llamando Adec al área de la cuenca de decantación:

$$V_{dec} = \frac{p}{t_r} = \frac{p}{vol/Q} = \frac{p}{(A.p)/Q} = \frac{Q}{A}$$

y por lo tanto:

$$A_{dec} = Q/V_{dec}$$

o sea, el área de la cuenca de decantación es el cociente del caudal afluente por la velocidad de decantación y no depende de la profundidad de la cuenca.

A través de este procedimiento se puede dimensionar una cuenca de decantación. Sin embargo, si las partículas fueren muy finas, el tiempo de decantación será tan grande que las áreas serán enormes, lo que es no sólo impracticable en términos económicos sino que causaría también un impacto ambiental mayor que el simple lanzamiento de los sedimentos en las vías hídricas. En este caso, se hace necesario promover la precipitación de las partículas con ayuda de un agregante, o sea, un compuesto químico que tiene la función de promover la agregación de partículas finas.

El método de dimensionamiento de cuencas de decantación aquí presentado, produce en verdad un resultado apenas indicativo, una vez que muchos parámetros deben ser simplemente asumidos con base en buen sentido o experiencia anterior. Es el caso, por ejemplo del coeficiente de descarga, que en verdad nunca es homogéneo a lo largo de una cuenca de drenaje, pero que es utilizado con un valor único en el cálculo. De igual forma, la ecuación de Stokes supone que las partículas sean esféricas, lo que es particularmente falso en el caso de las partículas más finas de arcilla, que tienen forma laminar.

Algunas recomendaciones de orden práctico deben ser seguidas para una sedimentación eficiente:

- (a) usar un factor de seguridad 1,5 en el dimensionamiento de la cuenca;
- (b) sin importar la profundidad de la cuenca, el volumen de la misma debe ser tal que permita un tiempo de residencia de por lo menos 24 horas;

- (c) se debe evitar que se produzca alta velocidad del afluente, que puede volver a colocar en suspensión partículas ya sedimentadas; en este caso, es necesaria la instalación de disipadores de energía en la alimentación de la cuenca.

Existen dos modos básicos de operación de cuencas de decantación, que son: promover su no colmatación periódica o aumentar la altura de la represa. Las represas de contención son generalmente represas de tierra de pequeña altura que pueden construirse, por ejemplo, con los estériles de la mina. Se debe observar en su construcción los criterios geotécnicos para cualquier represa de tierra, siendo ideal que ellas tengan un filtro drenante.

### 3.5. Sedimentación con auxilio de agregantes

Las partículas de arcilla, además de dimensión reducida, son laminares y se comportan de forma coloidal. Son portadoras de cargas negativas, lo que las lleva a repelerse mutuamente. Para promover su decantación, se emplea productos químicos que promueven su aglomeración, aumentando de este modo su diámetro. Ensayos de laboratorio ayudan a indicar la dosis de coagulante necesaria, que normalmente tiene que ser ajustada a las condiciones reales de operación.

Los agregantes pueden ser de distintos tipos, como los coagulantes, los floculantes y los aglomerantes. Los coagulantes son electrolitos como el sulfato de aluminio, el sulfato de cobre y la cal hidratada. Los floculantes son polímeros de cadenas largas que también atraen eléctricamente las partículas y sedimentan. Se encuentra en el mercado distintas marcas comerciales. En cuanto a los coagulantes son substancias formadas por cadenas hidrocarbónicas (grasas).

### 3.6. Seguimiento

Es muy difícil y caro eliminar un gran porcentaje de las partículas sólidas presentes en las aguas de drenaje. Las aguas naturales, además, transportan cantidades variables de sedimentos dependiendo de la naturaleza de los terrenos que atraviesan, de la cobertura vegetal y de las formas de uso del suelo de la cuenca de drenaje. De esta manera, los efluentes de una cuenca de decantación generalmente presentan una determinada cantidad de partículas sólidas, que pueden ser básicamente de dos tipos, sedimentables y en suspensión.

La reglamentación federal sobre calidad de las aguas (Resolución CONAMA 20/86) permite el lanzamiento de efluentes líquidos que contengan hasta 1 ml/l de sólidos sedimentables medidos en prueba de 1 hora en cono de Imhoff. Se trata de un cono invertido de vidrio graduado donde la muestra de agua es dejada en reposo con el cono apoyado en un trípode. Pasada una hora un determinado volumen de sedimentos se debe haber acumulado en el fondo del cono y la lectura puede hacerse directamente en la escala graduada. Tiene la misma finalidad que una probeta de laboratorio, pero la forma cónica facilita la lectura de tenores tan bajos como 1 ml/l. La determinación puede ser hecha fácilmente en el campo dejándose el cono en reposo sobre un trípode.

La medida de sólidos en suspensión puede hacerse a través de un ensayo específico o indirectamente midiéndose la turbidez del agua, lo que da una indicación de la cantidad de sólidos presentes. No hay patrón de emisión para turbidez. No obstante, la clasificación de los cuerpos de agua establece los límites máximos de turbidez para los varios tipos, por ejemplo 40 UNT (unidad nefelométrica de turbidez) para aguas de clase 2 y 100 UNT para aguas de clase 3. Existen turbidímetros portátiles de fácil empleo en el campo.

## 4. DRENAJE ACIDO

El drenaje ácido de minas, pilas de estéril y de desechos es uno de los más graves problemas ambientales de la explotación minera. La presencia de minerales sulfurados en contacto con el agua produce ácido sulfúrico presente en las aguas de drenaje, que puede presentar un pH extremadamente bajo, alcanzando el valor de 2,0.

Varias regiones mineras del mundo presentan problemas de drenaje ácido, a ejemplo de la cuenca carbonífera de Santa Catarina y de la provincia uranífera de la Meseta de Poços de Caldas. El problema en verdad no es producto solamente de la explotación minera, aunque sea en esta actividad que se muestra de manera más conspicua; se ha hablado no sólo de drenaje ácido de minas, sino de drenaje ácido de roca, que puede resultar de cualquier movimiento de roca que exponga a los efectos del aire o del agua minerales de sulfuro, como en el caso de obras civiles.

La acidez proviene de reacciones de oxidación de los sulfuros, en presencia de agua o aire, reacción que es catalizada por bacterias como *Thiobacillus ferrooxidans*. Además de representar un grave problema ambiental por el simple hecho que las aguas ácidas alteren profundamente las características químicas de los cuerpos de agua receptores, contaminándolas y causando impactos en los ecosistemas acuáticos, la acidez de las aguas también causa la solubilización de diversos metales, que en función del pH reducido pueden estar presentes en concentraciones muy por encima de la admisible en los cuerpos de agua y concentrarse de inmediato en los sedimentos o en los organismos.

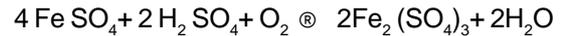
#### 4.1. El proceso de formación de drenaje ácido

Se cree que el proceso básico de formación de drenaje ácido se produce en tres etapas, incluyendo diferentes reacciones químicas. Las pilas de estéril y las cuencas de desecho son lugares privilegiados para la generación de drenaje ácido, debido a la presencia de partículas recientemente fragmentadas (por el desmonte de roca o por el proceso de fragmentación en el circuito de beneficiamiento) con gran superficie específica. Además de ello, esas pilas se presentan poco compactadas, o sea con gran permeabilidad, lo que facilita la percolación de agua de lluvia o de escurrimiento superficial, favoreciendo la oxidación de los sulfuros.

- (a) la primera etapa es la oxidación de los sulfuros, aquí representado por la pirita, el mineral de sulfuro más común; esta oxidación puede darse en presencia de aire o de agua:



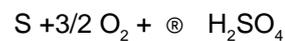
- (b) sulfato ferroso, en presencia de ácido sulfúrico y oxígeno, se puede oxidar y producir sulfato férrico (soluble en agua). Cuando el pH se reduce en el microambiente en torno de los minerales sulfurados, la población de la bacteria acidofílica *Thiobacillus ferrooxidans* comienza a crecer, lo que provoca una caída todavía mayor en el pH:



- (c) el ion férrico se combina con el radical hidroxilo, produciendo hidróxido férrico, que es insoluble en ácido y precipita:



pero el ion férrico también puede reaccionar con la pirita y producir más ácido:



#### 4.2. Previsión de drenaje ácido

La presencia de minerales sulfurados, especialmente la pirita es el primer indicador del potencial de generación de drenaje ácido de una roca. Entretanto, en algunas ocasiones, la presencia de carbonatos podrá inhibir la generación de ácidos, neutralizándolos. Ferguson y Erickson (1989) indican cuatro métodos de previsión:

- (i) comparación con otras minas en funcionamiento o paralizadas, existentes en la región o con las mismas condiciones geológicas;
- (ii) modelos paleoambientales y geológicos, que tienen por fin identificar los minerales presentes y sus formas de producción; por ejemplo, piritas formadas en ambientes marinos o salobres parecen tener una mayor tendencia a generar drenaje ácido que las piritas formadas en ambientes de agua dulce;
- (iii) pruebas geoquímicas estáticas: fueron desarrollados algunos ensayos que, a partir de una muestra de roca, permiten determinar el potencial de generación de drenaje ácido a través de una comparación de cantidad de sulfuros potencialmente generadores de ácidos con la cantidad de carbonatos neutralizantes; el cuadro 9 muestra una de esas pruebas;
- (iv) pruebas geoquímicas dinámicas, que intentan modelar cuantitativamente los procesos de producción y consumo de áci-

do; actualmente esas pruebas tienen larga duración y alto costo, lo que ha limitado su empleo en comparación con las pruebas estáticas.

**Cuadro 9 - Prueba British Columbia para drenaje ácido**

(1)	la muestra de roca fragmentada es colocada en un erlenmeyer de 250 ml conjuntamente con 70 ml de cultivo de <i>Thiobacillus</i> en pH de 2,2 a 2,5
(2)	el frasco es colocado en un vibrador giratorio a 35°C en una atmósfera enriquecida con CO <sub>2</sub>
(3)	el pH es controlado y se agregan muestras adicionales
(4)	si el pH aumenta substancialmente entonces la muestra no es productora de ácido
(5)	si el pH permanece bajo entonces la muestra es potencialmente generadora de ácido

Fuente: Ferguson y Erickson (1987)

### 4.3. Control de drenaje ácido

Así como el proceso de formación, también las técnicas de abatimiento de drenaje ácido han sido objeto de intensa investigación desde la década del 80. Como en la mayoría de los otros problemas de contaminación, la mejor solución es la prevención. Para ello es preciso que la planificación de la mina tome en consideración este factor, de manera de incorporar soluciones desde la fase del proyecto.

Las soluciones preventivas parten inicialmente de la identificación del potencial generador de drenaje ácido. Una buena investigación geológica asociada a pruebas hechas de antemano puede identificar sectores del macizo rocoso más favorables para la generación de ácidos -tal es el caso en yacimientos sedimentarios, donde determinadas capas pueden tener potencial de generación de ácidos y otras no. Si una situación como ésta se presenta, el proyecto de la mina podría contemplar la explotación selectiva

y la disposición por separado de esos materiales, eventualmente una disposición confinada entre capas impermeables en los moldes de lo que se hace con residuos industriales.

En la mina Mount Milligan en Canadá, se recogieron más de 4000 muestras de roca durante la realización de sondeos de prospección con una malla de 100 x 100 m, o sea, los mismos datos levantados para ubicar el yacimiento son también empleados para el planeamiento ambiental. Además de los análisis de tenores de minerales también se empleó un método estático para evaluar el potencial ácido. Junto con un intenso programa de análisis de muestras superficiales y subterráneas de agua (38.000 análisis), estos estudios indicaron la mejor forma de deposición de los estériles y de los desechos de manera de reducir la formación de ácidos (Robertson, 1994). Hoy en día ya existen softwares (sistemas especialistas) para la planificación del muestreo con la finalidad de estudiar el potencial de drenaje ácido.

La disposición subacuática es otra solución que viene siendo intensamente investigada. En Canadá ya hay lugares experimentales en los que desechos sulfurados son dispuestos en cuencas inundadas permanentemente, lo que impide la oxidación debido a la falta de suministro de oxígeno del aire, o sea, el material que contiene sulfuros permanece en condiciones anaerobias.

En igual sentido se ubican las tentativas de reducir la generación ácida por colocación sobre el material que contiene sulfuros de una capa de materia orgánica como lodos del tratamiento de aguas usadas, compost, turfa. En este caso el oxígeno del aire es consumido en la oxidación de la materia orgánica. También ya existen bactericidas comerciales utilizados para inhibir la formación de drenaje ácido. Esos productos comerciales contienen surfactantes, que destruyen la película de grasa que protege las bacterias. De esta forma el propio ácido que produjeron las ataca. Los bactericidas pueden ser aplicados en forma de spray o en forma sólida en una matriz de polímero, de modo de liberar lentamente el producto activo. (Rastogi, 1995). Un método más antiguo y de resultados no siempre satisfactorios es la adición de material alcalino (como la cal) entre capas sucesivas de estériles en las pilas.

Una medida preventiva pero que también encuentra aplicación en minas ya existentes es la implantación de un sistema de drenaje en el área de la mina, de las pilas de estéril y de los lugares

res de disposición de desechos. La estrategia aquí es minimizar la cantidad de agua en contacto con rocas generadoras de ácido y por ende el caudal de agua acidificada a ser tratada o arrojada en el curso de agua receptor.

La medida correctiva más empleada es la neutralización de los efluentes líquidos a través de la adición de cal. Esta medida, al aumentar el pH, hace disminuir la solubilidad de los metales que por ende se precipitan. El lodo así formado es un residuo sólido que debe ser debidamente manipulado. La neutralización es una medida de alto costo y de duración indeterminada. En efecto, es muy común que minas desactivadas continúen generando drenaje ácido, un proceso que puede durar décadas inclusive siglos. Ensayos de minimización de este problema han sido hechos en los Estados Unidos y consisten en hacer pasar los efluentes ácidos por un área húmeda semejante a un pantano artificial (constructed wetlands). Estos humedales artificiales son un sistema de bajo costo que busca reproducir condiciones naturales, o sea, los ambientes reductores típicos de los pantanos y ya son utilizados en escala industrial en diferentes minas en América del Norte, Sudáfrica y Australia.

## BIBLIOGRAFIA

- AGUIRRE JR., J. C. 1979. A sedimentação no controle da poluição por atividades mineradoras. *Anais. Seminário sobre técnicas exploratórias em geologia*, II, Gravatal (SC), DNPM, Brasília.
- FERGUSON, K. D. Y ERICKSON, P. M. 1987. Will it generate AMD? An overview of methods to predict acid mine drainage. En: Environment Canada, *Proceedings. Acid Mine Drainage Seminar/Workshop*, p. 215-244, Halifax.
- LA RIVIERE, J. W. M. 1989. Threats to the world's water. *Scientific American*, 261(3):80-94.
- LYLE JR., E. S. 1987. *Surface mine reclamation manual*. Elsevier, New York, 268 p.
- RASTOGI, V. 1995. ProMac: Bacterial Inhibition. *Mining Environmental Management* 3(2):27-29.
- ROBERTSON, J. 1994. Mount Milligan Watershed. *Mining Environmental Management* 2(1):6-8.
- SOUSA PINTO, N. L. et al. 1976. *Hidrología Básica*. Edgard Blücher, São Paulo.

