

Técnicas para el Control de Sedimentos

Temario:

Técnicas físicas

Otras técnicas

Ejercicios prácticos

Objetivo 3: Metodologías de Control de Sedimentación para Explotaciones Mineras a Cielo Abierto.

Técnicas físicas

Sistemas de drenaje (Sánchez, 1995)

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 objeto el control de la erosión, la minimización de la colmatación y la manutención de la calidad física y química de los cuerpos receptores.

Criterios hidrológicos

Un sistema de drenaje debe ser capaz de funcionar satisfactoriamente todo el año, 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.

Las lluvias se distribuyen desigualmente en el espacio y en el tiempo. Las lluvias también varían significativamente en el curso del tiempo. De un año a otro la variación puede ser grande. Sin embargo, lo que más preocupa 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, la cantidad de lluvia por unidad de tiempo (mm/h) es llamada intensidad pluviométrica y es el parámetro empleado en el dimensionamiento.

Existen otros factores que influyen en el dimensionamiento de un sistema de drenaje. 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.

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

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

donde:

Q: caudal (m³ / s);

C: coeficiente de descarga (no dimensional);

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

A: área de la cuenca de drenaje (km²).

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

El caudal obtenido dependerá del tipo de precipitación adoptada. Es necesario recordar, que presentan interés en el dimensionamiento de sistemas de drenaje los caudales pico o más altos. El período de retorno deberá adoptarse en función del tipo de obra. Evidentemente no tiene sentido dimensionar una cuenca de decantación en una mina, que tiene una vida útil limitada, por lluvias 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.

Diques y canales

El control y canalización de las aguas de escorrentía en las operaciones mineras es un problema resuelto, particularmente, mediante diques y canales excavados. Algunas de las funciones de estas obras son:

- Evitar el paso de las aguas a áreas fuertemente erosionables, o en operación y conducirlos de forma adecuada.
- Reducir la longitud de los taludes para complementar la resistencia a la erosión aportada por la vegetación.
- Impedir las acumulaciones de agua en superficies irregulares y/o cóncavas.
- Eliminar la llegada de las aguas a zonas con edificaciones o instalaciones mineras, y
- Proteger las tierras bajas frente a la depositación de sedimentos.

Previo al estudio hidráulico de estas obras, es preciso establecer su naturaleza, es decir los materiales de las paredes y techo, así como su sección o forma geométrica en sentido perpendicular al flujo.

En cuanto a su naturaleza, los canales pueden ser construidos sobre los propios estériles, en tierra, encespedados, en piedra, hormigón, entre otros. En función de las características de estos materiales se define la velocidad máxima de circulación que garantiza, por un lado, la inexistencia de problemas de erosión y por otro, evita la depositación de sedimentos. La velocidad mínima aconsejable es de 0,25 m/s y las máximas admisibles se indican en la siguiente tabla:

<i>Tipo de revestimiento</i>	<i>Velocidad admisible (m/s)</i>
Hierba bien cuidada en cualquier clase de terreno	1,80
Terreno parcialmente cubierto de vegetación	0,6 – 1,20
Arena fina o limo (poca o ninguna arcilla)	0,30 – 0,60
Arena arcillosa dura	0,60 – 0,90
Arcilla dura muy coloidal	1,20
Arcilla con mezcla de grava	1,20
Grava gruesa	1,20
Pizarra blanda	1,50
Mampostería	4,50
Hormigón	4,50

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990).

Si la pendiente de los canales da lugar a velocidades de circulación mayores que las admitidas, se recomienda el revestimiento vegetal de dichas obras con el fin de que ésta actúe como retardador. Además del criterio hidráulico, en la elección de las especies vegetales intervendrán otros criterios de tipo ecológico, climático y edáfico de la zona.

Las pendientes de los canales colectores, en casi todas las ocasiones, vendrán condicionadas por la propia topografía de la zona restaurada. La siguiente tabla muestra las pautas recomendadas a seguir para terrazas de desagüe.

Longitud de terraza (m)	Pendiente máxima (%)
30 o menos	2
31 a 60	1,2
61 a 150	0,5
151 a 365	0,35
366 o más	0,3

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990).

Las pendientes mínimas para canales de desagüe general serán las siguientes:

- Canales revestidos: 0,2 %
- Canales sin revestir: 0,5 %
- Siempre que se pueda, se procurará llegar al 1 % de pendiente.

En lo referente a los tipos de sección transversal la elección dependerá del caudal, de la velocidad máxima de circulación de agua, e indirectamente de la maquinaria minera disponible para la construcción de los mismos. Las secciones más empleadas son:

- Triangulares.
- Trapezoidales.
- Parabólicas.

El cálculo hidráulico de la sección mínima del canal se basa en dos expresiones básicas que son, por un lado:

$$S_{min} = Q / V_{máx}$$

donde:

S_{min} : sección mínima teórica (m²).

Q: Caudal máximo previsible en la sección de desagüe (m³ / s).

$V_{máx}$: velocidad máxima admitida (m / s).

Y la ecuación de Manning:

$$V = (1/n) * R^{2/3} * i^{1/2}$$

donde:

V: velocidad del agua (m / s).

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

i: pendiente longitudinal del canal (m / m).

n: número de Manning.

R: radio hidráulico (m).

El radio hidráulico de un canal o dique es la relación existente entre el área mojada y el perímetro mojado. El número de Manning, según el tipo de revestimiento se indica en la siguiente tabla:

Número de Manning	
Tipo de revestimiento	n
Tierra ordinaria con superficie uniforme	0,02
Hierba (altura de la lámina de agua superior a 15 cm)	0,04
Hierba (altura de la lámina de agua inferior a 15 cm)	0,06
Hierba espesa	0,10
Encachado de piedra, rugoso	0,04
Encachado de piedra, liso	0,02
Hormigón rugoso	0,024
Hormigón liso	0,012

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990).

Independientemente de que debe efectuarse un cálculo hidráulico riguroso, algunos criterios generales que pueden seguirse en la construcción de los canales son los siguientes:

- Su localización debe determinarse considerando las condiciones de descarga, la topografía, los usos del terreno, los tipos de suelos, los taludes y las áreas de drenaje.
- Según la zona que se pretenda proteger, se utilizarán para el diseño períodos de recurrencia de 10 a 50 años.
- Los aliviaderos laterales se construirán situándolos al menos 15 cm por encima.
- Las anchuras de los canales para el diseño máximo serán como mínimo de 1,2 m.
- Los taludes no serán inferiores de 2H : 1V¹.
- Tanto el cordón de material situado aguas abajo como el propio canal se está excavado en el terreno podrá revegetarse 15 días antes de la instalación.
- Periódicamente se revisarán y si fuese necesario, se retirarán los sedimentos depositados.

El segundo tipo de obras de desagüe son los diques. Se trata de estructuras construidas con los propios estériles de las minas con el objetivo básico de la canalización de las aguas hasta las balsas de decantación. Los tres tipos principales de diques son los siguientes:

- Diques de desviación.
- Diques de interceptación.
- Diques perimetrales.

Algunos criterios generales de diseño de estas obras son las siguientes:

¹ H: horizontal,
V: vertical.

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

- Los diques con pendientes mayores del 2 % deben ser estabilizados.
- El área drenada por cada dique no debe ser superior a las 2 ha.
- El espaciamiento medio entre diques debe ser, al menos el que se indica en la tabla siguiente:

Espaciamiento medio entre diques	
Talud por encima del dique (%)	Distancia entre diques (m)
10	45
5 – 10	60
5	90

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990).

- La vida útil de los diques es limitada y por lo general, no es superior a los 2 años.
- El material de construcción debe ser adecuadamente compactado formando taludes laterales 2H : 1V.
- Los diques pueden ser revegetados mediante siembra y utilizando mulches 15 días de su instalación.
- La altura mínima debe ser de 50 cm y la anchura de coronación al menos de 60 cm.

Dimensionamiento de canales

Los canales 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 trapezoidales y pueden o no estar revestidas.

El caudal proporcionado por un canal es dado por la siguiente expresión:

$$Q = V * A$$

donde: V: velocidad del agua (m / s) y A: área de la sección mojada (m²).

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];

S: gradiente de la sección longitudinal del canal (%).

El perímetro mojado es el perímetro de la sección transversal del canal que estará en contacto con el agua en el caso de flujo máximo.

Existen cuadros que contienen los valores tabulados para los coeficientes de rugosidad y de valores máximos de velocidad del flujo que deben ser observados para evitar erosión de los canales que no poseen revestimiento, en función del gradiente.

Coefficientes de rugosidad típicos	
<i>Tipo de canal</i>	<i>Coefficiente de rugosidad</i>
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, resto, 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) citado por Sánchez (1995).

Valores máximos de velocidad de flujo para evitar erosión

<i>Tipo de fondo</i>	<i>Velocidad máxima (m / s)</i>	<i>Inclinación (%)</i>
Arcillo – arenoso	0.75	0.5
Arcillo – limoso	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) citado por Sánchez (1995).

De esta manera, conociéndose el caudal máximo a drenar por los canales (obteniéndose a partir de la fórmula racional), la fórmula de Manning permite el cálculo de la sección transversal del canal y la determinación de la necesidad o no de revestimiento. Entre algunos tipos de revestimiento tenemos: mezcla con piedra común, cemento (hormigón) y tuberías.

Teniéndose en mente la recuperación del área degradada y su uso futuro, los canales sin revestimiento son mejores, pues representan una menor interferencia paisajística, dependiendo del uso futuro previsto y del lugar de la mina en que éstas serán instaladas.

Protección de canales

Estas protecciones se emplean para evitar en lo posible la erosión del fondo y los cajeros de los canales cuando las velocidades que alcanza el agua son altas. Los tipos de revestimientos que más se utilizan son: la hierba, la grava, la escollera y el hormigón. Los tres primeros son los más económicos, pero el hormigón es el más efectivo. La reducción de la energía del agua se

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

consigue en los canales con las irregularidades y rugosidades de las superficies que presentan los materiales empleados.

En el revestimiento de los canales deben observarse las siguientes recomendaciones:

- Si no se reviste de hierba, retirar todos los arbustos, raíces y materia orgánica de la traza de los canales.
- Mantener las pendientes y secciones calculadas en todos los tramos de los canales.
- Compactar los materiales en las zonas de relleno.

Dimensiones para las cuencas de sedimentación

Las cuencas de sedimentación son necesarias aunque un buen sistema de drenaje se haya implementado en la mina. Durante la vida útil de la empresa siempre habrá superficies expuestas a la acción de las aguas y del viento y por ende suministrando material transportado aguas abajo. Una mina puede tener varias cuencas de sedimentación de diversas capacidades. 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 microcuenca hidrográfica es usualmente necesario disponer de por lo menos una cuenca de sedimentación en cada cuenca hidrográfica.

La función de una cuenca de sedimentación 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 puede 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 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 gravedad (= 981 cm / s²);

μ : viscosidad de fluido (cm² / s);

s : densidad de la partícula (2,65 para cuarzo);

D : diámetro de la partícula, supuesta esférica (cm).

La viscosidad del agua, depende de la temperatura y está tabulada en el siguiente cuadro. Los diámetros adoptados dependerán de la granulometría del material transportado, al igual estos están tabulados de acuerdo a las dimensiones de las principales fajas granulométricas.

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

Viscosidad Cinemática del Agua	
<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Viscosidad (cm² / s)</i>
0	0.01792
5	0.01519
10	0.01308
15	0.01141
20	0.01007
25	0.00897
30	0.00804

Fuente: Lyle (1987) citado por Sánchez (1995).

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

$$t_r = vol / Q$$

Intervalos granulométricos	
<i>Granulometría</i>	<i>Diámetro (cm)</i>
Arena gruesa	0.02 a 0.2
Arena fina	0.002 a 0.02
Limo	0.0002 a 0.002
Arcilla	< 0.0002

Fuente: Sánchez (1995).

La velocidad de sedimentación, suponiendo que no hay movimiento horizontal de las partículas (aproximación razonable para superficies suficientemente grandes) será el coeficiente entre la profundidad de la cuenca p y el tiempo de residencia t_r :

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

sustituyendo el tiempo de residencia y llamando A_{sed} al área de la cuenca de decantación:

$$V_{sed} = \frac{p}{t_r} = \frac{p}{vol / Q} = \frac{p}{(A \cdot p) / Q} = \frac{Q}{A}$$

y por lo tanto:

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

de manera que, el área de la cuenca de decantación es el cociente del caudal afluente por la velocidad de sedimentación y no dependen de la profundidad de la cuenca.

A través del procedimiento anterior se puede dimensionar una cuenca de sedimentación. Si embargo, si las partículas fueren muy finas, el tiempo de sedimentación 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

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

hídricas. Para estos casos se hace necesario promover la precipitación de las partículas con ayuda de un agregante, el cual es un compuesto químico que tiene la función de promover la agregación de partículas finas. 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. Los coagulantes son sustancias formadas por cadenas hidrocarbónicas (grasas).

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

- Usar un factor de seguridad 1,5 en el dimensionamiento de la cuenca;
- 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;
- 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.

Procedimiento para el diseño de cuencas de sedimentación

El diseño de lagunas de sedimentación individuales o en circuitos, para explotaciones mineras donde haya producción de sedimentos, mediante el seguimiento de las siguientes pautas evitando así el aporte en el rango máximo posible de sedimentos en suspensión hídrica a los cauces naturales (Piña, 2002):

- Se necesita conocer las características del material a remover: contenido de arenas y arcillas, porcentaje de cada componente del material.
- Temperatura del ambiente en el cual se trabaja, para determinar la viscosidad cinética.
- Topografía de la zona donde se realizará la obra y el régimen hidráulico.
- Tiempo máximo de residencia de las aguas en la laguna, para ello se necesita conocer las características de los materiales, con la finalidad de determinar la velocidad de decantación.
- Caudal de material: agua y sedimentos, que van a ingresar en la laguna diariamente, semanalmente o mensualmente, para diseñar una laguna o secuencia de lagunas.
- Factor de seguridad, debe ser al menos de 1,5.
- Tiempo de residencia, de las aguas no debe ser menor de 24 horas.
- Diseño que permita albergar los sedimentos que se produzcan en al menos tres años, con el caudal calculado anteriormente.

Ubicación y tamaño de las cuencas de sedimentación

Las cuencas o balsas de sedimentación son las últimas estructuras que se disponen en la cadena de la erosión. Sus funciones son: retener las aguas durante un período de tiempo suficiente que permita clarificarlas al decantarse los sólidos que arrastran en suspensión y posibilitar el almacenamiento de esos materiales hasta que se realice la limpieza de dichas estructuras.

Las balsas que más se utilizan son de dos tipos: las excavadas en el propio terreno, con o sin revestimiento y las construidas como pequeñas presas de tierra.

La ubicación de estas estructuras suele elegirse aguas abajo y en las proximidades del área donde se realizan las actividades extractivas o el vertido de los estériles. Se debe procurar que la

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

interferencia con esos trabajos sea mínima y que exista un buen acceso a las balsas para realizar las labores de mantenimiento y limpieza.

En cuanto a la capacidad de las balsas, ésta debe ser tal que permita retener un determinado porcentaje de los sólidos en suspensión y simultáneamente, un volumen suficiente para su almacenamiento durante cierto período de tiempo. Guy (1979), op. cit. Rodríguez y Ayala (1990), recomienda un volumen de diseño capaz de albergar los sedimentos producidos durante 3 años, estimándose estos a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (citada en el Objetivo 1) o cualquier otro método empírico; o 300 m³ por cada hectárea de terreno afectada que se drena y un volumen mínimo de 100 m³, si se demuestra que la eliminación de sedimentos por otros sistemas de control es igual al volumen de almacenamiento reducido. Pueden emplearse mayores capacidades de almacenamiento cuando se desee reducir la frecuencia de las labores de limpieza.

Proceso de cálculo

El procedimiento a seguir en el cálculo detallado de la capacidad de las balsas es el siguiente:

- Se obtiene la distribución granulométrica de las partículas de sólidos en suspensión que pueden afluir a las balsas. La siguiente tabla muestra una clasificación granulométrica que puede considerarse:

Distribución granulométrica de sólidos en suspensión	
<i>Partícula de suelo</i>	<i>Intervalos de diámetros (mm)</i>
Arena muy gruesa	2 – 1
Arena gruesa	1 – 0,5
Arena media	0,5 – 0,25
Arena fina	0,25 – 0,10
Arena muy fina	0,10 – 0,05
Limo	0,05 – 0,002
Arcilla	< 0,002

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990).

- Se determina el tamaño medio de las partículas que han de depositarse en las balsas hasta alcanzar concentración en sólidos permitida para el vertido del efluente en un cauce exterior.
- Se calcula la velocidad de sedimentación de las partículas, en función del diámetro de estas. De acuerdo con la Ley de Stokes esta se determina con la expresión:

$$V_s = \frac{g}{18 * \mu} * (S - 1) * D^2$$

donde:

V_s: velocidad de caída de la partícula (cm / s);

g: aceleración de gravedad (981 cm / s²);

μ: viscosidad cinemática del fluido (cm² / s);

S: peso específico de la partícula;

D: diámetro de la partícula supuesta esférica (cm).

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

Las partículas más pequeñas que pueden decantarse en la práctica son las de limo (0,002 mm), que descienden unos 17 cm en 24 horas cuando el agua se encuentra a 0°C. Las partículas de arcilla pueden tardar en decantarse desde 30 horas incluso años.

- Se determina el caudal que llegaría a la balsa conociendo la superficie a drenar y la precipitación máxima esperada para un tiempo de retorno dado. Normalmente, se considera el caudal generado por la precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno de 10 años.
- Se calcula el área de la balsa:

$$A = Q / V_s$$

donde:

A: área de la balsa requerida (m²);

Q: caudal máximo que llega a la balsa (m³ / s);

V_s: velocidad crítica de sedimentación (m / s).

En la práctica, es frecuente la construcción de diferentes balsas en serie, mejor que una sola de mayor tamaño. Las razones por las que se utiliza esta disposición son las siguientes:

- El paso de agua de una balsa a otra mejora el tiempo de retención y consecuentemente, la eliminación de los sólidos de suspensión.
- La construcción de balsas pequeñas suele ser más fácil que la de una estructura grande.
- En caso de ser necesaria la limpieza de los lodos de una balsa, ésta se realiza con medios más convencionales cuando tienen dimensiones más reducidas.
- Los problemas de estabilidad son menores en las balsas pequeñas.

Escombreras

Lugar de disposición final para las rocas estériles, procedentes de las operaciones mineras a cielo abierto (en este caso), se han denominado escombreras.

Características de los estériles

Los materiales estériles que conforman las escombreras son de litologías distintas y granulometrías variables, por lo que se plantean problemas físicos y químicos, para la implantación de la vegetación. Generalmente, predominan los estériles en forma de fragmentos gruesos con una distribución espacial distinta dentro de los depósitos, como consecuencia de la segregación que sufren las partículas al ser depositadas dentro de las escombreras.

La granulometría, es otra de las propiedades físicas ha considerarse, además de la densidad, porosidad y la permeabilidad. Entre las propiedades químicas las más importantes son el contenido de metales tóxicos, el contenido en nutrientes, la salinidad, entre otros.

Consideraciones de diseño de escombreras (Rodríguez y Ayala, 1990)

Métodos constructivos

Los tipos de escombreras que pueden distinguirse de acuerdo con la secuencia constructiva de las mismas, en terrenos con pendiente que es el caso habitual, son cuatro:

- Con vertido libre,
- Por fases adosadas,
- Con dique de pie y

- Por fases superpuestas.

La formación de vertido libre sólo es aconsejable en escombreras de pequeñas dimensiones y cuando no exista riesgo de rodadura de rocas aguas abajo. Se caracteriza por presentar en cada momento un talud que coincide con el ángulo de reposo de los estériles y una segregación de tamaños muy acusada.

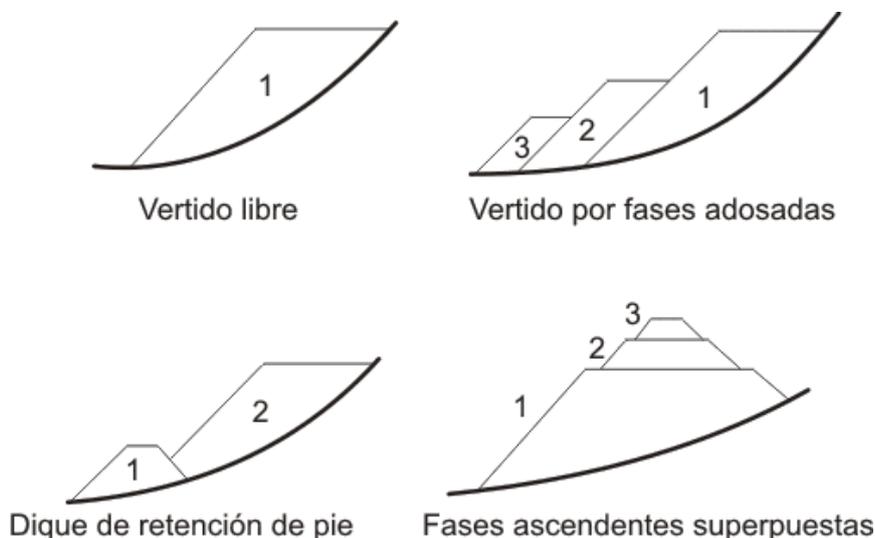
Las escombreras con fases adosadas proporcionan unos factores de seguridad mayores, pues se consiguen unos taludes medios finales más bajos. La altura total puede llegar a suponer una limitación por consideraciones prácticas de acceso a los niveles inferiores.

Cuando los estériles que se van a verter no son homogéneos y presentan diferentes litologías y características geotécnicas, puede ser conveniente el levantamiento de un dique de pie con los materiales más gruesos y resistentes, de manera que actúen de muro de contención del resto de los estériles depositados.

El tipo de fases superpuestas y retranqueadas aporta una mayor estabilidad, por cuanto se disminuyen los taludes finales y se consigue una mayor compactación de los materiales.

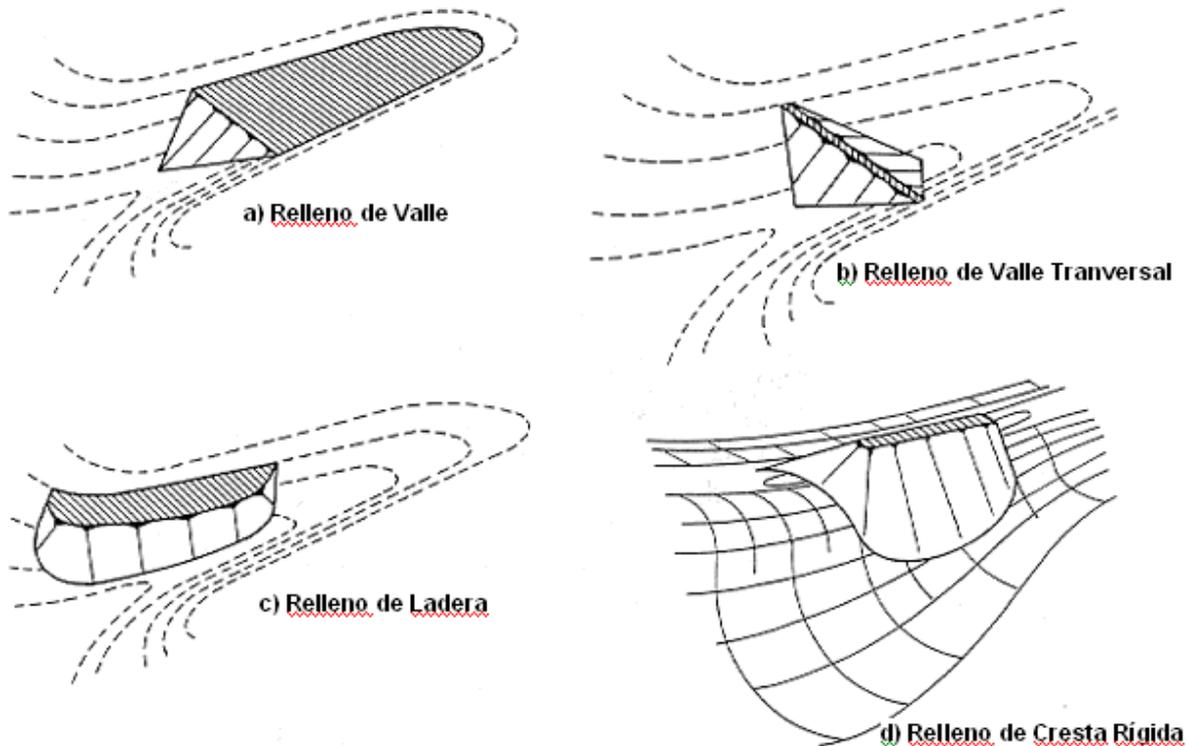
La secuencia constructiva de una escombrera incide directamente sobre la estabilidad de tales estructuras y sobre la economía de la operación.

En la siguiente figura observamos los distintos tipos de escombreras de acuerdo a su secuencia constructiva:



Fuente: www.textoscientificos.com/mineria/escombreras/tipos (consulta julio, 2007)

Tipos de escombreras de mina básicos, dependiendo de la topografía



Fuente: Curso "Diseño y Operación de Grandes Botaderos" (consulta, 2007). www.infomine.com

Normas para garantizar la estabilidad de las escombreras

Independientemente del tipo de escombrera, la primera norma a seguir consiste en la retirada de la vegetación y de los suelos del lugar de asentamiento. La descomposición de esa vegetación al cabo de cierto tiempo y la existencia de una capa de suelo constituyen una zona de rotura probable por la resistencia la corte que presentan.

Si existe agua estancada en la base de apoyo deberá ser drenada antes de verter los primeros estériles o si esto no es posible, rellenar dichas zonas con material de escollera. En zonas de surgencia de acuíferos se procederá a la captación y drenaje de las mismas con la doble finalidad de evitar el efecto de las presiones intersticiales del agua en las escombreras y conservar las fuentes y manantiales.

Si la surgencia es puntual, la captación se hace mediante una arqueta construida sobre el terreno explanado. Desde esta se suele sacar una tubería flexible (PVC) de entre 50 y 75 mm de diámetro y exteriormente un tubo metálico de acero corrugado, flexible y muy resistente, que permita adaptarse a los asentamientos del terreno. Con este sistema se puede ir depositando los estériles encima y al mismo tiempo ir acoplando los tubos necesarios durante el avance.

Si en cambio, las surgencias de agua son extensas debe disponerse de una red de zanjas o tubos drenantes conectadas a unos colectores. La construcción de la zanja de drenaje puede ser de tipo

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

"francés" que consiste en la colocación en el interior de la misma de material granular protegido por un geotextil o lámina filtrante. El esquema es la existencia de una cuneta general en el pie de la escombrera sobre la que se descarga el agua de drenaje a través de unos colectores principales en los que confluyen otros secundarios.

La cuneta general que rodea a las escombreras debe estar situada a unos metros de la base, para evitar el estancamiento del agua y socavación del pie del talud por la acción erosiva de ésta.

Condiciones para la estabilidad en escombreras de vertido libre

Si el material es depositado en la plataforma del vertedero e intermitentemente es empujado hasta el borde del talud se dificultará la diferenciación granulométrica y se crearán superficies planas compactadas y paralelas al talud general de avance, pudiendo actuar como potenciales planos de ruptura por la escasa resistencia al corte en dichas zonas.

El vertido por gravedad proporciona ángulos de reposo con coeficiente de seguridad (factor de seguridad) próximo a 1. Con el fin de garantizar las condiciones de estabilidad durante lluvias prolongadas, se recomienda mantener un talud general de unos 20°.

Los vertederos construidos por este método son más susceptibles a la erosión por las aguas de escorrentía, a pesar de mantener taludes inferiores, pues las superficies son largas e ininterrumpidas, sin bermas o terrazas intermedias, y los taludes no pueden protegerse con vegetación hasta que se completa la construcción del vertedero.

Un segundo método consiste en depositar y compactar los estériles en capas o tongadas, con lo que se aumenta notablemente la resistencia al corte y la capacidad del vertido, pues se reduce el efecto del esponjamiento.

Condiciones y criterios para la estabilidad en escombreras de vaguada

Se exponen algunas normas y recomendaciones acerca de diversas técnicas y reglamentos mineros internacionales, para la construcción de escombreras de vaguada con núcleo de drenaje y de escombreras de llanuras.

En términos con pendientes fuertes (> 20°) se recomienda el levantamiento de un dique de contención de sección trapezoidal con las siguientes dimensiones:

- Profundidad: aproximadamente 1,5 m en material consolidado.
- Taludes: 1,5 : 1.
- Ancho del fondo: superior a 3 m.

En vertederos con una capacidad inferior a 0,8 Mm³, este dique puede ser sustituido por una simple plataforma, son las siguientes dimensiones:

- Taludes: Mayores de 1,5 : 1.
- Anchura de fondo: superior a 3 m.

Para aumentar la eficiencia del drenaje se recomienda, en ciertos casos, que el dique de base se construya con bloques resistentes de arenisca. Pero cuando los ensayos de los suelos de base demuestran que la capacidad portante es suficiente, puede suprimirse el dique de contención.

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

En escombreras de más de 0,8 Mm³ de capacidad, el dique de contención puede complementarse con contrafuertes o estribos para reforzar la estabilidad de la masa de material vertido.

En todos los casos, además de los drenajes considerados como principales, se construirán otros secundarios o laterales, de acuerdo a las consideraciones de la siguiente tabla:

Tipo de estéril	Capacidad de la escombrera	
	< 0.8 Mm ³	> 0.8 Mm ³
Pizarras o similares	5 m x 2,5 m	5 m x 5 m
Areniscas o similares	2,5 m x 1,2 m	5 m x 2,5 m

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990).

La granulometría del material empleado en los drenajes debe ser tal que contenga menos del 10 % de bloques inferiores a 30 cm y no existir tamaños superiores al 25 % de la sección del drenaje. Tanto los drenajes principales como los laterales se diseñarán de acuerdo con la valoración de los factores geológicos y topográficos característicos del lugar.

El procedimiento para la colocación del estéril es el siguiente:

- Si el 65 % o más del material es arenisca puede ser vertido sin compactación, pero se nivelará según la cota del banco.
- Si el material contiene menos del 65 % de arenisca puede ser vertido en capas de 1,2 m compactándolo a continuación.
- En terrenos abruptos y de fuerte pendiente y siendo más del 90 % arenisca, los sistemas de drenaje se construirán basándose en la segregación natural que se produce en el vertido.

Cuando las escombreras son construidas por gravedad se recomienda compaginar el vertido de avance con el lateral, ya que de esta forma se evita la formación de planos diferenciados que pueden servir como posibles discontinuidades de deslizamiento o ruptura.

El material de relleno se dispondrá formando bancales con el fin de incrementar la estabilidad, para lo cual se recomiendan las siguientes dimensiones finales:

- Altura de banco: 15 m máximo.
- Anchura de berma: 6 m máximo.
- Pendiente de desagüe hacia el interior de las bermas: 3 – 5 %.
- Pendientes laterales de coronación: 3 – 5 %.
- Superficie de estabilización: revegetación coexistente con la construcción.

Todas las superficies de drenaje dispondrán de las pendientes adecuadas hacia ambos lados de la vaguada, dirigiendo las aguas hasta las zanjas construidas en roca inalterada. Estas zanjas estarán protegidas por escollera u otros materiales en las zonas de fuertes pendientes, con objeto de reducir la velocidad de circulación.

En las escombreras de llanuras construidas en retroceso y vertido en capas, las normas a observar son:

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

- Altura de banco: menor de 5 m.
- Altura de berma: no inferior a 5 m.
- Talud general: menor de 26° (2:1).
- Altura máxima de escombrera: 30 m si la humedad del material supera el 14 %.

En las escombreras de ladera se recomiendan los siguiente parámetros de diseño:

- Talud general: menor de 22° (2,5:1).
- Altura máxima de escombrera: 15 m.

En la base del vertedero se levantará un dique de escollera debidamente compactado, complementándolo con una tubería de drenaje del lado de aguas arriba.

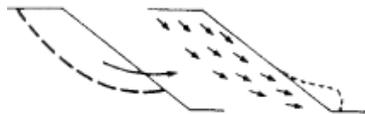
Estabilidad de escombreras. Cálculos

Los materiales vertidos en una escombrera se encuentran como fragmentos con unos tamaños muy pequeños, si se comparan con las dimensiones del depósito. Aunque inmediatamente después del vertido no existe ninguna trabazón entre las partículas, el paso del tiempo facilita los fenómenos de consolidación que se traducen en un aumento de la cohesión y de la resistencia al corte.

Las formas de inestabilidad son, según la posición de la superficie de rotura, superficiales si no afectan a la base de la escombrera o profundas si sucede lo contrario. Los tipos de rotura que se identifican de acuerdo con la geometría de las mismas son las siguientes:

- **Rotura circular:** se producen en depósitos en los que los materiales presentan unas propiedades geotécnicas homogéneas. En el manejo de materiales blandos o sueltos, como los que componen las escombreras, la falla ocurre a lo largo de una superficie que se aproxima a una forma circular (Castillejo, 1993).

Falla circular



Fuente: www.infomine.com/edumine

- **Rotura no circular:** es una superficie de rotura mixta que combina una sección circular y un deslizamiento. Se presenta en materiales con propiedades diferentes (taludes anisotrópicos).

Falla planar



Fuente: www.infomine.com/edumine

- **Rotura en cuña:** es típica de aquellos casos donde la base de apoyo no es lo suficientemente resistente para soportar el peso de los estériles.

Los métodos de análisis de estabilidad son muy diversos y la mayoría se basa en comparar las fuerzas que favorecen el movimiento de la masa de materiales a través de una hipotética superficie de rotura y las fuerzas resistentes estabilizadoras. Los cálculos se simplifican llevándose a cabo en secciones verticales, sin tener en cuenta las fuerzas resistentes que actúan en los extremos de la masa en movimiento.

Los datos básicos para un análisis de estabilidad son, además de la densidad del material depositado, la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

Las etapas para el cálculo del Factor de Seguridad «FS», se deben seguir las siguientes etapas:

- Se elige el tipo de escenario que es probable que se presente sobre la estructura a analizar. Existen cinco casos y cada uno de ellos posee un ábaco.
- Se calcula el valor adimensional:

$$c / (\gamma * H * \tan \phi)$$

siendo:

γ : la densidad del material;

H: la altura del talud;

c: la cohesión aparente y

ϕ : el ángulo de rozamiento interno.

- En los ábacos propuestos por Hoek y Bray (1981) se sigue c por medio del valor encontrado anteriormente hasta que se intercepte a la curva que corresponde el ángulo del talud.
- Se busca sobre los ejes vertical y horizontal los valores de « $\tan \phi / FS$ » y « $c / (\gamma * H * FS)$ », a partir de los cuales se calcula el valor de «FS» más conveniente.

Se podría decir que los cálculos de estabilidad de taludes finalizan siempre con la determinación del Factor de Seguridad. Si el valor obtenido está por debajo del exigido se procede a rediseñar geoméricamente la escombrera o a mejorar las condiciones de drenaje. Los valores mínimos exigidos son superiores en todos los casos a la unidad, ya que, por un lado, se requiere un margen para considerar la intensidad de riesgo en función de las condiciones del entorno, y por otro, es preciso considerar los posibles errores y desviaciones de los parámetros característicos de los materiales que se han obtenido con las muestras ensayadas (Rodríguez y Ayala, 1990).

Estabilización de escombreras

Si una vez construida una escombrera se observan movimientos del terreno o riesgo de que se produzcan, será necesario antes de implantar la cubierta vegetal o darle un uso a esos terrenos, adoptar una serie de medidas correctoras.

Existen diversos métodos para la estabilización de masas de estériles granulares, cuyo comportamiento puede asimilarse al de un suelo no cohesivo.

La solución más sencilla consiste en modificar la geometría de tales estructuras mediante el remodelado del talud, de manera que se logre reducir el momento de las fuerzas desestabilizadoras y mejorar el coeficiente de seguridad.

Una segunda medida consiste en el drenaje de las estructuras para evitar, por un lado, la erosión de los materiales en la superficie del talud y por otro lado, las presiones intersticiales y efectos desestabilizadores en el interior de los depósitos.

En los deslizamientos activos se recomienda el sellado de las grietas superficiales ya que pueden actuar como vía de entrada del agua. Esa operación se debe efectuar con materiales impermeables como la arcilla, cemento, entre otros.

Otro grupo de métodos es el denominado de contención, que consiste en la aplicación de una fuerza resistente complementaria mediante la construcción de una obra de fábrica. Estos muros y muretes actúan por su peso, pudiendo anclarse y encastrarse en el terreno. Los materiales que se utilizan normalmente son muy diversos, desde el hormigón en masa, la mampostería, la tierra armada, los gaviones, entre otros.

Existen los métodos de mejora de las características de los materiales, con los que se persigue aumentar la resistencia al corte de los mismos. Se pueden llevar a cabo mediante la inyección de sustancias que aumenten la cohesión de los fragmentos rocosos en zonas que no impidan el drenaje y por procedimientos mecánicos de introducción de refuerzos, barras de acero, carriles, micropilotes, etc., y anclaje incluso de estos a la roca firme. Todos estos tratamientos tienen una efectividad escasa, localizada y son costosos.

Luego de la estabilización de taludes, la revegetación posterior actúa no sólo como un método protector e integrador de estos en el medio ambiente, sino incluso como un sistema corrector de los materiales más superficiales, pues produce una desecación por efecto de la evapotranspiración, reduce la infiltración del agua y refuerza el terreno con las raíces.

Previo al extendido de la tierra vegetal, es necesario proceder al escarificado de las superficies por donde ha circulado la maquinaria minera, ya que el peso de ésta habrá dado lugar a una compactación de los materiales que impedirá en muchos casos la penetración y desarrollo de las raíces de las plantas. En las zonas en pendiente, si no se tratan las superficies, actuarán como planos de discontinuidad pudiendo producirse deslizamientos a lo largo de ellas.

Muros de Gaviones

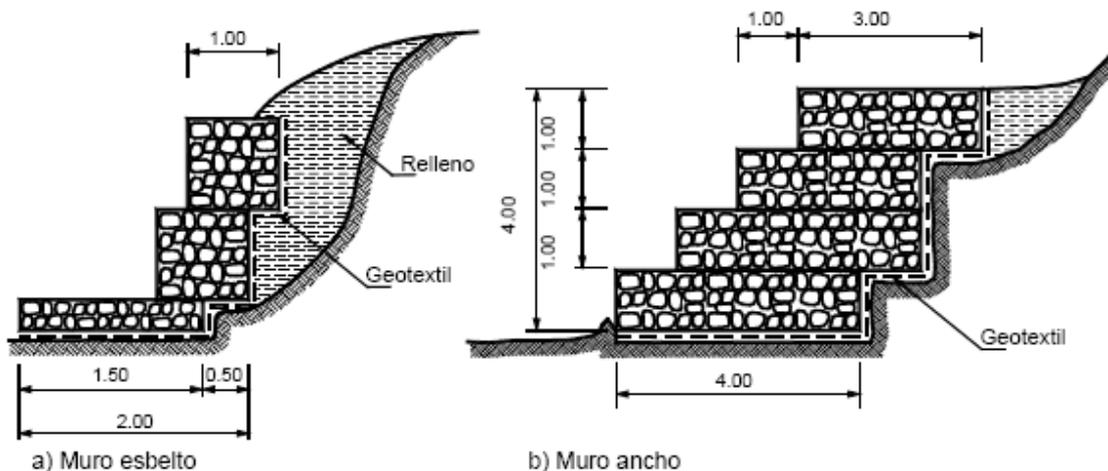
Suárez (1998) define los gaviones como cajones de malla de alambre galvanizado que se rellenan de cantos de roca. Castillejo (1999), los define como cestas en general, rectangulares de alambre galvanizado o recubierto con PVC, con diafragmas verticales del mismo material, rellenos de grava gruesa preferiblemente angulosa.

Mecánicamente, la cesta metálica al ser cerrada, trabaja limitando el cambio de volumen asociado a la deformación cortante del suelo matriz, que es la grava gruesa, causando un incremento apreciable de la presión intergranular y por ende de la resistencia al corte. Esto requiere para su

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

buen funcionamiento que la grava sea colocada lo más densamente posible, lo que implica generalmente una gran cantidad de mano de obra.

Diseños típicos de muros de gaviones



Fuente: Suárez (2001)

Los gaviones se utilizan preferiblemente como defensas en obras hidráulicas, dada su permeabilidad y su flexibilidad estructural general que le permite soportar grandes deformaciones causadas por la erosión de los márgenes y el fondo. Se utilizan también como muros de contención, colocándose en intrados escalonado lo que reduce tensiones.

Los gaviones representan una solución extremadamente válida, desde el punto de vista técnico y económico para la construcción de obras de contención, para cualquier ambiente, condición climática y aún en zonas de difícil acceso.

Ventajas

Algunas de las ventajas de las obras con muros de gaviones en resumen son las siguientes (Suárez, 1998 y Castillejo, 1999):

- Simples de construir y mantener.
- Utiliza los cantos y piedras disponibles en el sitio.
- Se puede construir sobre fundaciones débiles.
- Su estructura es flexible y puede tolerar asentamientos diferenciales mayores que otro tipo de muros y es fácil de demoler o reparar. Esto permite que la estructura se adapte a las deformaciones del terreno manteniendo su estabilidad y eficiencia.
- Elevada resistencia debido al gran peso de la obra, la fricción entre las piedras, su resistencia a la compresión y la elevada tensión de tracción que es soportada por la malla (con baja deformación).
- Permeabilidad adecuada que permite el drenaje de las aguas de infiltración eliminando el empuje hidrostático.

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

- La puesta en obra es extremadamente sencilla y económica y no requiere equipos ni mano de obras especiales. Puede ser usado como relleno canto rodado o piedra partida.
- El llenado puede ser realizado manualmente o con auxilio de equipo normal de obra.
- Se integra armónicamente al paisaje, permitiendo el desarrollo de vegetación sin que esto traiga inconvenientes, asegurándose por el avance de la naturaleza la estructura construida.
- Facilidad de construcción aún en ambientes áridos.
- Reducción de las capas filtrantes.
- Simplicidad y rapidez de colocación.
- Versatilidad, que permite la construcción de una estructura con parámetro externo vertical, inclinado o en gradones según las necesidades.
- Seguridad estructural, en caso de incendio en las proximidades de la estructura.

Desventajas

- Facilidad de rotura de las cestas por agentes externos naturales o por vandalismo. Las roturas se propagarán por rasgadura hasta la ruina del gavión interesado al estar la cesta sometida a tracción.
- Difícil evaluación de la durabilidad de la cesta, debido a los fenómenos de corrosión metálica y a los de envejecimiento y rotura mecánica de la capa protectora de PVC, en su caso.

El peso unitario del gavión depende de la naturaleza y porosidad de la roca de relleno y puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_g = (1 - n_r) * G_s * \gamma_w$$

donde:

n_r : porosidad del enrocado;

G_s : gravedad específica de la roca;

γ_w : peso unitario del agua.

Para diseños preliminares G_s puede asumirse igual a 2,6 en el caso de rocas duras. La porosidad del enrocado generalmente varía de 0,3 a 0,4 dependiendo de la angulosidad de los bloques de roca. Más adelante veremos algunos de los aspectos a tener en cuenta para el diseño de muro de gaviones.

Se emplean tres tipos de mallas diferentes, hexagonales o de triple torsión, electrosoldada y elaborada simple. El principal problema consiste en que las mallas pueden presentar corrosión en suelos ácidos (de pH menor a 6). Existen una gran cantidad de tamaños de malla disponibles para formar las cajas. Generalmente, se utilizan cajas de 2m x 1m x 1m. La forma básica es trapezoidal.

Aplicaciones de los muros de gaviones

Estructuras de Contención

Las estructuras de contención en gaviones combinan eficazmente las funciones de sostenimiento y de drenaje. Son de rápida construcción y permeables, por ser armados pero flexibles toleran los asentamientos sin fracturas.

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

Las excavaciones para fundaciones, costosas y muchas veces peligrosas, son innecesarias, siendo suficientes en general la regularización del terreno.

Protección para rellenos

Los taludes de los rellenos a menudo requieren un tratamiento con estructuras de contención como trabajo de protección. En estos casos encontramos la posible erosión normal del talud superficial y además el efecto erosivo de un curso de agua. En estos casos los elementos prefabricados de concreto son a menudo usados, pero resultan fácilmente dañados y además dejan muy poca oportunidad para el crecimiento de la vegetación. En contraste, el uso de colchones en revestimientos ha ofrecido una solución sobresaliente en una gran variedad de aplicaciones, gracias a su capacidad de acorazar el relleno y su posibilidad de ser cubierto por vegetación rápidamente.

Diseño de un muro de gaviones

El diseño para Suárez (1998) de un muro de gaviones debe consistir de:

- Diseño de la masa del muro para estabilidad a volteo y deslizamiento y estabilidad del talud. En el diseño debe tenerse en cuenta que para evitar deformaciones excesivas relativas, el muro debe proporcionarse en tal forma que la fuerza resultante actúa en el tercio medio de la sección volumétrica del muro.

El ángulo movilizando de fricción δ utilizando en el diseño no debe exceder $\phi'/2$ donde: ϕ' es el ángulo de fricción interna del relleno compactado detrás del muro. En el caso de que el muro se cimente sobre suelos compresibles δ igual a cero.

No existe un sistema de diseño universalmente aceptando para muros en gaviones y debe tenerse en cuenta que la gran deformación del muro puede generar una falla interna debida a su propia flexibilidad. Las deformaciones internas pueden ser de tal magnitud que el muro no cumpla con el objetivo para el cual fue diseñado.

- Diseño interno de la estructura del gavión.

El gavión debe tener un volumen o sección tal que internamente no se pueda producir su falla o rotura a lo largo de cualquier plano. Es importante analizar la estabilidad del muro independientemente nivel por nivel, suponiendo en cada uno de los niveles que el muro es una estructura de gravedad apoyada directamente sobre las unidades de gavión inmediatamente debajo de la sección considerada. En resumen, se deben realizar un número de análisis igual al número de niveles.

- Especificación del tipo de malla, calibre del alambre tamaño de las unidades, tipo y número de uniones y calidad del galvanizado, tamaño y forma de los cantos.

Se debe diseñar unión por unión la cantidad de alambre de amarre entre unidades. Se debe definir si la malla es de doble torsión electrosoldada o eslabonada y el calibre de alambre de la malla, la escuadría del tejido de la malla, el peso de zinc por metro cuadrado de superficie de alambre, el tipo de uniones entre unidades.

Objetivo 3: Conocer las diferentes técnicas para el control de la sedimentación

Es importante que en el diseño se incluya un dibujo de la forma como se amarran las unidades entre sí, para facilitar su construcción en forma adecuada. El tamaño máximo de los cantos debe ser superior a dos veces al ancho máximo de la escuadría de la malla. Generalmente, se utilizan cantos de diámetro entre 15 y 30 centímetros.

- Despiece de las unidades de gavión nivel por nivel.
Se debe diseñar el traslape entre unidades para darle rigidez al muro. Es importante dibujar planos de cada uno de los niveles del muro en gaviones para facilitar su construcción, de acuerdo al diseño.

- Sistema de filtro.
En el contacto entre el suelo y el gavión se recomienda colocar un geotextil no tejido como elemento de filtro y en la cimentación del muro se recomienda construir un dren colector para recoger el agua recolectada por el muro. Debe tenerse en cuenta que el muro de gaviones es una estructura permeable, la cual permite la infiltración de prácticamente el 100 % de la lluvia y la escorrentía que pase por encima del muro.

Revestimiento de canales

Es de importancia nombrar los Tipos de revestimiento de canales los siguientes:

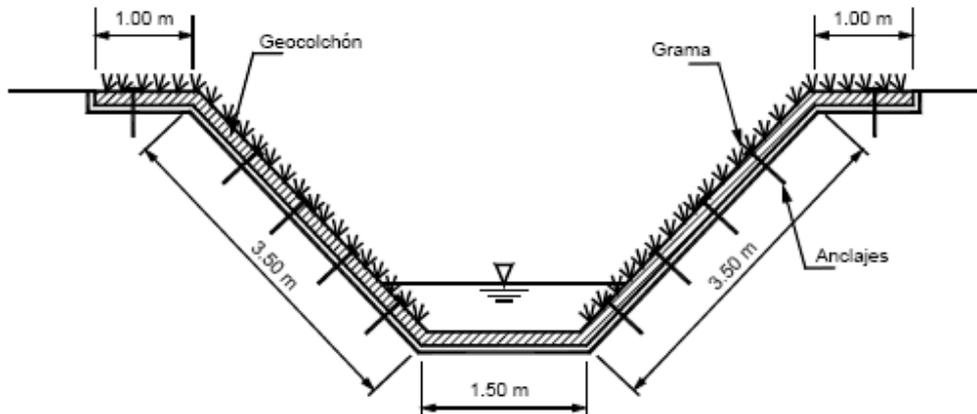
1. Revestimiento en seco.
2. Revestimiento bajo agua.
3. Revestimientos impermeabilizados.

Para los efectos de este curso, se explicará un poco acerca de su uso como revestimiento de canales de drenaje. El siguiente cuadro muestra la variación del revestimiento de canales de drenaje en gaviones y la velocidad de la corriente:

<i>Velocidad en m/s</i>	<i>Espesor en metros</i>
0,9 a 1,8	0,15
1,8 a 3,6	0,15 a 0,25
3,6 a 4,5	0,25 a 0,30
4,5 a 5,4	0,30 a 0,50

Fuente: Castillejo, 1999.

Ejemplo de canal revestido en grama reforzada



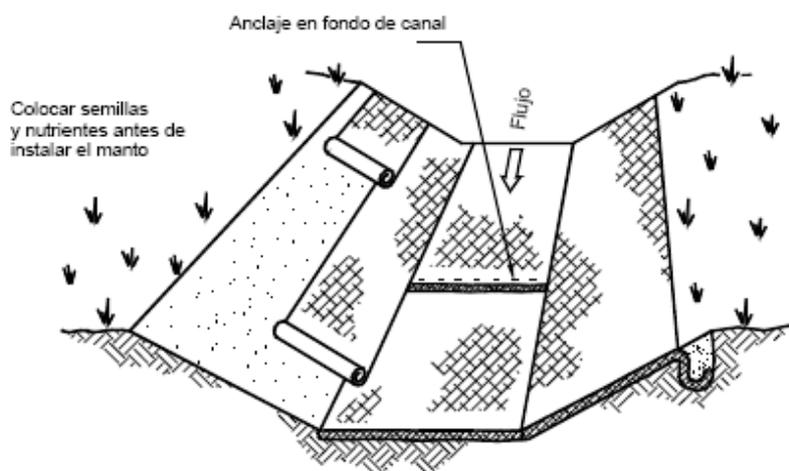
Fuente: Suárez (2001)

Geotextiles

Funciones

- **Separación:** impide la contaminación de los agregados seleccionados con el suelo natural.
- **Refuerzo:** todo suelo tiene una baja resistencia a la tensión.
- **Filtración:** permite el paso del agua a través de los poros, impidiendo que las partículas sólidas traspasen el geotextil.
- **Protección:** gracias al espesor de los geotextiles no tejidos, estos absorben los esfuerzos inducidos por objetos angulosos o punzantes, protegiendo materiales laminares como en el caso de las geomembranas.

Revegetalización de canales utilizando mantos sintéticos u orgánicos



Fuente: McCullah, 2001 citado por Suárez (2001)

Bibliografía del Objetivo 3

RODRÍGUEZ y AYALA (1990) “Manual de Diseño y Construcción de Presas”. Instituto Tecnológico Geominero de España.

CASTILLEJO, Miguel (1999) Apuntes para el curso profesional «Cálculos Geomineros». Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

CASTILLEJO, Miguel (1993) “Análisis Comparativo de los Métodos de Estabilidad de Taludes y su Control”. Parte II: Métodos de Estabilidad de Taludes. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Inédito.

SUÁREZ, Jaime (1998) “Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales”. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos. Bucaramanga. Colombia.

PIÑA, Aurora (2002) “Indicadores de Sustentabilidad en la Toma de Decisiones para Creación de Distritos Mineros, Aplicados a Minería Metálica: Au y Fe, en el estado Bolívar”. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Inédito.

SÁNCHEZ, Luis (1995) “Drenaje de Mina a Cielo Abierto”. Publicación «Aspectos Geológicos de Protección Ambiental», Volumen I. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Montevideo. Uruguay.

SUÁREZ, Jaime (2001) “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.

www.infomine.com/edumine