

Conceptos fundamentales en el control de sedimentos

Temario:

Identificar aspectos físicos que inducen a la necesidad de control de sedimentos

Ejercicio práctico

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

Propiedades de los materiales

Definición de suelo y de roca

Se dice que «roca» es un agregado natural de granos minerales unidos por grandes y permanentes fuerzas de cohesión; por otra parte, se considera «suelo» es un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que puede separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en el agua (Peck, et.al., 1983).

Los «sedimentos» por su parte son las partes del suelo que se encuentran transportadas o en proceso de transporte por diversos medios erosivos y que van cambiando su aspecto y características físicas a medida que avanzan alejándose de la fuente original, en un tiempo «t» hasta encontrar un lugar para su destino final temporal, como por ejemplo, una cuenca.

Composición y tamaño de las partículas de «suelo»

La «composición» se refiere a los materiales que hacen el suelo. Básicamente, son cuatro constituyentes: partículas minerales, materia orgánica, agua y aire. Las partículas minerales componen entre 50 y 80 % del volumen de los suelos y forma la más importante estructura – esqueleto del suelo (Marsh, 1991).

En cuanto a la «textura» del suelo: Marsh (1991) la define como el término usado para describir los tamaños de las partículas en un suelo. La ASTM propone la siguiente clasificación para los componentes del suelo que se puede ver en la siguiente tabla:

**Límites de Tamaños de los Componentes del Suelo según la Clasificación de la ASTM
(En Milímetros)**

Grava	> de 4,75
Arena gruesa	4,75 – 2,00
Arena media	2,00 – 0,425
Arena fina	0,425 – 0,075
Finos (mezcla de limo y arcillas)	< 0,075

Fuente: Peck, et.al., 1983.

Factores naturales influyentes de la erosión (Tavares Salomão, 1995)

Con la deflagración de los procesos erosivos, en función de la ocupación del suelo, estos son comandados por diversos factores relacionados con las condiciones naturales de los terrenos, destacándose: la lluvia, la cobertura vegetal, la topografía y los tipos de suelos.

- 1. Lluvia:** el agua de lluvia provoca la erosión del suelo a través del impacto de las gotas sobre la superficie, cayendo con velocidad y energía variables y a través del escurrimiento del torrente. Su acción erosiva depende de la distribución pluviométrica, más o menos regular, en el tiempo y en el espacio y de su intensidad. Lluvias torrenciales o

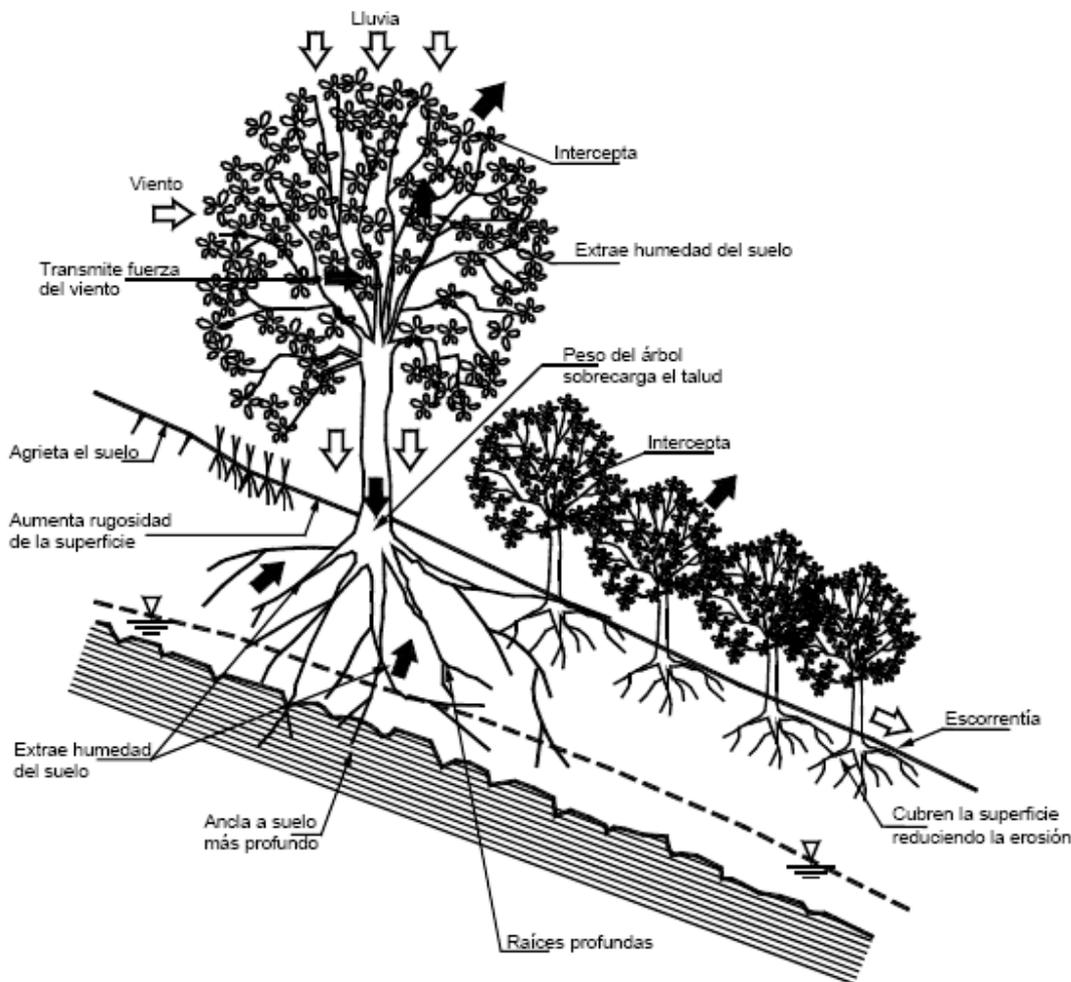
Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

chaparrones intensos, constituyen la forma más agresiva de impacto del agua en el suelo. Durante esos eventos la aceleración de la erosión es máxima.

2. Cobertura vegetal: la cobertura vegetal es la defensa natural de un terreno contra la erosión. Entre los principales efectos de la cobertura vegetal, Bertoni et.al. (1985) op. cit. Tavares Salomão (1995), destacan los siguientes:

- a) Protección contra el impacto directo de las gotas de lluvia;
- b) Dispersión y quiebre de la energía de las aguas de escurrimiento superficial;
- c) Aumento de la infiltración por la producción de poros en el suelo por acción de las raíces;
- d) Aumento de la capacidad de retención de agua por la estructuración del suelo por efecto de la producción e incorporación de materia orgánica.

En la siguiente figura se observan los efectos de la vegetación en la estabilidad de taludes:

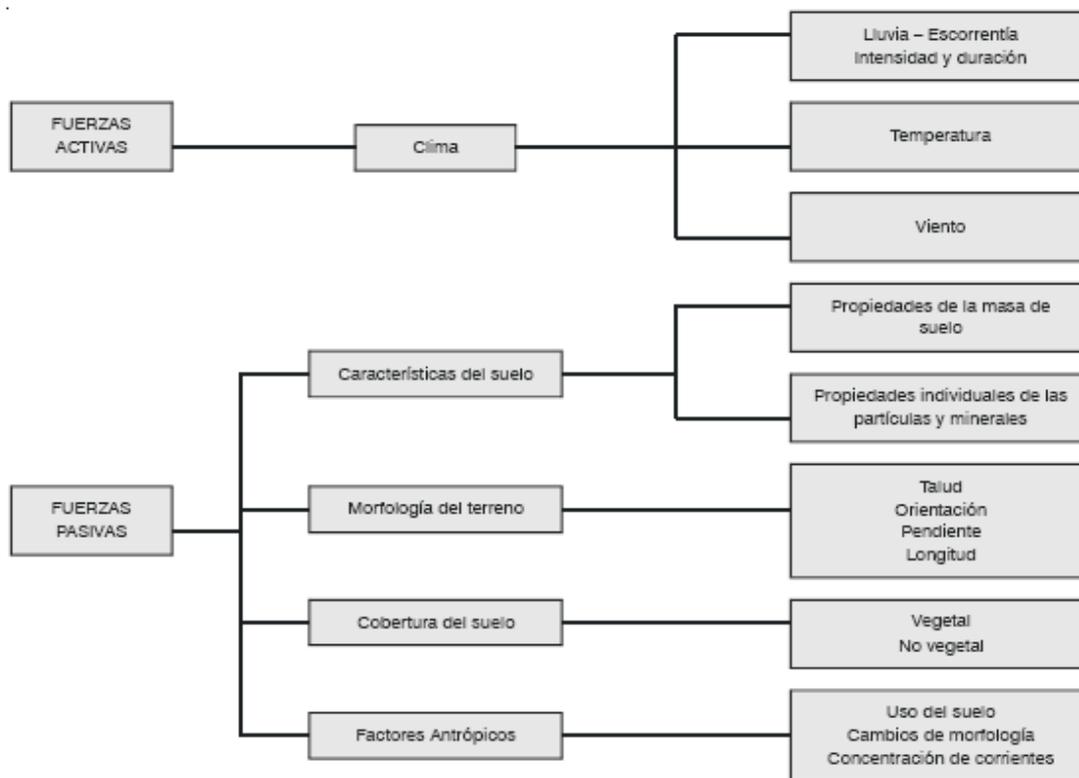


Fuente: Suárez (2001)

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

- 3. Topografía:** la influencia de la topografía del terreno en la intensidad erosiva se verifica principalmente por la inclinación y largo de la rampa (largo de la ladera). Estos factores interfieren directamente en la velocidad de los torrentes.
- 4. Suelos:** las propiedades físicas del suelo, principalmente textura, estructura, permeabilidad y densidad, así como las características químicas, biológicas y mineralógicas, ejercen diferentes influencias en la erosión, al otorgar mayor o menor resistencia a la acción de las aguas.

Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión de los taludes y laderas



Fuente: Suárez (2001)

La textura o el tamaño de las partículas, influye en la capacidad de infiltración y de absorción del agua de lluvia, interfiriendo en el potencial de torrentes del suelo, y en relación con la mayor o menor cohesión entre las partículas. La estructura o el modo como se componen las partículas del suelo, igualmente a la textura, influyen en la capacidad de infiltración y absorción del agua de lluvia, y en la capacidad de arrastre de partículas del suelo.

La densidad del suelo, relación entre su masa total y volumen, es inversamente proporcional a la porosidad y permeabilidad. Por efecto de la compactación del suelo, se observa un aumento de la

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

densidad, como resultado de la disminución de los microporos; en función de esto, el suelo se vuelve más erosionable. Las propiedades químicas, biológicas y mineralógicas del suelo influyen en el estado de agregación entre las partículas, aumentando o disminuyendo la resistencia del suelo a la erosión.

Mecanismos de producción de sedimentos

Las actividades mineras generan grandes cantidades de residuos sólidos, de los cuales los más importantes en función de volumen son los estériles y desechos (colas). Para el caso de las explotaciones mineras la erosión producida por el agua resulta ser la de mayor importancia, pues ésta es la que tiene mayores efectos perjudiciales en lo referente a remoción y transporte de sedimentos.

El «estéril» de mina es todo material sin valor económico extraído para permitir la explotación del mineral útil. «Desechos» son todos los residuos sólidos de las operaciones de tratamiento de los minerales (Sánchez, 1995).

El impacto de las gotas de lluvia sobre las superficies desnudas de los nuevos «suelos» de las áreas excavadas y de las construidas con los estériles, provoca, por un lado, una destrucción de los agregados de esos materiales produciendo una liberación de partículas finas y por otro, una disminución de la velocidad de infiltración como resultado de la formación de una costra más impermeable debido a la compactación.

Para el caso de «Control de Sedimentos en Minería a Cielo Abierto», algunos de los mecanismos de producción de sedimentos dentro de la explotación minera son los siguientes:

- Método de explotación.
- Operaciones unitarias: arranque – perforación y voladura, carga y acarreo del mineral o del estéril y concentración de mineral.

Factores que potencian la producción de sedimentos

Entre algunos de los factores que potencian la producción de sedimentos, podemos nombrar la composición mineralógica y morfológica del yacimiento explotado. Mientras mayor la complejidad de la mena, como en el caso de tener diversos grados de dureza en una altura de banco, hace que la fuerza de arranque impulsada por las voladuras, actúe según la dureza del material de una manera distinta en las diferentes capas que lo componen. Así por ejemplo, una fuerza «X» calculada para la fragmentación de un mineral más duro, disgregará aún más una capa blanda y ésta tendrá mayor oportunidad de producir más material fino que la anterior, por tanto tendremos mayor cantidad de sedimentos producidos.

- **Diversidad mineralógica**

Con seguridad la mineralogía de la roca influye al ser sometida a condiciones ambientales o procesos de arranque por voladura, carga de equipos de acarreo y beneficio de minerales, en la producción de partículas finas (sedimentos).

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

- **Selectividad en las voladuras.**

Los patrones de voladura son concebidos para la producción de material en una cantidad predeterminada en toneladas o metros cúbicos. Sin embargo, debido a la diversidad mineralógica que presenta el yacimiento, la probabilidad de interceptar uno o más estratos blandos, fallas geológicas, entre otros, nos conlleva a la mayor producción de sedimentos a medida que dicha probabilidad es mayor.

- **Efectos de la energía de la voladura sobre la mineralogía. Relación entre la mineralogía y la fragmentación – producción de sedimentos.**

Como se dijo anteriormente, los estratos más blandos tendrán más probabilidades de formar más sedimentos que los de mayor dureza, esto debido a la facilidad de fragmentación dada por sus características mineralógicas. Igualmente, habrá mayor producción de sedimentos en áreas de producción donde existan fallas geológicas, pliegues y foliaciones – estratificaciones orientadas favorablemente a deslizarse, entre otros.

- **Condiciones topográficas del yacimiento.**

- **Disposición de los sedimentos.**

A medida que la zona escogida para la disposición de los estériles, está a mayor cota, las partículas que se desprenden sufrirán mayores cambios físicos, debidas al transporte erosivo, el cual es la mayoría de las veces causado por agua, sin menospreciar los efectos causados por la acción del viento.

Disposición de estériles en escombreras



Fuente: Surface Mining (1990)

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

• **Diseño de mina. Altura de banco – perforación de barrenos para voladura.**

Mientras mayor la altura del banco, mayor será la longitud del barreno que necesitamos perforar para lograr la altura de banco prediseñada. Es lógico pensar entonces, que debido a la gran variedad de mineralogías presentes en el yacimiento, la probabilidad de interceptar mayor cantidad de estratos blandos, aumenta. La conclusión entonces:

a mayor intersección de estratos blandos ⇔ mayor producción de sedimentos

La altura de banco se hace importante debido a que puede ser razón suficiente para deslizamientos en mina a medida que se avanza (en profundidad). Mientras mas alto, menor estabilidad y por supuesto, menos seguro.

Disposición de estériles

Tradicionalmente los estériles se disponen en escombreras que, como el propio nombre lo indica, son lugares donde se tira algo. Este concepto de disposición de estériles se encuentra en muchas minas en que éstos son arrojados en valles o en laderas transformándose en escombreras potencialmente inestables, sujetas a formación de surcos y erosión acelerada y pudiendo causar eventualmente contaminación de aguas superficiales.

Las escombreras constituidas de esa manera muchas veces causan perjuicios aguas abajo, como la turbidez de las aguas y su recuperación es en general más cara que la construcción de una pila adecuada. Las pilas de estériles controladas son aquellas donde el material va siendo dispuesto de forma ordenada de abajo hacia arriba, con fajas intermedias drenantes y taludes de inclinación adecuada para permitir la revegetación y de esta forma reducir los riesgos de erosión y de ruptura de la pila; en las fajas se instalan sistemas de drenaje que recogen las aguas de lluvia y las conducen a cotas inferiores (Suárez, 1995).

Mecanismos de transporte y erosión

La erosión (López, et.al., 2002) es un fenómeno complejo que básicamente consiste en la disgregación y meteorización de un suelo o de un material rocoso por la acción de los agentes atmosféricos y la posterior denudación por arrastre de las partículas disgregadas (consultar material de referencia "Control de la erosión y obras de desagüe", p.287).

La erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua o el viento. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas. Las gotas de lluvia pueden contribuir al desprendimiento de las partículas o granos, los cuales se pueden traducir en sedimentación de materiales en el pie del talud (Suárez, 1998).

Dichos procesos de erosión son muy comunes en suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales, especialmente, los compuestos por limos y arenas finas principalmente, cuando la cobertura vegetal ha sido removida.

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

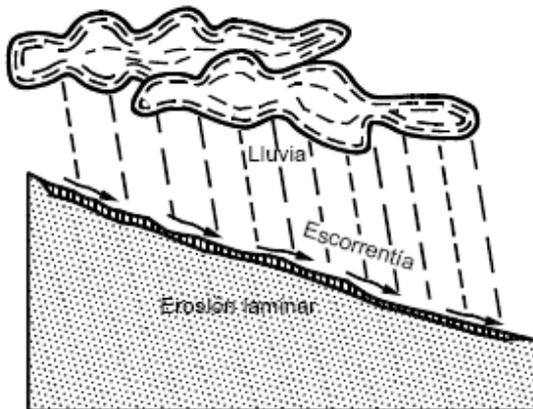
Se conocen varios tipos de erosión, de los cuales se hará mención de aquellos que se asemejan a las necesidades de las empresas mineras (Suárez, 1998 op.cit. Castillejo, 1999) (consultar material de referencia "Control de la erosión y obras de desagüe", p.p.289 - 293):

- **Erosión laminar:** se inicia por el impacto de las gotas de agua de lluvia contra la superficie del suelo, complementada por la fuerza de escorrentía produciendo un lavado de la superficie del terreno como un todo, sin formar canales definidos. Al caer las gotas de lluvia levantan las partículas de suelo y las reparten sobre la superficie del terreno. La erosión por golpeteo de la lluvia (*splash erosion*) ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo.

La velocidad de las gotas de las gotas de lluvia puede alcanzar valores hasta de 10 metros por segundo y su efecto es muy grande sobre las superficies de talud expuestos y sin cobertura vegetal.

En la siguiente figura se muestra el proceso de erosión laminar:

Proceso de erosión laminar



Fuente: Suárez (2001)

- **Erosión en surcos:** los surcos de erosión se forman por la concentración de agua en los caminos preferenciales, arrastrando las partículas y dejando canales de poca profundidad generalmente paralelos. El agua de escorrentía fluye sobre la superficie del talud y a su paso va levantando y arrastrando partículas de suelo, formando surcos (*rills*).

La acción de golpes de lluvia y el flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente (línea de menor resistencia), forma inicialmente microsurdos de erosión y a medida que la longitud de flujo es mayor, los surcos se hacen más profundos y de menor densidad por una unidad de área. La mayor parte del volumen total de sedimentos transportados por procesos erosivos ocurre en forma de surcos, después de la acción del golpeteo de lluvia.

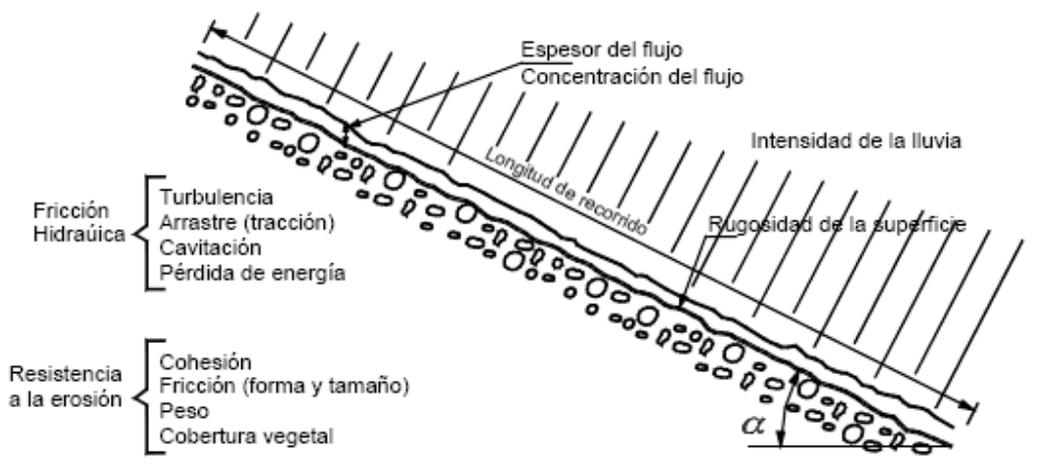
Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

Los surcos al profundizarse van capturando los vecinos, formando surcos de mayor tamaño, los cuales a su vez se profundizan o amplían formando cárcavas en forma de V que pueden transformarse en forma de U.

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie.

En la siguiente figura se muestran los elementos que intervienen en la formación de surcos:

Elementos que intervienen en la formación de surcos



Fuente: Suárez (2001)

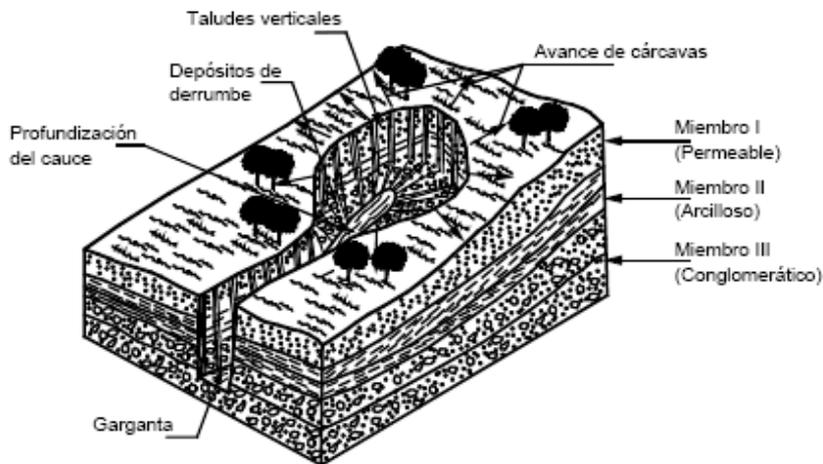
- **Erosión en cárcavas:** al profundizarse y ampliarse los surcos de erosión se convierten en cárcavas. Las cárcavas constituyen el estado más avanzado de erosión y se caracterizan por su profundidad, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava. Además, las cárcavas son cauces de concentración y transporte de agua y sedimentos.

Una vez que se forma una cárcava de erosión ésta se va haciendo más profunda. La cabeza de la cárcava se hace más alta y esta avanza talud arriba cada vez más rápidamente volviéndose prácticamente incontrolable. Es mucho más sencillo prevenir su ocurrencia que controlarla una vez se haya iniciado.

Controlar la erosión en cárcavas es difícil. Hasta ahora el proceso más efectivo para el control de cárcavas es la vegetación con estructuras que favorezcan su crecimiento. Puede ser necesario usar métodos mecánicos. Adicionalmente deben controlarse las aguas mediante canales.

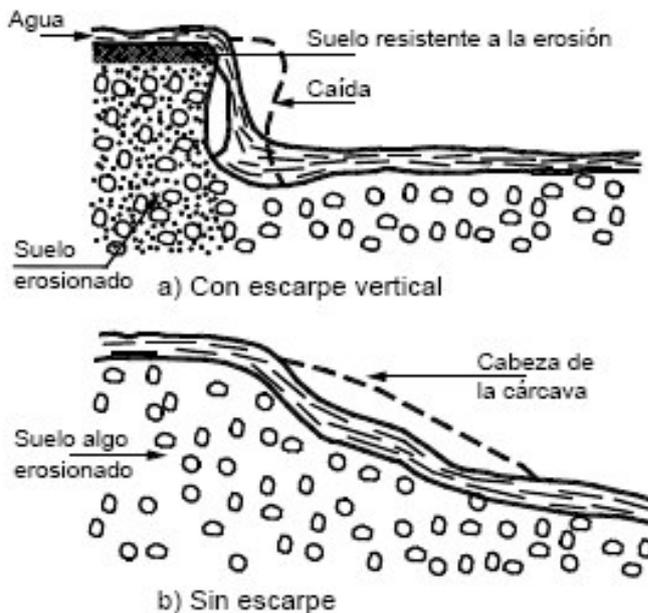
Las siguientes figuras muestran el esquema general de la erosión en cárcavas y los procesos de erosión en el fondo de una cárcava respectivamente, ambas tomadas de Suárez (2001).

Esquema general del proceso de erosión en cárcavas



Tomado de Suárez (2001)

Procesos de erosión en el fondo de una cárcava



Tomado de Suárez (2001)

Erosividad

Las pérdidas del suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia, en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y, en parte, por la contribución de la lluvia a la escorrentía superficial (López, et.al., 2002, p.295).

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

Erosionabilidad

La erosionabilidad es la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos (Castillejo, 1999). Mientras que Tavares Salomão (1995) la define como el índice que expresa la capacidad de la lluvia de provocar erosión.

La erosionabilidad de un suelo o de una roca es la inversa de la resistencia a la erosión. Un terreno con erosionabilidad elevada sufrirá más erosión que otro con erosionabilidad baja si ambos están expuestos a las mismas condiciones climatológicas (López, et.al., 2002, p.297).

Contaminación de las aguas por partículas sólidas

<i>Contaminante</i>	<i>Origen</i>	<i>Efectos / impactos</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Medidas de control</i>
Partículas sólidas	# de drenajes. # de focos de erosión. # de efluentes del beneficio.	Aumento de la carga de sedimentos de los cursos de agua. Disminución de la luminosidad. Sedimentación de los cursos de agua, favoreciendo la ocurrencia de inundaciones. Disminución de la productividad primaria (debido a la reducción de la fotosíntesis).	Sólidos en suspensión. Sólidos disueltos. Sólidos sedimentables. Sólidos totales Turbidez. Color.	Implementación de sistema de drenaje con miras a minimizar la cantidad de agua que circula en el área de operación. Cuenca de sedimentación. Adición de sustancias coagulantes. Clarificación.

Fuente: Sánchez (1995)

Medidas aplicadas a las áreas de disposición final de desechos en minería

Algunas de las medidas correctivas (Yazbek Bitar, 1995) usualmente empleadas en minas activas, considerando métodos comunes de deposición, son:

- Revegetación de los taludes de represas (en esta caso, solamente con herbáceas) y depósitos de pilas de estériles o desechos de beneficiamiento;
- Redimensionamiento y refuerzo de represas de desecho (con compactación y sistemas de drenaje en la cumbre);
- Instalación, aguas abajo del sistema de drenaje del área, de cajas de sedimentación o nuevos tanques o vasos de decantación de desechos;
- Redimensionamiento o construcción vertederos (con sistemas de disipación de energía, por ejemplo, escaleras de cemento (hormigón)) en represas de desechos;
- Tratamiento de efluentes líquidos, conteniendo sólidos en suspensión, en los tanques o vasos de decantación de desechos;
- Remodelamiento de la geometría de pilas de estériles o desechos (rebajar y esparcir), a través de excavación de los suelos superficiales que las circundan, esparcimiento de materiales con equipos de terraplenado, recubriendo con los suelos excavados y finalmente revegetación.

Objetivo 1: Conocer los conceptos fundamentales del transporte de particulado sólido en suspensión hídrica

Criterios de selección de disposición de sedimentos

Rodríguez y Ayala (1990) proponen algunos criterios para la selección de sitio para la disposición de estériles y sedimentos en explotaciones mineras:

Escombreras:

- a) Distancia de transporte desde la explotación hasta la escombrera, el cual afecta el costo total de la operación;
- b) Capacidad de almacenamiento necesaria, dada por el volumen de estéril a mover;
- c) Alteraciones potenciales que pueden producirse sobre el medio natural y las restricciones ecológicas existentes en el área de implantación.

Método de selección para la escogencia del área de escombrera en Minería a Cielo Abierto

Rodríguez y Ayala (1990) recomiendan que la elección del área de implantación de una escombrera, se haga persiguiendo los siguientes objetivos:

- Minimizar los costos de transporte y vertido.
- Alcanzar la integración y restauración de la estructura en el entorno.
- Garantizar el drenaje.
- Minimizar el área afectada.
- Evitar la alteración de hábitats, entre otros.

La geología y la capacidad portante permiten obtener muestras e información acerca de las características geotécnicas de los materiales que constituirán el depósito. Como mínimo se necesitan conocer tres parámetros básicos, como son: la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y el peso específico aparente (seco y saturado), para estimar si la base de una escombrera puede soportar la sobrecarga que supone el peso de los estériles vertidos o si por el contrario es probable que se produzcan inestabilidades estructurales y movimientos de los materiales de la base que afecten a la estructura que gravita sobre los mismos.

- **Cuencas o balsas de sedimentación:**

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 (ver también Objetivo 3).

Bibliografía del Objetivo 1

- 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.
- MARSH, William (1991) “Landscape Planning Environmental Applications”. Segunda edición. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- PECK, HANSON y THORNBURN (1983) “Ingeniería de Cimentaciones”. Segunda edición. Editorial Limusa. México.
- TAVARES SALOMÃO, Fernando (1995) “Erosión y la Ocupación Rural y Urbana”. 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.
- YAZBEK BITAR, Omar (1995) “Aspectos Geológicos en la Recuperación de Áreas Degradadas”. 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.
- SÁNCHEZ, Luis (1995) “Control de la Contaminación de las Aguas”. 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 (1998) “Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales”. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos. Bucaramanga. Colombia.
- SUÁREZ, Jaime (2001) “Control de Erosión en Zonas Tropicales”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.
- LÓPEZ JIMENO, Carlos (2002) editor “Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes”. Segunda edición. Madrid, España.
- KENNEDY, Bruce (1990) “Surface Mining”. SME. USA.