

## CAPÍTULO 8

### EROSIÓN DE SUELOS

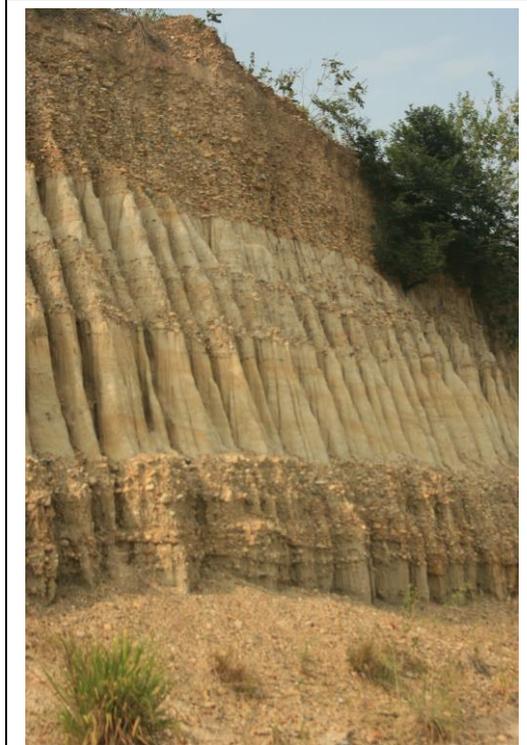
#### 8.1. Erosión.

Las actividades de ingeniería vinculadas con excavaciones, construcción de terraplenes y adecuación de terrenos para edificaciones, entre otros, exigen el retiro de la vegetación y la movilización de grandes volúmenes de suelo. Las áreas intervenidas quedan desprovistas de vegetación o de la protección del suelo y son susceptibles a inestabilidad por procesos de erosión y movimientos en masa y el resultado es la movilización del suelo cuando las fuerzas actuantes vencen la resistencia que oponen las partículas de suelo. La erosión involucra el suelo hasta disminuir su eficacia como elemento funcional dentro de las soluciones de ingeniería.

La erosión del suelo es la remoción y el transporte de las partículas superficiales por acción del viento y el agua. Ambos adquieren energía cuando se presenta en las formas de precipitación (pluvial), de escorrentía (escurrimiento) y de vientos, que al estar en contacto con el suelo (las primeras por impacto y las segundas por fuerza tractiva), vencen la resistencia del suelo (Fricción o cohesión) generándose la erosión. Cuando el agua encausada en ríos y quebradas adquiere alta energía, vence la resistencia de suelos, arenas, cantos y bloques, los moviliza, transporta y deposita a lo largo del valle. La acción erosiva de las corrientes es el principal modelador del relieve que observamos. La energía desarrollada por el viento (erosión eólica), vence la resistencia de las partículas de suelo, las moviliza y transporta.

Muchos proyectos de ingeniería exigen la remoción de la vegetación y la realización de excavaciones de suelo generando problemas ambientales en laderas y cauces vinculados con la pérdida de áreas protegidas con vegetación, el incremento de la erosión y la incorporación de sedimentos a la corriente, hasta alterar los ecosistemas naturales, generar problemas por sedimentación y hacer menos resilientes los taludes y áreas vinculadas con el proyecto.

La erosión edáfica es un proceso normal de movilización, transporte y depósito de sedimentos, principal modeladora del paisaje, y las actividades agropecuarias, el urbanismo y la construcción y operación de la infraestructura para el desarrollo de los pueblos son los factores que aceleran los procesos denudativos y con ellos el incremento de la vulnerabilidad de laderas, taludes, infraestructura y viviendas a la inestabilidad por la acción de los factores del clima,



**Figura 8.1.** Talud vial afectado por erosión. Las lluvias torrenciales adquieren la energía para labrar el talud en forma de surcos de erosión; el viento modela las formas redondeadas. En el pie del talud se depositan los sedimentos producidos por la erosión. (Carlos E Escobar P).

principalmente las lluvias, los vientos y las temperaturas altas que acceden al suelo. La ausencia de la protección del suelo que brinda el follaje de la vegetación hace menos resiliente el suelo frente al cambio climático. Otros procesos principales de remoción de suelo son los movimientos en masa y los procesos de transporte en masa, y cada uno es dominante en ambientes específicos.

La mayor parte de nuestros conocimientos sobre los mecanismos de erosión y sus tasas correspondientes se basan en el trabajo del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. El enfoque del SCS siempre ha sido pragmático, y sus predicciones en cuanto a tasas de erosión se han concentrado en torno al desarrollo y extensión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS). Los puntos tanto fuertes como débiles de la EUPS se hallan en la estimación de la erosión como producto de una serie de variables vinculadas con la precipitación, el grado y longitud de la pendiente; los factores edáficos y agrológicos, y los usos del suelo.

La erosión hídrica es propia de laderas e incluye el impacto de las gotas de lluvia que desprende el suelo por salpicadura lo compacta, reduce la infiltración, estimula la escorrentía y la capacidad hidráulica del flujo superficial con capacidad de acarreo de sedimentos.

La comprensión del fenómeno se soporta en la hidrología, en la hidráulica y en las propiedades del suelo (cohesión y tamaño de las partículas): la hidrología del suelo permite determinar las tasas de infiltración y el porcentaje de retención del agua por el suelo la hidráulica del suelo permite conocer las cualidades del suelo para dejar pasar flujos de agua por sus poros y la capacidad hidráulica de las aguas de escorrentía para movilizar sólidos.

La erosión de suelos, la pérdida de suelos y la acumulación de sedimentos son términos que tienen distintos significados en la tecnología de la erosión de suelos: la erosión de suelos es la cantidad bruta del suelo retirado por la acción dispersante de las gotas de lluvia y por la escorrentía. La pérdida de suelo es el suelo desprendido de una pendiente determinada. La producción de sedimentos es el volumen de suelo depositado en un punto que está bajo evaluación.

**8.2 Erosión hídrica.** Es la erosión por agua lluvia y comprende la erosión por el impacto de las gotas sobre el suelo desnudo, la acción hidráulica de las aguas de escorrentía con capacidad de movilizar y transportar las partículas de suelo, y modelar el relieve.

a. Saltación pluvial. El impacto de las gotas de lluvia en el suelo desprovisto de vegetación, desaloja y moviliza el suelo fino. El impacto compacta el suelo, disminuye la permeabilidad, estimula la escorrentía y contribuye al poder de erosión del agua de escurrimiento.



**Figura 8.2** Morfología del suelo característica de la acción de la erosión pluvial. La grava sirve de escudo al suelo y lo protege de la energía del agua. (Carlos E Escobar P)

b. Escurrimiento superficial difuso. Comprende la erosión laminar en áreas desprovistas de vegetación afectadas por la saltación pluvial y ocurre cuando la velocidad del agua es menor de  $30 \text{ cm} \cdot \text{seg}^{-1}$ .

c. Escurrimiento superficial concentrado. Se produce en surcos de erosión (canales bien definidos y pequeños, figura 8.1), y en cárcavas que son canales o zanjones de mayor dimensión. Cuando el flujo se hace turbulento, la energía del agua adquiere la capacidad de labrar canales paralelos o anastomados, llamados surcos; cuando estos se profundizan y amplían evolucionan a cárcavas, por las que circula agua concentrada durante y poco después de los aguaceros, movilizandando grandes volúmenes de material.

d. Escurrimiento subsuperficial. Las aguas infiltradas ocasionan la tubificación del suelo hasta formar cavidades cuando las fuerzas de filtración superan la resistencia del suelo. Es propio de suelos dispersivos o de formaciones calcáreas.

Aspectos relacionados con la erosión hídrica que deben considerarse:

1. Las geoformas denudativas creadas por la erosión.
2. Los fenómenos dinámicos asociados al transporte de las partículas.
3. La sedimentación y colmatación de los valles de los cauces.

**8.2.1 Valoración del efecto de la erosión hídrica:** se Utiliza:

$$Q_R = K \times E^\alpha \quad (8.1)$$

En donde  $Q_R$  es la erosión por lluvia,  $K$  un coeficiente de proporcionalidad,  $E$  la energía cinética de la lluvia y  $\alpha$  una constante que depende del tipo de suelo (baja en arcillas y alta en arenas).

$$A = R \times K \times (LS) \times (CP) \quad (8.2)$$

En donde  $R = E \times I_{30} \quad (8.3)$

La ecuación (8.2) presenta los factores más importantes para el control de la erosión.  $A$ : Es el promedio de pérdidas de suelo en Ton/Ha;  $R = EI_{30}$  es el factor de lluvia, expresado como el producto de la energía de una lluvia con la intensidad  $I_{30}$ , de 30 minutos;  $K$ : es el factor de erodabilidad del suelo (función del tipo de suelo);  $LS$ : es la longitud de la pendiente y magnitud de la misma, lo que depende de la topografía del terreno y  $C$ : factor de uso del suelo (suelo árido = 1; praderas = 0,1; bosque, selva = 0,01)

**8.3 Erosión fluvial.** Es la erosión que se presenta en los cursos de agua (quebradas y ríos) y se presenta cuando la fuerza tractiva del agua vence la resistencia que ofrecen e los materiales, los moviliza en las formas de socavación lateral o de fondo. Los procesos movilizan arcillas, limos, arenas, gravas, cantos y bloques, en las formas de acarreo, en disolución, en suspensión y en acarreo de fondo. Los volúmenes movilizados por erosión fluvial en cauces torrenciales son altos.

TIPO	ACCIÓN	EFFECTOS
<b>EROSIÓN HÍDRICA:</b> La acción de las aguas lluvias y de escorrentía con la contribución los agentes climáticos, sobre superficies inclinadas.  NOTA: La acción es estimulada en laderas (naturales) y taludes (construidos)	<b>Saltación pluvial:</b> Desalojo y dispersión por gotas de lluvia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Impacto de la gota de agua.</li> <li>● Reducción de la capa de infiltración.</li> <li>● Destrucción de los poros y de las fisuras del suelo expuesto</li> </ul>
	<b>ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DIFUSO</b>	
	<b>Erosión laminar:</b> Arrastre uniforme de capas de suelo en distancias cortas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Escurrimiento de suelos limosos y arenosos.</li> <li>● Es fuente importante de sedimentos.</li> </ul>
	<b>ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL CONCENTRADO</b>	
	<b>Surcos de erosión:</b> El escurrimiento concentrado forma pequeños canales paralelos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Destrucción de taludes y laderas.</li> <li>● Alto aporte de sedimentos.</li> <li>● Los canales se borran con perfilado y labranza.</li> </ul>
<b>Cárcavas:</b> Son zanjas profundas y amplias, de gran tamaño, difíciles de controlar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Acentuar el relieve promoviendo otras formas de inestabilidad.</li> <li>● Fuente importante de sedimentos.</li> <li>● Corrección de alto costo.</li> </ul>	
<b>EROSIÓN INTERNA:</b> Por flujo subterráneo.	<b>ESCURRIMIENTO SUBSUPERFICIAL</b>	
	<b>Tubificación y cavernas:</b> Debilitamiento interno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Puede originar manantiales, cárcavas y hundimientos.</li> </ul>
<b>EROSIÓN FLUVIAL</b>	<b>Socavación de fondo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profundiza el fondo de los cauces naturales.</li> <li>● Desestabiliza las laderas.</li> <li>● Progreso remontante.</li> </ul>
	<b>Socavación lateral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Elimina el soporte de laderas.</li> <li>● Amplia el lecho del cauce.</li> </ul>

**Tabla 8.1** Proceso de erosión hídrica y su contribución a la inestabilidad

#### 8.4 Remoción en masa

Son un conjunto de procesos debidos a la transportación directa de materiales, por la acción de la gravedad sin que medie un agente de transporte (hielo, agua, viento).

a. **Desplazamiento en masa.** Es la movilización descendente del material, en estado plástico o elástico, del interfluvio hacia la vaguada y en forma rápida o lenta. Estos fenómenos son del dominio de la *Mecánica de Suelos*.

b. **Transporte en masa.** Son movimientos de rápidos a muy rápidos de mezclas viscosas de agua y materiales térreos, que avanzan a lo largo de los cauces o sobre las depresiones del terreno y valles de salida de las corrientes. El flujo viscoso se puede originar a partir de masas desplazadas y su estudio es del dominio de la *Mecánica de los fluidos*.

### 8.5 Montañas altas en Colombia e inestabilidad (A. Florez)

Nuestras altas montañas presentan diferencia geomorfológica que es función de condiciones bioclimáticas ligadas al escalonamiento de altitudes.

Existen tres sistemas morfogenéticos ligados al frío actual y pasado, cuyos pisos resultantes son: Glaciar (G), periglacial (PG) y de modelado glaciar heredado anteholoceno (MGH), ver figura 8.3.

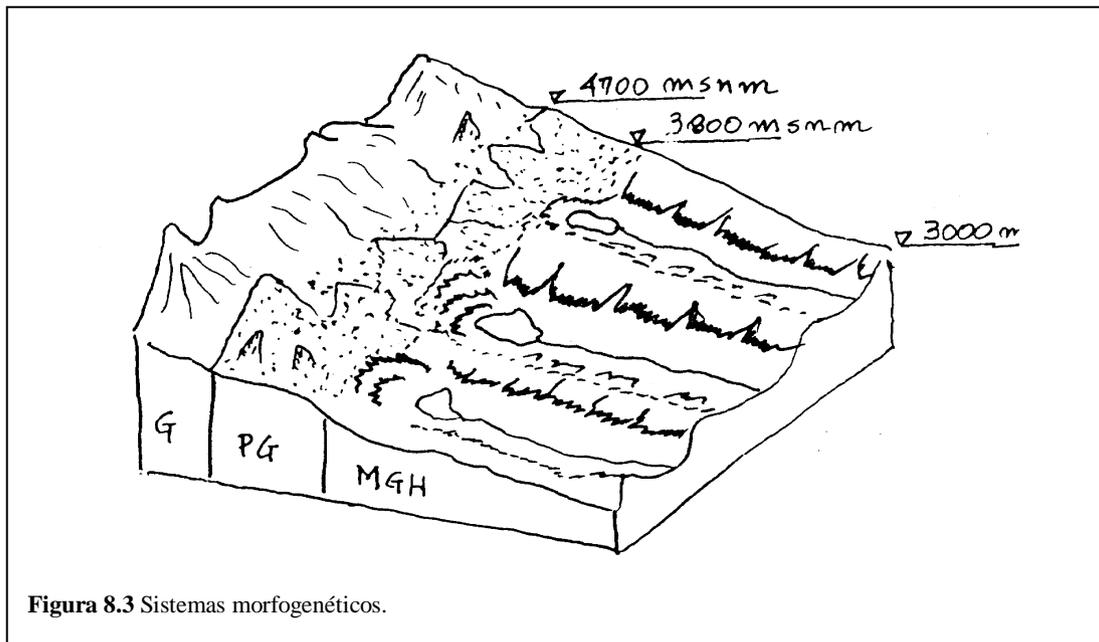


Figura 8.3 Sistemas morfo-genéticos.

**a. Piso glaciar (G):** Sobre 4.700 m.s.n.m., se presentan "glaciares de montaña", que son masas de hielo en movimiento. En Colombia, la neoglaciación terminó hace 11.500 años; en período histórico se han deglaciado el Cumbal, Chiles, Pan de Azucar, Puracé, Santa Rosa, Quindío y Cisne y los actuales relictos que suman menos de 100 Km<sup>2</sup>, son Huila, Tolima, Santa Isabel, Ruiz y las Sierras Nevadas de Chita, Santa Marta y Güicán.

Hoy retroceden y pierden espesor los nevados, las grietas glaciares aumentan y esta dinámica implica aportes de agua rápida y arrastres de sedimentos a los pisos inferiores, como también modificación de la frontera entre pisos, que va en ascenso, por inestabilidad del sistema.

**b. Piso periglacial (PG):** Entre 3.800 m y 4.700 m sobre el nivel del mar. Está la faja amortiguadora de los glaciares, pero este piso no necesariamente exige la presencia de un glaciar, aunque sí las condiciones de altitud y latitud para los procesos de frío y alternancia diaria o estacional del ciclo hielo – fusión. La ausencia de cobertura vegetal y de suelo es casi total, excepto en los niveles inferiores.

Los procesos son: escurrimiento difuso y concentrado (por hielo–deshielo); reptación por hielo de exhudación, transportes eólicos (defloción); gelifracción de rocas, descamación de rocas, coladas de barro por fusión de nieve y colmatación de lagunas con sedimentos.

El sistema morfogenético evidencia inestabilidad (migración).

**c. Piso del modelado anteholoceno (MGH).** En la gran glaciación, los hielos modelaron hasta los 3.000 m.s.n.m. en Colombia, creando circos, valles en U y cubetas de sobreexcavación, y dejando morrenas y depósitos fluvioglaciares. Hoy, estos modelados cuentan con cobertura vegetal abundante y suelos orgánicos espesos. El piso comprende al páramo y parte del bosque alto–andino.

El modelado es abundante en cubetas de socavación glaciár (hoy como lagunas o pantanos). Es el piso vital para las cuencas hidrográficas primarias. El sistema es muy estable hoy y sólo presenta procesos menores, como sofución en formaciones superficiales porosas, soliflucción en suelos muy húmedos, disección por escurrimiento superficial y moderada reptación.

La dinámica descrita es referida a condiciones exclusivamente naturales, pero la acción antrópica de las últimas décadas ha llevado a este escenario quemas, deforestación y actividades agropecuarias. El suelo, así, está expuesto a la erosión y pierde capacidad de infiltración (factores que repercuten en el ecosistema general).

## 8.6 Dinámica fluvial

La velocidad de una corriente fluvial, viene expresada por:

$$v = C\sqrt{RI} \quad (8.4) \quad \text{siendo} \quad R = A/P \quad (8.5)$$

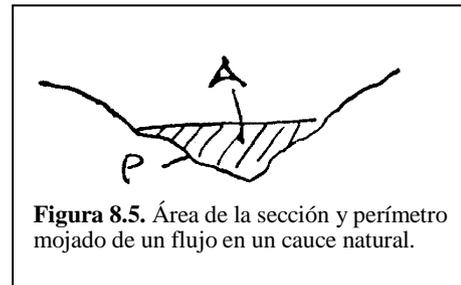
En donde C = coeficiente de rugosidad del lecho, R el radio hidráulico (que es el cociente A/P) e I la pendiente (CHEZY – EYTELWEIN).

También se puede expresar el área de la sección en función del caudal Q y llevar el resultado de (8,5) a (8.4), para obtener

$$v = C\sqrt{\frac{Q}{v*P}}I \quad (8.6) \quad \left(\text{aquí se hizo } R = \frac{\left(\frac{Q}{v}\right)}{P}\right)$$

Transformando (8.6) para despejar v

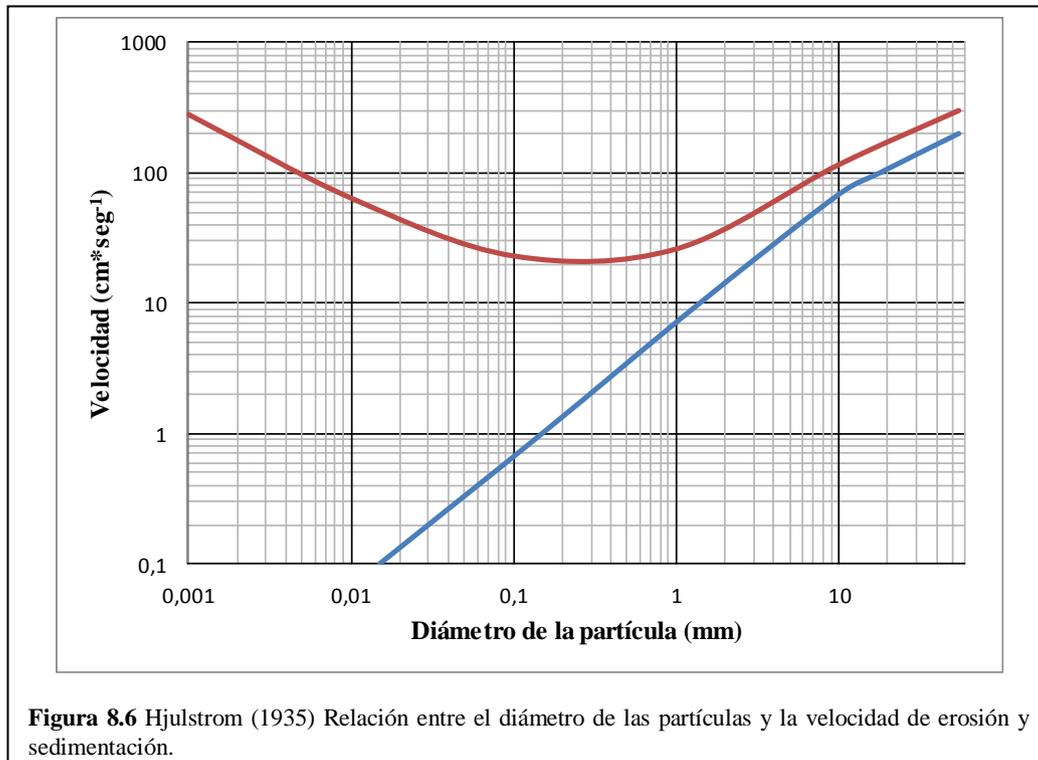
$$v = \sqrt[3]{\frac{C^2 * Q * A}{P}} \quad (8.7) \quad \left(C = \frac{1}{n}; n = \text{coeficiente de Manning}\right)$$



**Figura 8.5.** Área de la sección y perímetro mojado de un flujo en un cauce natural.

Con (8.7) queda claro que la velocidad de la corriente no es constante en toda la sección inundada.

La velocidad media de la corriente es tan solo entre  $\frac{6}{10}$  a  $\frac{8}{10}$  de la velocidad máxima, la que no necesariamente está en el centro de la corriente sino que oscila pasando de una a otra orilla, y en la vertical se sumerge algo.



**Figura 8.6** Hjultrom (1935) Relación entre el diámetro de las partículas y la velocidad de erosión y sedimentación.

## 8.7 Hidrotecnia y cuenca

El fenómeno torrencial supone caudales sólidos y crecidas repentinas; la carga de sólidos lo hace en suspensión y como acarreo. La carga de acarreo proviene de la erosión del cauce y la carga de suspensión se origina en la erosión de laderas (hídrica).

Pero la corriente transporta acarreos de acuerdo al caudal y éste depende del estado de la cuenca: ambos tienen una relación de causalidad: los caudales altos generan altos volúmenes de acarreos y la erosión del cauce es intensa, y los caudales regulados movilizan bajos volúmenes de sólidos y la erosión del lecho es moderada.

Las obras de ingeniería hidráulica utilizadas en el control de la torrencialidad de una corriente se soportan en la restauración forestal de la cuenca: al incrementar el volumen del follaje, de hojarasca y de plantas herbáceas se estimula la infiltración del agua en el suelo y la retención provisional de las aguas pluviales y de las aguas de escorrentía que acceden a la corriente, y

con ellas la regulación hidrológica de la cuenca. Una regulación deficiente trae como consecuencia el secamiento de los ríos en verano y las crecientes severas en inviernos.

### 8.7.1 Restauración biológica de la cuenca.

La corrección torrencial y el control hidrológico en las laderas son acciones complementarias: ambas están orientadas hacia la estimulación de la vegetación y a la regulación del agua pluvial y de escorrentía en laderas: el incremento de la infiltración y de los tiempos de concentración de las aguas, sugiere acciones de conservación de la vegetación, su mejora y plantación de nuevas plantas. El establecimiento de vegetación es prioritario y distancia entre plantas y la siembra de especies herbáceas que fortalecen el sotobosque permiten un sistema eficiente en la intercepción y la regulación de las aguas. Se prefieren plantas de morfología variada y portes diversos con niveles arbóreos, arbustivos y herbáceos de plantas nativas que contribuyen al equilibrio ecológico, y cuando se establece la fauna se estimula la sucesión vegetal.

### 8.7.2 Hidrotécnica y cauce.

La corrección de un cauce torrencial está orientada a controlar procesos de erosión, transporte y depósito de los sólidos del lecho y de las márgenes.

El dinamismo torrencial aparece ligado a la tensión tractiva " $\tau$ ", que es aquella que adquiere la corriente para movilizar y transportar acarreos. Está dada por la siguiente relación:

$$t = \gamma_w \cdot R \cdot S \quad (8.8)$$

En donde  $\gamma_w$  es el peso específico de la corriente, R el radio hidráulico y S la pendiente o gradiente hidráulico (línea de energía).

A esa tensión tractiva " $\tau$ " se opone el material con su peso, inercia, fricción, etc., generando una resistencia dada por la tensión crítica " $\tau_0$ ":

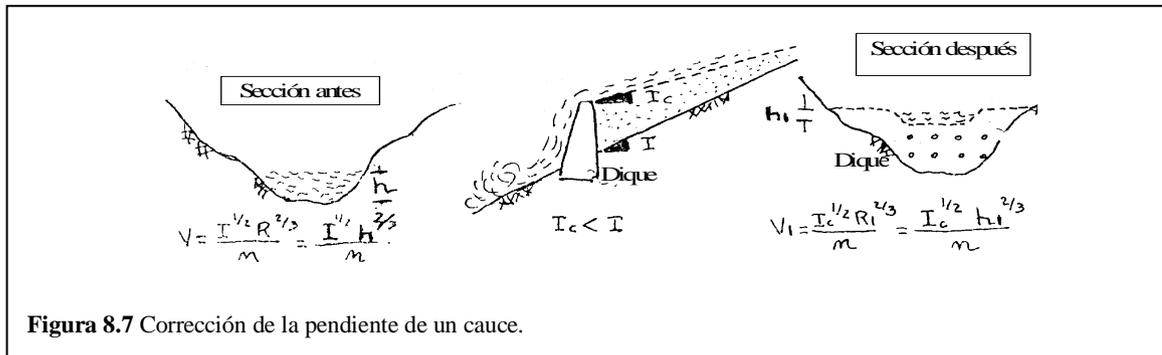
$$t_0 = K \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50} \quad (8.9)$$

En donde K es un coeficiente que se determina experimentalmente y  $\gamma_s$  el peso específico de los materiales acarreados ( $\gamma_s - \gamma_w$ ) es  $\gamma'$ .

La calificación del estado torrencial se hará en secciones homogéneas, comparando  $\tau$  y  $\tau_0$ , es decir, tensión tractiva Vs tensión crítica del contorno. Además  $\gamma_w > 1$  cuando la corriente tiene materiales en suspensión.

### 8.7.3 Control vertical y pendiente de compensación $I_c$

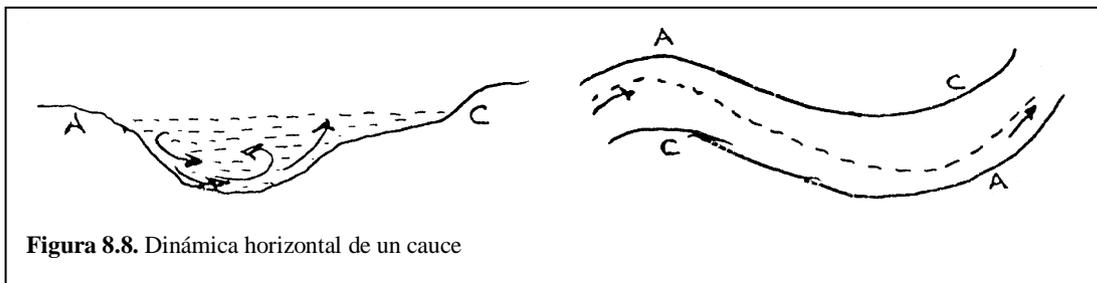
Cuando  $\tau > \tau_0$ , los lechos se profundizan y los macizos de las márgenes se desestabilizan. Así, las estructuras transversales ofrecen soluciones simples y eficaces. Estas obras forman diques de consolidación, a modo de presas. Sea R el radio hidráulico y n el coeficiente de rugosidad (1/C)



#### 8.7.4 Control horizontal

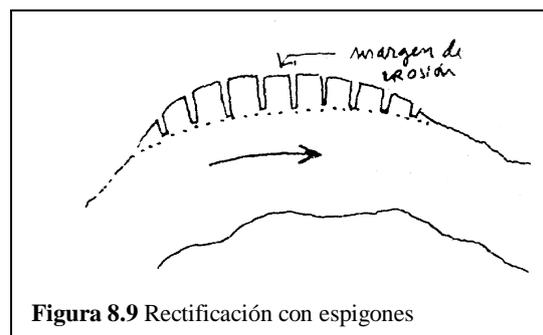
La rectificación del eje hidráulico procede cuando los caudales circundantes adquieren tensiones tractivas que superan las tensiones resistentes del material del contorno.

Tanto la erosión como la sedimentación son comunes en los cuerpos de agua con régimen fluvial y se presentan acentuadas en los tramos donde la fuerza centrífuga que adquiere la corriente en las curvas, excava el lecho externo de la curva del cauce, mientras que la margen interna se sedimenta.



El proceso no logra equilibrar las tensiones totalmente, en razón a que la erosión y la sedimentación hacen inestables los meandros y el cauce migra lateral obligando la ejecución de obras longitudinales para el control horizontal de la corriente.

La protección de márgenes puede lograrse con barreras continuas dotadas de materiales resistentes a la erosión, como muros de hormigón, mampostería hidráulica, muros flexibles de gaviones, o escolleras de materiales de mayor diámetro que el del lecho o mediante plantaciones y recubrimientos vegetales.



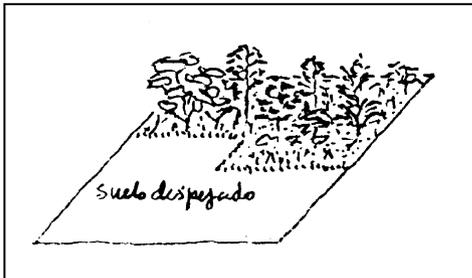
### 8.7.5 Emplazamiento de obras

**Diques de retención.** Se emplazan aguas arriba de las áreas que pueden sufrir daños, aprovechando las gargantas estrechas del cauce, aprovechando los ensanchamientos, para construir trampas de sedimentos.

**Diques de consolidación.** Son obras utilizadas para consolidar las laderas marginales. Se construyen emplazados de tal manera que en la sección transversal media del deslizamiento sea soportada por una cuña de relleno suficiente para contener la ladera.

**Espigones.** Su longitud  $L_T$  es  $h \leq L_T \leq B/4$ . Si se le da empotramiento en la margen  $= 0,25 L_T$ . El ángulo con el eje de la corriente  $70^\circ - 90^\circ$ . Su separación depende del  $L_T$  del primero, del ángulo con la orilla de aguas abajo. En curvas,  $S_P \leq 8L_T$  y en rectas  $S_P \leq 6 L_T$  (medida económica); pero también  $5,1L_T \leq S_P \leq 6,3L_T$ . Si el riesgo es alto  $S_P = 4 L_T$ . Deben tener pendiente hacia el río entre 5% - 25% y profundidad suficiente para prevenir su socavación.

**Ejercicio 8.1** erosión por cambio de uso del suelo. Se tiene un claro despejado con tractor para un proyecto de ingeniería. a) Discutir los problemas y expectativas de erosión. b) Valore los efectos del proyecto. c) Concluya.



$$A = RK (LS) CP = \text{EROSIÓN} \quad (1)$$

- a) Discusión: Los factores R de lluvia y K de erodabilidad del suelo, no cambian por las adecuaciones del lote que se desea construir. Entonces:

$$\text{EROSIÓN} = (LS) CP \quad (2)$$

En la parcela, las condiciones topográficas (LS), el uso del suelo y las prácticas de conservación, serán alteradas. El movimiento de tierra con el tractor modifica la longitud e inclinación de la pendiente y en general, el resultado es que el factor (LS) aumenta. Los cambios en la vegetación también son evaluables (en este caso "C" aumenta), y las condiciones de conservación "P" dependerán del diseño y concepción del proyecto.

- b) Valoración del efecto erosivo: con base en (2) (para  $P = 1 = \text{constante}$ ):

Condición	Modificación prevista
(LS) Pendientes antes del modelado $5^\circ$	$5^\circ / 9^\circ \Rightarrow LS = 0,56$
(LS) Pendientes luego del modelado $12^\circ$	$12^\circ / 9^\circ \Rightarrow LS = 1,34$
C Antes de la tala	$C = 0,2$
C Después de la tala	$C = 1,0$

Aplicando (1) bajo los anteriores presupuestos ( $P = 1 = \text{constante}$ ):

EROSIÓN antes de la construcción:  $RK (0,56)(0,2) = 11,3 \text{ RK}$

EROSIÓN después de la construcción:  $RK (1,34)(1,0) = 1,340 \text{ RK}$

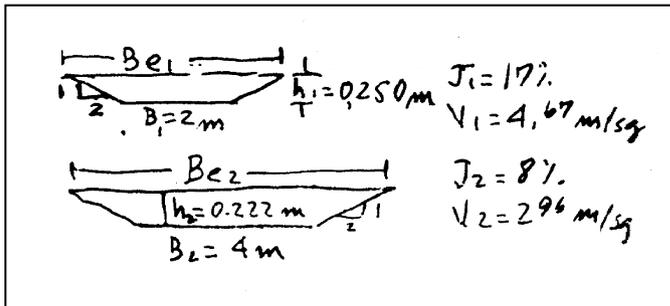
- c) Conclusión: La erosión en el lote se incrementará cerca de 12 veces. Se requiere, en consecuencia, incluir medidas para el control de la erosión, haciendo que  $P = 0,3 - 0,4$ , y logrando que el incremento de la erosión sea sólo de unas 4 veces.

Granulometría

Tamiz	W ret (gr)	% pasa
75	500	83,3
63	550	65,0
50	650	43,3
37,5	450	28,3
28	350	16,6
20	150	11,6
14	150	6,6
10	50	4,9
6,3	100	1,6
6,3	50	-----

**Ejercicio 8.2.** En un cauce erosionado se toman los siguientes datos: Peso específico del fluido  $\gamma_f = 1,11 \text{ Ton/m}^3$ , altura de la lámina de agua  $h_f = 0,25 \text{ m}$ , pendiente del lecho  $J_0 = 17\%$ , gravedad específica de los sólidos  $G_s = 2,65$ . Además la granulometría adjunta del material del lecho ( $W_T = 3.000 \text{ gr}$ ) con su geometría (subíndices y figura E.2) y velocidad  $V_1$  de flujo. Si se hace la corrección con diques de consolidación y establecimiento de vegetación ( $\gamma_f = 1,00 \text{ ton/m}^3$ ) ampliando la sección del cauce (subíndices 2) y rebajando la pendiente al 8%.

Hallar las tensiones tractivas para  $d_{50}$  y críticas 1 y 2, y calculas las profundidades de socavación  $S_1$  y  $S_2$ . Analice los cambios hidrotécnicos.



Se tiene  $Q = 2,92 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $V_2 = 2,96 \text{ m/s}$

Solución: a) De la granulometría  $d_{10} = 4 \text{ mm}$ ,  $d_{30} = 28 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 41 \text{ mm}$ ,  $d_{60} = 45 \text{ mm}$ ,  $C_u = 11,25$ ,  $C_c = 4,36$ .

El rango de interés granulométrico sea del  $T = 1 \frac{1}{2}''$  al  $T = \text{N}^\circ 4$ .

De consideraciones hidráulicas se

han obtenido  $Q$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $K$ ,  $\mu$  y  $n$ .

- b) Cálculo de tensión tractiva  $\tau$  y tensión crítica  $\tau_c$  ( $K = 0,047$ )

$$\tau_1 = \gamma_{f1} * h_1 * J_1 = 1,10 * 0,250 * 0,17 = 0,05 \text{ TT/m}^2$$

$$\tau_2 = \gamma_{f2} * h_2 * J_2 = 1,00 * 0,222 * 0,08 = 0,02 \text{ TT/m}^2$$

$$\tau_{C1} = K(\gamma_S - \gamma_{f1})d_{50} = 0,047(2,65 - 1,10)0,041 = 0,0030 \text{ TT/m}^2$$

$$\tau_{C2} = K(\gamma_S - \gamma_{f2})d_{50} = 0,047(2,65 - 1,00) * 0,041 = 0,0032 \text{ TT/m}^2$$

- c) Cálculo del diámetro de equilibrio  $d_{150}$  y  $d_{250}$ . (La condición es  $\tau_c = \tau$ , Fórmulas 8.1 y 8.2)

$$\tau_{C1} = \tau_1 \Rightarrow d_{1.50} = \frac{\tau_{C1}}{K(\gamma_S - \gamma_{f1})} = \frac{0,05}{0,047(2,65 - 1,10)} = 0,68m$$

$$\tau_{C2} = \tau_2 \Rightarrow d_{2.50} = \frac{\tau_{C2}}{K(\gamma_S - \gamma_{f2})} = \frac{0,02}{0,047(2,65 - 1,00)} = 0,26m$$

En la situación nueva (2) cantos de  $\phi > 26$  cm resultan estables. En la situación anterior (1) se movilizaban cantos mayores ( $\phi < 69$  cm)

- d) Oferta de la granulometría del cauce. (Diámetro medio, dm, en el rango sugerido de los cinco tamices)

$$\sum d_i = (14 + 20 + 28 + 37,5 + 50) = 149,5mm$$

$$\sum P_i = \frac{\sum W_i}{W_T} = \frac{(150 + 150 + 350 + 450 + 650)}{3000} = 58,3\%$$

$$dm = \frac{\sum d_i * \sum P_i}{100} = \frac{149,5 * 58,3}{100} = 87,2mm$$

- e) Cálculo de socavación ( $S_i$ )

Partimos del tirante H, que es la altura de la columna de agua más la socavación: ( $H = h + S$ )

Interpolación para X:

$$X = f(Y)$$

$$\frac{(60 - 40)}{(0,29 - 0,30)} = \frac{18,3}{Y} \Rightarrow Y = 0,009$$

$$\therefore X = 0,298 \Rightarrow \frac{1}{1 + X} = 0,770$$

El valor de X es de tablas

$$H = \left[ \frac{\alpha * h^{1,667}}{0,68\beta * dm^{0,28}} \right]^{1+X}$$

**Condiciones iniciales**

$$h_1 = 0,250m, B_{e1} = 3m, A_1 = 0,625m^2$$

$$Pm_1 = \frac{A_1}{B_{e1}} = \frac{0,625}{3} = 0,208m$$

$$\alpha_1 = \frac{Q}{Pm_1^{1,667} * B_{e1} * \mu} = \frac{2,95}{0,208^{1,667} * 3 * 1} = 13,47$$

$$H_1 = \left[ \frac{13,47 * 0,250^{1,667}}{0,68 * 1,00 * 87,2^{0,28}} \right]^{0,770} = 0,642m$$

$$S_1 = H_1 - h_1 = 0,642 - 0,250 = 0,392m$$

**Condiciones finales**

$$h_2 = 0,222m, B_{e2} = 4,89m, A_2 = 0,987m^2$$

$$Pm_2 = \frac{A_2}{B_{e2}} = \frac{0,987}{4,89} = 0,202m$$

$$\alpha_2 = \frac{2,95}{0,202^{1,667} * 4,89 * 1} = 8,679$$

$$H_2 = \left[ \frac{8,679 * 0,222^{1,667}}{0,68 * 1,00 * 87,2^{0,28}} \right]^{0,770} = 0,393m$$

$$S_2 = H_2 - h_2 = 0,393 - 0,222 = 0,171m$$

Asumimos:  $\beta, \mu, n$

$\beta = 1,00$  = factor que depende de la probabilidad de Q

$\mu = 1,00$  = Coeficiente de contracción – sin obstáculos

$n = 0,035$ . Manning

$$Q = A * V = 2,95 m^3/s$$

$$\text{donde } V = \frac{1}{n} * h^{2/3} * J^{1/2}$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{2,95}{0,625} = 4,72 m/s$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{2,95}{0,987} = 2,99 m/s$$

**Resumen y análisis**

	b	T	H	J	$\tau$	$\tau_c$	dm	S	V	Pm
SECCIÓN 1	2	3	0,250	17%	0,05	0,0030	87,2	0,392	4,72	3,12
SECCIÓN 2	4	4,89	0,222	8%	0,02	0,0032	87,2	0,171	2,09	4,99
$\Delta = \frac{F-i}{i} * 100$	+100	+63	-11,2	-	-60	+6,7		-54	-36,6	+56,9

- Disminuye la velocidad porque aumenta el perímetro mojado Pm.
- Disminuye la pendiente J, se amplía B, aumenta  $\tau$  y disminuye h.

- Se controla la erosión porque disminuye  $\tau$  y aumenta  $\tau_c$ .
- La reducción de  $V$  y el aumento de  $P_m$  explican la menor socavación  $S$ .
- Las medidas de reforestación permiten retirar los sólidos de la corriente.
- Con las variaciones en  $\tau$  y  $\tau_c$  el cauce toma una nueva configuración. El nuevo  $d_{50}$  de equilibrio es menor al  $d_m$  que ofrece el cauce.
- La erosión del lecho compromete más rápidamente los finos, lo que trae como consecuencia el cambio de la rugosidad.
- La profundidad para la cimentación del dique debe ser superior a  $H_2 = 0,392$  m para prevenir su socavación.
- Aguas abajo del dique, se observará un cauce sin finos, con una granulometría gruesa, porque el agua, que ha perdido carga de finos, los tomará aguas abajo del dique.
- Aguas arriba del dique, se observará un excedente de finos, en virtud a un proceso de sedimentación que irá progresando hacia aguas arriba, por el cambio de nivel de base de la corriente.
- El acorazamiento del cauce es el fenómeno con el cual responde la corriente, ya desprovista de finos, aguas abajo. Se trata de un cauce con un lecho de alta rugosidad.

---

#### DOCUMENTOS DE COMPLEMENTO ON LINE

**Diálogos con el Territorio y Gestión del Riesgo Natural.** Duque-Escobar Gonzalo. Especialización en Geografía. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales de la U. de Caldas. <https://godues.wordpress.com/2013/05/29/dialogos-con-el-territorio-y-gestion-del-riesgo-natural/>

**Caldas en la biorregión cafetera.** Duque Escobar, Gonzalo (2014) Ponencia para el Foro "Por la Defensa del Patrimonio Público, las Fuentes de Empleo y el Bienestar de los Caldenses". U. de Caldas, <http://www.bdigital.unal.edu.co/45356/1/gonzaloduqueescobar.201447.pdf>

**Calentamiento global en Colombia.** Duque Escobar, Gonzalo (2011) In: El Día Mundial del Medio Ambiente, Junio 6 de 2011, IUC. <http://www.bdigital.unal.edu.co/3673/>

**Manual de geología para ingenieros.** Duque Escobar, Gonzalo (2003) Universidad Nacional de Colombia, Manizales. - See more at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>



**GEOMECÁNICA.** Duque Escobar, Gonzalo and Escobar P., Carlos Enrique. Universidad Nacional de Colombia (2016). See more at: <http://galeon.com/geomecanica>