



POLITÉCNICA



Procesos de erosión, transporte y sedimentación



JOSÉ LUIS GARCÍA RODRÍGUEZ
UNIDAD DOCENTE DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL
E.T.S. DE INGENIEROS DE MONTES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

- **La Hidrología es la ciencia que estudia todas las fases del agua en la Tierra, es una materia de gran importancia para el ser humano y su ambiente.**
- **Es la encargada de estudiar el ciclo hidrológico.**
- **El ciclo hidrológico es el foco central de la Hidrología.**



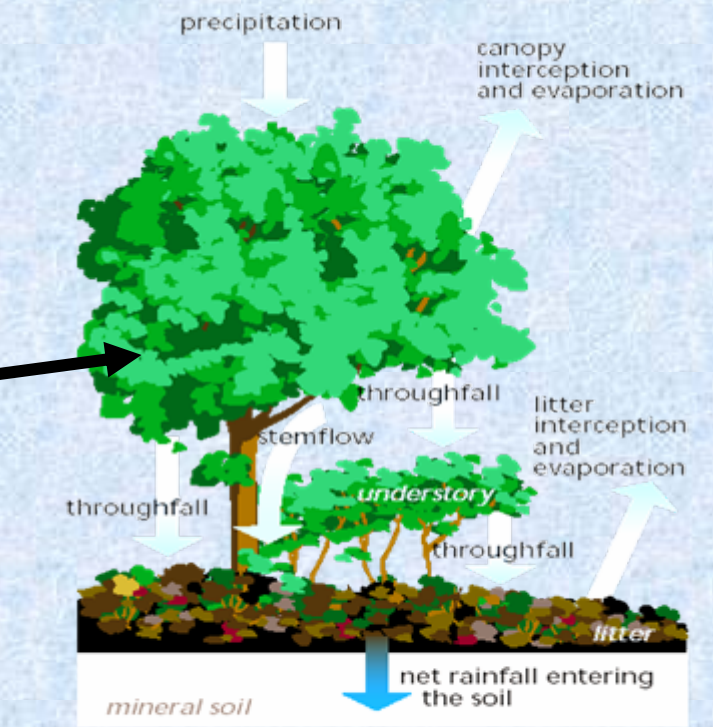
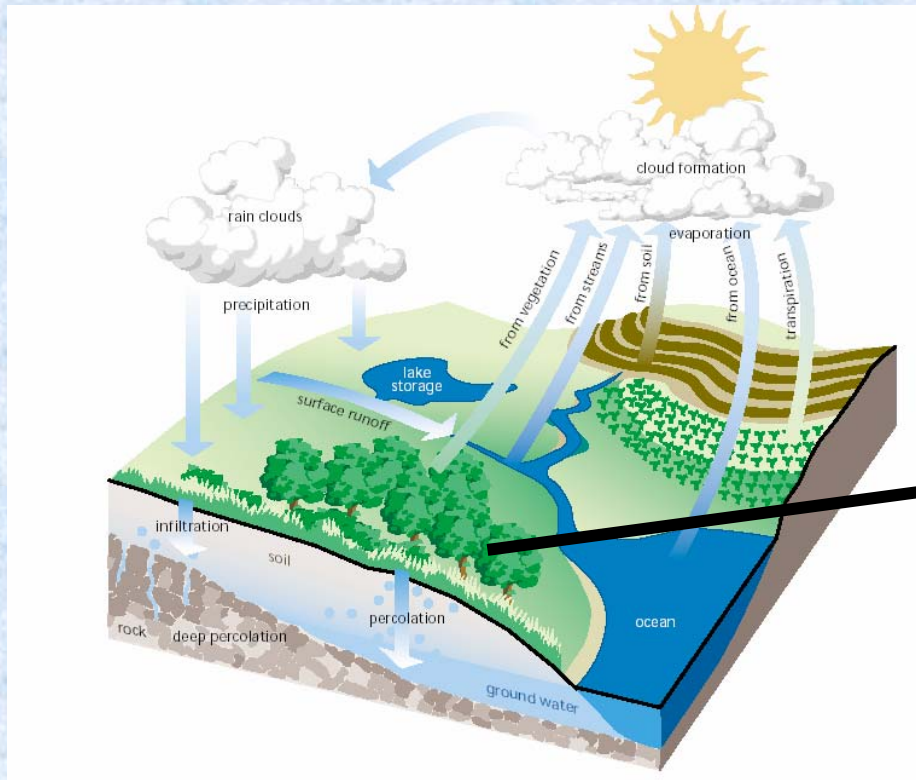


Figure 2.3: Typical pathways for forest rainfall. A portion of precipitation never reaches the ground because it is intercepted by vegetation and other surfaces.

Ciclo hidrológico. Fuente: Stream Corridor Restoration



POLITÉCNICA



TEMA 15: La erosión. Aspectos conceptuales



JOSÉ LUIS GARCÍA RODRÍGUEZ
UNIDAD DOCENTE DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL
E.T.S. DE INGENIEROS DE MONTES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

-Definición de la erosión

-La erosión geológica y la erosión actual:
el ciclo geológico

-Mecanismos y factores que intervienen
en el fenómeno erosivo

- Acción de las precipitaciones

- Acción del flujo de escurrido

EROSIÓN

- **EROSIÓN.**- Desgaste de la superficie por la acción de los agentes externos como el agua y el viento.
- **EROSIÓN HÍDRICA.**- Proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua.



EROSIÓN

- ACTUAL O REAL VS POTENCIAL
- GEOLÓGICA VS ANTRÓPICA O ACELERADA



MECANISMOS DE ACCIÓN

MECANISMOS ZONALES



1) ACCIONES DE LA LLUVIA

- ✓ Efecto de la salpicadura de la gota: *Splash erosion* (Ellison).
- ✓ Tamaño de la gota en su viaje
- ✓ Velocidad terminal
- ✓ La disgregación es función del tiempo de duración de la lluvia
- ✓ La acción tiene una respuesta diferente según el tipo de suelo

2) ACCIONES DE ESCORRENTÍA

- ✓ Régimen de precipitaciones
- ✓ Tipos de suelos (capacidad e intensidad de infiltración)

1) ACCIONES DE LA LLUVIA

- a) Acción directa o disgregación por salpicadura**
- b) Acción indirecta o transporte**

2) ACCIONES DE ESCORRENTÍA

- a) Acción disgregadora**
- b) Acción de transporte**

ACCIONES DE LA LLUVIA

✓ Efecto de la salpicadura de la gota (Ellison). *Splash erosion*

✓ Tamaño de la gota en su viaje

✓ La disgregación es función del tiempo de **duración de la lluvia**

✓ La acción tiene una respuesta diferente según el **tipo de suelo**



Impacto de las gotas. Splash



ACCIONES DE ESCORRENTÍA

- ✓ Régimen de precipitaciones
- ✓ Tipos de suelos (capacidad e intensidad de **infiltración**)



Cuando la intensidad (I) es superior a la infiltración, se forma la escorrentía, origen fundamental de la erosión superficial.

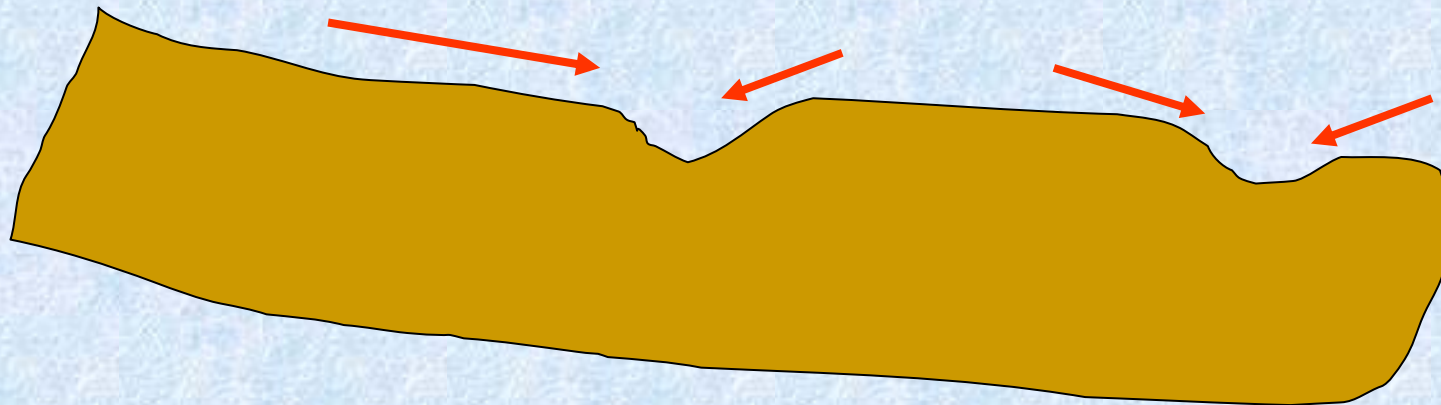
DISGREGACIÓN +TRANSPORTE

DISGREGACIÓN, por efecto directo de la lluvia

TRANSPORTE, por fricción o choque de la lámina contra el contorno sobre el que se moviliza (terreno, ladera, cauce,...)



a) Los regueros o surcos (rills)

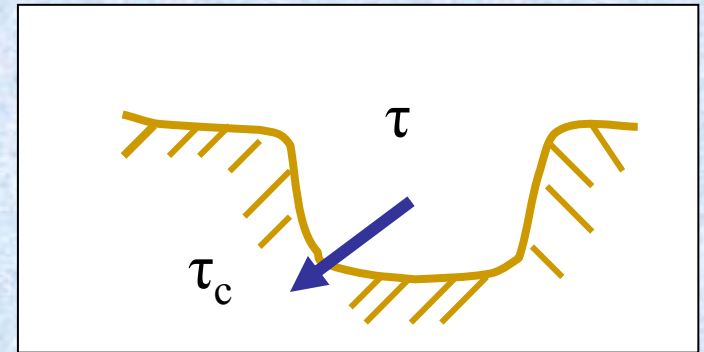


b) Los enterrerregueros o entresurcos (interrills)

Es el proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la concentración de un flujo en un surco o reguero

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c)$$

donde,



D_c , es la capacidad de disgregación del reguero por el agua limpia ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

K_r , es la erosionabilidad del reguero debida a la tensión tractiva hidráulica ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)

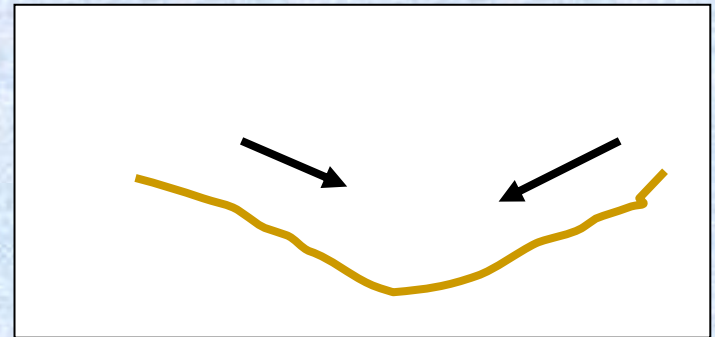
τ_c , es la tensión crítica por debajo de la cual la erosión no ocurre

τ , es la tensión tractiva (tensión hidráulica) del agua circulante (Pa)

Los enterrerregueros o entresurcos (interills)

Las zonas enterrerreguero, se definen como aquellas en las las que la erosión está dominada por la disgregación por los impactos de lluvia y el transporte por delgadas láminas de flujo

$$D_i = K_i I^2 S_f$$



donde,

D_i , es el valor de sedimentos de la zona enterrerreguero al reguero ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

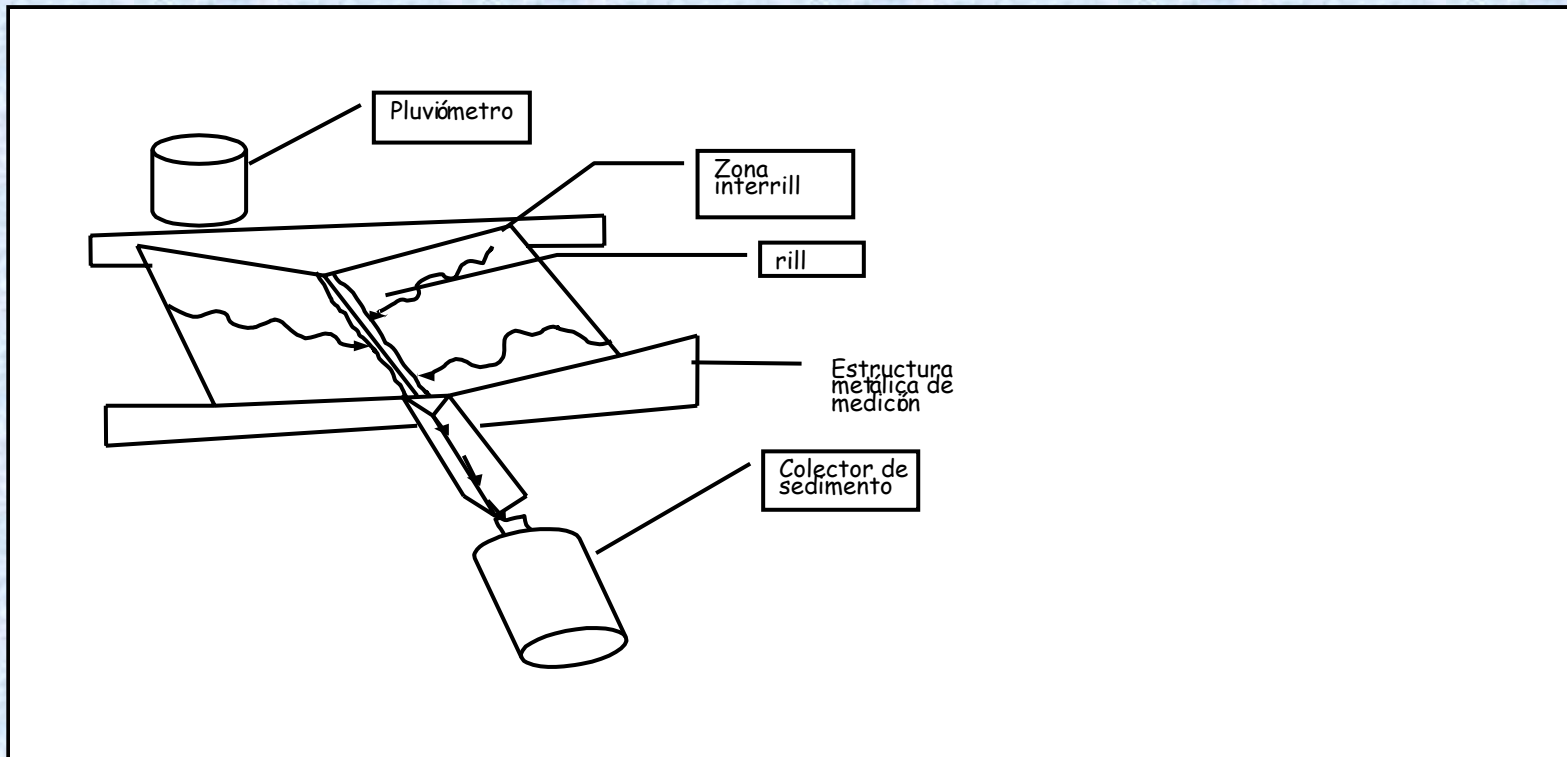
K_i , es el parámetro de erosionabilidad del área entresurco ($\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}$)

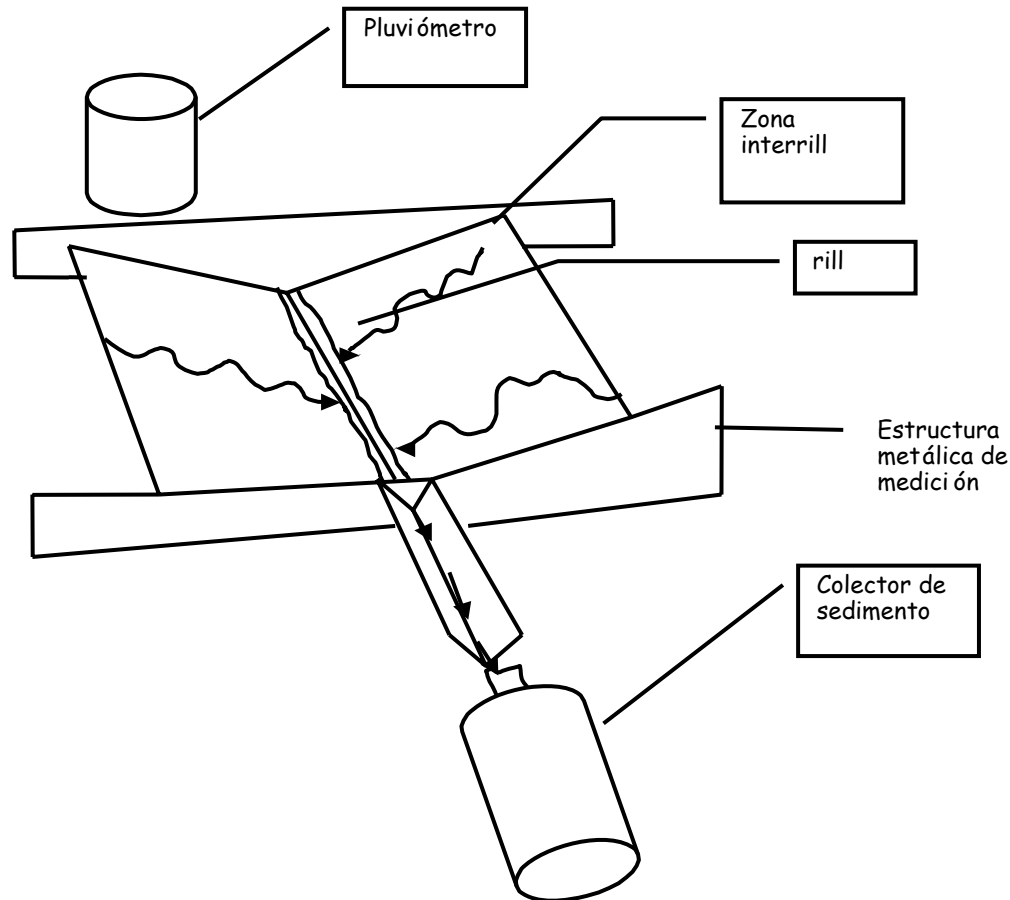
I , es la intensidad media de la lluvia ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

S_f , es el factor pendiente ($=1,05 - 0,85 e^{(-0,85 \text{ Sen}\theta)}$)

Los entrerregueros o entresurcos (interills)

La erosionabilidad del suelo, K_i , se puede medir en el terreno o en un laboratorio provisto de simuladores de lluvia. El tamaño de la parcela debe ser menor que 1m^2 , para asegurar que se produce únicamente erosión entrerreguero.





La estimación de la erosión entrerreguero se puede hacer a través de las propiedades del suelo:

Arcilla, agregados del suelo, magnesio, hierro, aluminio y conductividad hidráulica

Los entrerregueros o entresurcos (interills)

. En un experimento en 36 parcelas, el USDA ha determinado que la erosionabilidad de este tipo de zonas se podría estimar mediante las ecuaciones siguientes:

Para un contenido de arcilla > 35 %:

$$K_i \cdot 10^{-6} = 2,67 - 0,115 [\ln(18 - \text{Stab})^2]$$

Para un contenido de arcilla \leq 35 %:

$$K_i \cdot 10^{-6} = -2,92 - 2,71 [\text{WDC}/\text{C}] - 0,5 \text{ Mg} + 0,10 \text{ WDC} + 4,19 [\text{C} / (\text{Fe} + \text{Al})]^{0,16} + 1,24 \text{ Cond}$$

donde, K_i , es la erosionabilidad del entrerreguero, en $\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}$; C, es el contenido en arcilla, en %; Stab, es la estabilidad de los agregados < 0,25 mm, en %; WDC, es el agua dispersada en arcilla, en %; Mg, es el contenido en magnesio, en meq/100g; Fe, es el contenido en hierro, en meq/100gr; Al, es el contenido en aluminio, en meq/100gr; y Cond, es la conductividad eléctrica del suelo saturado, en mmhos.



Precipitación

Suelo

Relieve

Vegetación





Precipitación (I)

La unidad natural de este factor es el **aguacero**, asociado a las **precipitaciones máximas**, por ser éstas las productoras de mayores tasas de emisión de sedimentos.

Por tanto, como en todo estudio básico de precipitaciones extremas, hay que estudiar los tres parámetros hidrológicos fundamentales siguientes:

la intensidad (I), la duración (D) y la frecuencia (F).



Cuando la intensidad (I) es superior a la infiltración, se forma la escorrentía, origen fundamental de la erosión superficial, siendo evidente que los efectos revestirán una mayor o menor importancia según el tiempo de duración (D) del fenómeno.

Por otra parte, se ha comprobado que el impacto de las gotas de lluvia tiene mayores efectos erosivos para lluvias violentas (gotas más grandes y con mayor velocidad de caída).



En cuanto a la frecuencia (F) o período de retorno de los aguaceros, hay que tener en cuenta la influencia sobre el **estado anterior de humedad del suelo o humedad antecedente**.

- **Si los intervalos entre períodos de lluvia son cortos**, el contenido de humedad del suelo es elevado al iniciarse un nuevo aguacero y éste puede ocasionar escorrentías, aunque su intensidad sea baja.
- **Si los intervalos son largos**, el suelo prácticamente se llegará a secar, retardándose la formación de escorrentías superficiales, e incluso, puede que no lleguen a existir si la intensidad no es muy alta.

Como se puede deducir, hay una clara relación de los procesos erosivos con la Hidrología y el estudio analítico de los caudales líquidos.



La interrelación de los tres parámetros, **I-D-F**, es importante para tener una referencia acerca de la gravedad de la erosión.

Se ha comprobado que la erosión más importante se produce con fenómenos de moderada frecuencia e intensidad, porque los fenómenos extremos o catastróficos son demasiado infrecuentes para contribuir apreciablemente a la cantidad de suelo erosionado, cuando se consideran largos períodos de tiempo (Morgan, R.P.C, 1995).





Desde el **punto de vista energético** de la lluvia, se puede hablar de dos energías: la energía potencial y la energía cinética.

La energía potencial se convierte en cinética al ponerse en movimiento la gota de lluvia.

La energía cinética ($E_c = \frac{1}{2} mv^2$) depende estrechamente del **diámetro de la gota**, pues su valor está directamente ligado tanto con la masa, como con la velocidad.



La energía cinética de un episodio de lluvia depende de la distribución del tamaño de gotas, que a su vez es función de la intensidad de la precipitación. **Carter et al. (1974)** han demostrado que la distribución del tamaño de gotas de lluvia incluye una mayor proporción de gotas grandes, por encima de los 4 mm, para intensidades entre 50 y 100 mm/hora y más de 200 mm/hora; para otras intensidades hay muchas más gotas pequeñas (menores de 2,5 mm).





En cuanto a la frecuencia (F) o período de retorno de los aguaceros, hay que tener en cuenta la influencia sobre el estado anterior de humedad del suelo o humedad antecedente. Si los intervalos entre períodos de lluvia son cortos, el contenido de humedad del suelo es elevado al iniciarse un nuevo aguacero y éste puede ocasionar escorrentías, aunque su intensidad sea baja. Por el contrario, si los intervalos citados son largos, el suelo prácticamente se llegará a secar, retardándose la formación de escorrentías superficiales, e incluso, puede que no lleguen a existir si la intensidad no es muy alta. Como se puede deducir, hay una clara relación de los procesos erosivos con la Hidrología y el estudio analítico de los caudales líquidos.



Precipitación (VIII)



En consecuencia, la energía cinética de la precipitación presenta un máximo para intensidades comprendidas entre 50 y 100 mm/hora y mayores de 250 mm/hora.

Wischmeier y Smith (1978) utilizaron para la determinación del índice de erosividad del aguacero, R , la intensidad máxima observada en treinta minutos con un valor máximo de 100 mm/h. No obstante, Evans (1984) indica que, al no considerar estos autores la variación de la energía cinética con la intensidad de la precipitación, este índice sobreestima la energía de las precipitaciones con intensidades superiores a 100 mm/hora.

Por último, hay que tener en cuenta la relación del efecto mecánico de la gota de lluvia al chocar contra el suelo, con la intensidad de la lluvia y con la humedad antecedente. Estas relaciones se recogen actualmente en los principales modelos de erosión.



Las propiedades del suelo que definen su susceptibilidad a ser erosionado deben analizarse desde la óptica de los mecanismos erosivos.

Acción de impacto-disgregación

- ✓ Las que afectan a su resistencia a la fragmentación y a la dispersión por salpicadura.
- ✓ Las referentes a sus cualidades de infiltración.
- ✓ Las que caracterizan la resistencia a que el suelo sea transportado por el flujo de escorrentía (**Gandullo, 1988**).
- ✓ La cantidad de tierra desplazada por la percusión de las gotas de lluvia es tanto más grande cuanto más susceptibles sean las partículas a disgregarse.



En lo que concierne a la **acción del escurrido**, en primer lugar debe señalarse que la existencia de éste está condicionada por el poder de infiltración del suelo.

Para que las partículas sean arrastradas, deben tener cierto tamaño, y en éste influyen fundamentalmente la composición granulométrica y la propiedades físico-químicas del suelo.



a) Resistencia a la acción de las gotas de lluvia

Características de la infiltración:

-Características del suelo

-Características del agua

-Humedad del suelo

b) Resistencia al transporte



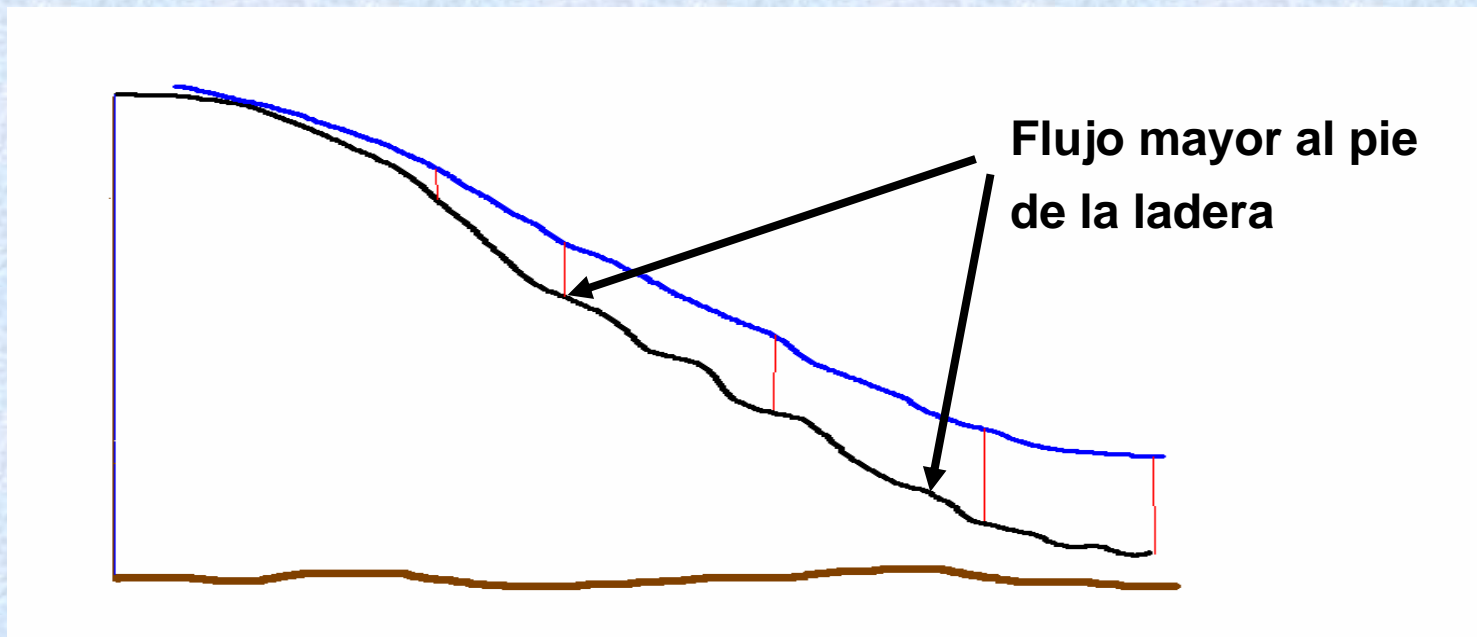
La erosión hídrica prácticamente no existe en zonas llanas, siendo únicamente en suelos en pendiente donde la percusión de las gotas de lluvia y la acción del flujo superficial llegan a ejercer efectos considerables.

Cuando el terreno es más o menos horizontal, el desplazamiento de partículas de tierra por el impacto de las gotas se hace en todos los sentidos, existiendo así una **compensación mutua o redistribución**.

Si el terreno es inclinado predominarán los desplazamientos hacia las zonas más bajas.



La influencia del relieve en la acción del escurrido encierra una mayor importancia. Para unas condiciones del medio natural determinadas, la potencia erosiva del flujo superficial y su capacidad de transporte son función de la **densidad de las aguas y de la velocidad con que éstas se mueven**. A su vez esta velocidad es mayor cuanto más grande sean la altura del flujo de escorrentía y el grado de pendiente del terreno.



Otra característica del relieve es...

La longitud de la pendiente.

Su influencia aparece al considerar que cada zona de una ladera está sometida a la escorrentía de zonas de mayor altitud; la altura del flujo en cada punto debe ser mayor a medida que aumenta su distancia a la cumbre, y, por consiguiente, se suelen presentar las manifestaciones erosivas más importantes en las zonas bajas de las laderas.



Una vez que concurren las condiciones para generar escorrentía comienza, gracias a la energía potencial que define el relieve, la circulación del flujo, y con él, los procesos de erosión, transporte y sedimentación.

A igualdad del resto de los factores, **un aumento de la pendiente** conlleva una mayor variación de la energía potencial por unidad de longitud recorrida por el flujo, y en consecuencia, un mayor incremento de la energía cinética y por tanto de la velocidad, aumentándose así su potencial erosivo (conviene aquí recordar que en los modelos de erosión el transporte por acarreo varía con la tercera-cuarta potencia de la velocidad).

Conclusión: El fenómeno erosivo será más intenso a medida que aumente la pendiente y la longitud de la ladera.



La influencia de la vegetación en el fenómeno erosivo obedece a diferentes causas. Las fundamentales son las siguientes:

- a) Protección del suelo frente al impacto de las gotas de lluvia.
- b) Aumento del poder de infiltración del suelo, disminuyendo el agua de escorrentía.
- c) En zonas arboladas los obstáculos que se oponen al escurrimiento, debido a los troncos de los árboles y tallos de los arbustos, reducen la velocidad del escurrido a la cuarta parte o quizás menos. Esto significa que la energía erosiva se reduce a una dieciseisava parte de la que resultaría en terreno desnudo.
- d) El entrelazado de las raíces da una mayor consistencia al suelo, afectando a mayor o menor profundidad según el tipo de vegetación existente.



De todo ello, se deduce que en las zonas de vegetación permanente, como los terrenos forestales, la erosión se reduce al mínimo.

Por tanto, la cubierta vegetal se presenta como un agente extraordinariamente eficaz en la disipación de la energía cinética de las gotas de lluvia, aunque en este papel destacan tanto la cubierta próxima al suelo o en contacto con él, como los restos de vegetación, ya que el dosel arbóreo, a partir de siete u ocho metros de altura, permite a las gotas recuperar casi por completo su velocidad terminal de caída, y con ella su energía cinética.



Interceptación-erosión

Desde el punto de vista de la erosividad de la lluvia, un dosel arbóreo que supere los 8 metros de altura tiene un efecto prácticamente despreciable.

Esta cubierta puede incluso provocar un aumento de la energía cinética de un aguacero, ya que las gotas que son interceptadas por las copas pueden aumentar su tamaño con lo que, al disponer de altura suficiente para alcanzar la velocidad terminal, llegan al suelo con más energía cinética que la que presentaban antes.

En un estudio experimental basado en la eliminación artificial del dosel arbóreo (*Acacia auruculiformis*), se observó que la presencia del dosel aumentaba el poder erosivo en un 24 % (Wiersum, 1985).



Influencia indirecta de la vegetación:

- a) **La disipación de la energía** de las gotas reduce considerablemente la fragmentación de los agregados del suelo, con lo que la incorporación de finos que obstruyen los poros y grietas es menor, manteniéndose la tasa de infiltración.
- b) **La penetración de las raíces en el suelo** genera, cuando éstas se descomponen, multitud de cavidades que aumentan la porosidad y por tanto la permeabilidad.
- c) **La incorporación de materia orgánica** mejora la estructura del suelo, y con ella su permeabilidad, resistencia a la acción de las gotas de lluvia y al transporte. Sin embargo, el efecto de estas mejoras no puede esperarse que sea muy importante allí donde las condiciones de clima, pendiente y cubierta sean adversas. Si el contenido en M.O. pasa del 1 al 1,5 %, el valor medio del factor K, en el modelo USLE, se reduce de 0,350 a 0,325, lo que implica una reducción de sólo el 7 % en la erosión predicha con este modelo (Young, 1989).
- d) **La evapotranspiración** asociada a la presencia de una cubierta vegetal contribuye a reducir la humedad del suelo, con lo que éste recupera su capacidad de infiltración más rápidamente.

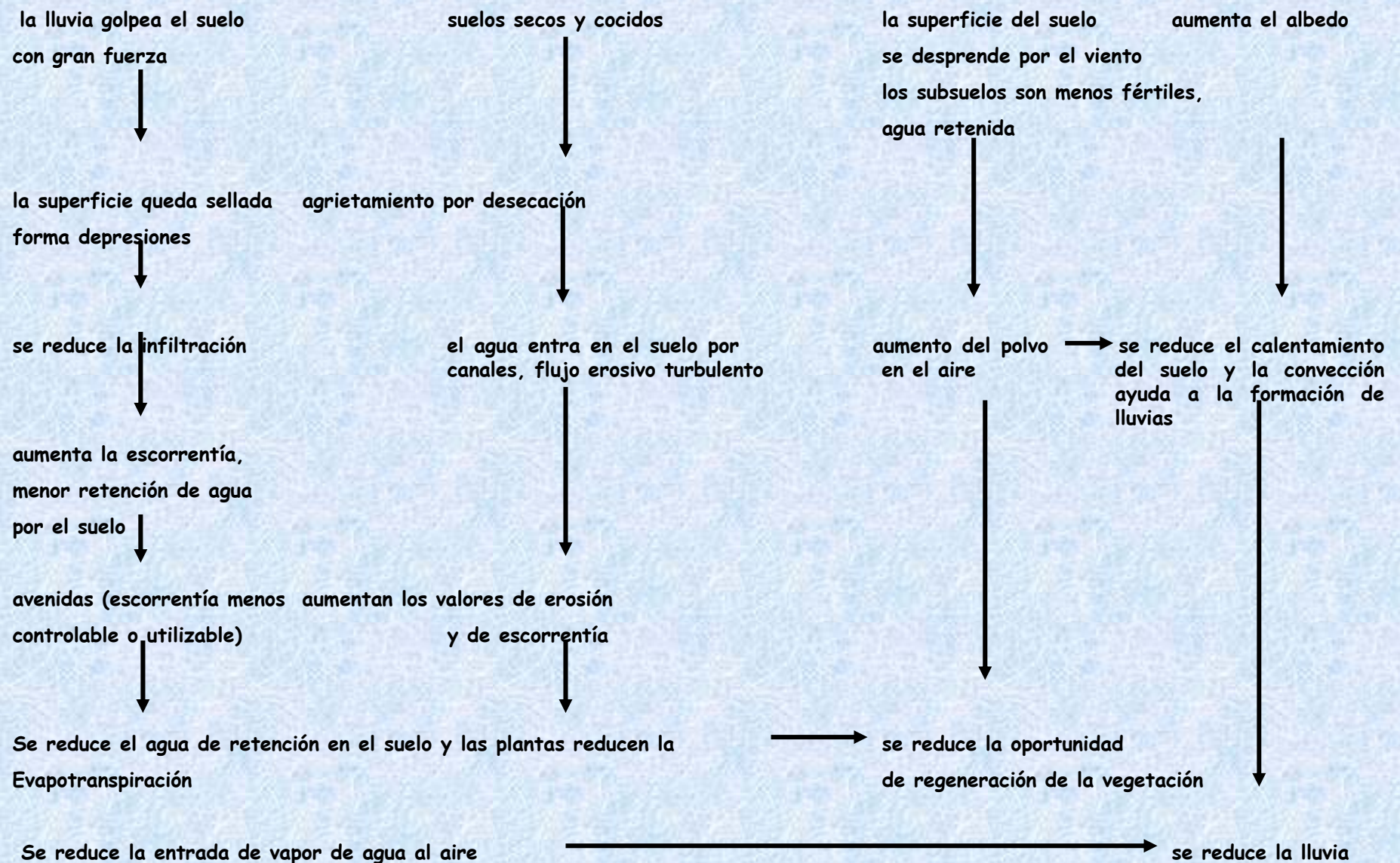


Los restos vegetales aumentan la **rugosidad superficial**, con lo que se reduce la velocidad de circulación de la escorrentía superficial y con ella la capacidad erosiva del flujo, favoreciendo además la formación de láminas de agua residuales que permanecen en reposo en contacto con el suelo. En conjunto, se aumenta el tiempo de contacto del agua con la superficie del suelo, y con él el volumen infiltrado.



Destrucción de la cubierta vegetal

Vegetación (VII)



La erosión hídrica: Aspectos geológicos y formas de manifestarse el fenómeno erosivo en el medio físico

- Formas de manifestarse la erosión:
 - a) Erosión en superficie
 - b) Erosión en profundidad



En superficie

Arranque de partículas y transporte por escorrentía.

Es debido al impacto de las gotas de lluvia (splash) y el posterior transporte por escorrentía

En profundidad

Es debido a la carga de agua en un macizo y la posterior acción de la gravedad

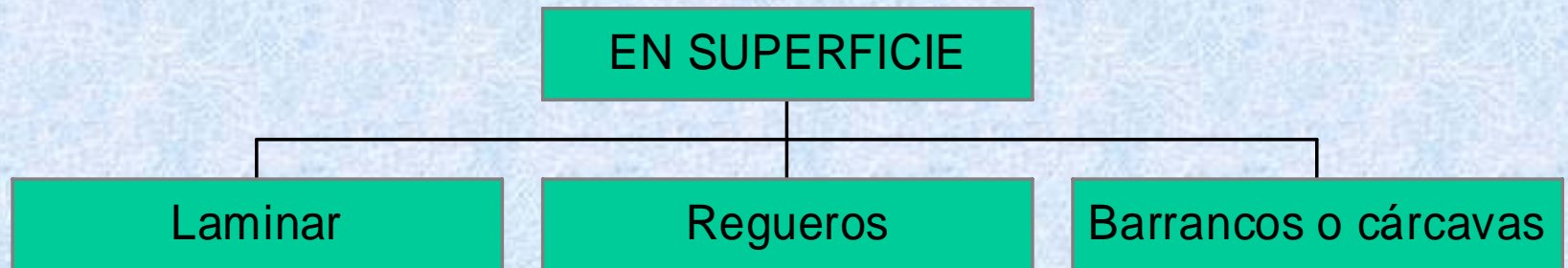


Formas (II)

Erosión en superficie	Erosión en profundidad (ó movimientos en masa)		
	Movimientos lentos	Movimientos rápidos	Deslizamientos
Erosión laminar	Reptación	Corrientes de barro	Desmoronamientos
Erosión en regueros	Solifluxión	Corrientes terrosas	Deslizamientos de detritus
Erosión en barrancos y cauces		Derrumbamientos	Caída de detritus
			Deslizamientos de rocas
			Alud de rocas



FORMAS DE EROSIÓN



Erosión laminar



EROSIÓN LAMINAR

- **Remoción de delgadas capas de suelo extendida más o menos uniformemente a toda la superficie.**
- **Causa.** Disgregación de los elementos terrosos por el impacto de las gotas de lluvia y por la acción de la escorrentía.
- **Efecto físico.** Formación de un flujo superficial homogéneo en laderas.
- **Daños.** Altamente peligrosa por ser la causa de grandes aportaciones sólidas a los cursos de agua.
- **Diagnóstico.** Empobrecimiento de la fertilidad del suelo.
 - **Difícil de visualizar**
 - **Se suele visualizar en zonas donde no hay vegetación**
 - **En suelos superficiales sobre subsuelo impermeable**
 - **Suelos con poca cohesión y escasa materia orgánica**



EROSIÓN LAMINAR

Síntomas

- 1) Descalce de raíces**
- 2) Montículos de depósito**
- 3) Invasión de especies de suelos degradados (especialistas)**
- 4) Abundancia de piedras sueltas análogas a las del perfil interior del suelo**





Erosión laminar y en regueros

Erosión en regueros



EROSIÓN EN REGUEROS

- **Arrastre de elementos terrosos al discurrir el agua por la superficie del suelo ocasionando la formación de surcos o regueros orientados más o menos ortogonales a las curvas de nivel.**
- **Causa.** Se producen cuando la escorrentía no es uniforme por toda la superficie, sino que se concentra en corrientes de potencia erosiva capaz de provocar pequeñas incisiones en el suelo
 - Con aguaceros de gran intensidad
 - Areas propicias:
 - terrenos agrícolas en fuertes pendientes
 - horizontes superiores heterogéneos
 - existencia previa de erosión laminar
- **Daños.** Son de gravedad, pero pueden atajarse a tiempo
- **Corrección.** Destruir su avance con maquinaria



Erosión en cárcavas



EROSIÓN EN CÁRCAVAS Y BARRANCOS

- **Profundas incisiones del terreno originadas generalmente cuando existe una gran concentración en alguna zona determinada.**
- **Causa**
 - Posterior a la laminar y en regueros
 - Al no corregir los surcos se inducen incisiones más profundas
 - Una gran violencia de las precipitaciones unida a unas condiciones propicias del suelo



Cuenca de
recepción

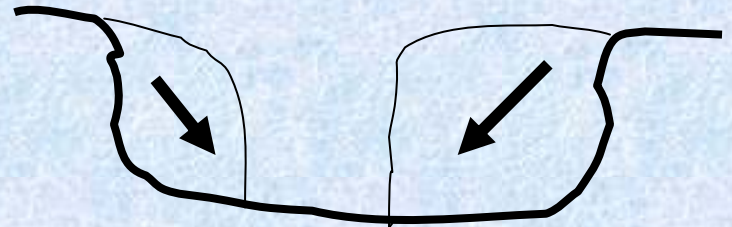
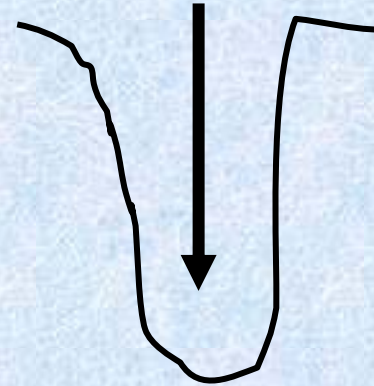
Dique gavión
en la garganta

Cono de
deyección



Evolución y formas

- Está en función de la consistencia relativa que ofrecen los diferentes estratos del suelo y subsuelo.
- a) **Desarrollo vertical.** Si existen estratos de consistencia uniforme.
- b) **Desarrollo horizontal.** Se profundiza y se incrementa la resistencia de capas.
- c) **Intermedios o mixtos**



FORMAS DE EROSIÓN EN PROFUNDIDAD

(Capítulo 19)

MOVIMIENTOS LENTOS. **REPTACIÓN Y SOLIFLUXIÓN**

MOVIMIENTOS RÁPIDOS

CORRIENTES DE BARRO

CORRIENTES TERROSAS

DERRUMBAMIENTOS

DESLIZAMIENTOS

DESMORONAMIENTOS

DESLIZ. ROCAS

DESLIZ. DETRITUS

ALUDES DE ROCAS

CAIDAS DE DETRITUS



Erosión eólica



Esta forma de erosión fue el origen de los estudios de la erosión hídrica

La importancia de las cifras y la buena referencia

Región	Erosión hídrica (10 ⁶ ha)	Erosión eólica (10 ⁶ ha)
África	227	186
Asia	441	222
Sudamérica	123	42
Centroamérica	46	5
Norteamérica	60	35
Europa	114	42
Oceanía	83	16
Total mundial	1094	548

Superficie afectada por la erosión hídrica y eólica a nivel global

Fuente: Oldeman, R.L. (1991-92). *“Global extent of soil degradation”*. Wageningen

