In: Andrés, P. y Rodríguez, R. (Eds)
2008. Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica
ISBN: ISBN: 978-84-96742-37-6. Documenta Universitaria. Girona (España)

CAPÍTULO 4
EROSIÓN: EVALUACIÓN DEL RIESGO EROSIVO Y PRÁCTICAS DE PROTECCIÓN DEL SUELO

Josep Maria Alcañiz

4.0 Introducción

La erosión es un proceso natural que conlleva la pérdida de suelo de un determinado lugar y que afecta a todos los terrenos que se encuentran expuestos a la acción de la lluvia o el viento. A una escala geológica, también se debe considerar la erosión fluvial y la producida por los glaciares. Los procesos erosivos se contraponen a los de formación de suelo por meteorización de las rocas o por acumulación de sedimentos. El proceso natural de la erosión se ve fuertemente incrementado en aquellas zonas donde las actividades humanas han modificado el equilibrio de los factores del medio natural, dejando el suelo desprotegido de la cubierta vegetal, compactando la superficie o alterando el flujo del agua de escorrentía. Las formas de erosión acelerada, que tienen su origen en el uso inadecuado o demasiado intenso del suelo, son las que se estudiaran en este capítulo, pues conllevan pérdidas sociales y económicas importantes en Centroamérica.

El suelo es una fina capa superficial de la Biosfera, en la que tienen lugar muchos procesos esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, por ejemplo, el suministro de agua y de nutrientes para las plantas, la descomposición de los restos orgánicos de los seres vivos, o la producción de fitomasa (tabla 4.1). Es un recurso natural limitado en extensión y en productividad, dado que no toda la superficie terrestre está cubierta de suelos, y que ni todos son aprovechables para las actividades humanas ni tienen la misma fertilidad. Existe una gran diversidad de suelos que difieren en composición y propiedades, por lo que la utilización correcta de este recurso debe atender a sus aptitudes naturales para cada tipo de uso. Además, se debe tener en cuenta que el tiempo de formación del suelo es muy superior al de los ciclos de las actividades humanas que pueden degradarlo, por lo que su correcta gestión y explotación debe hacerse considerando que es un recurso natural frágil y no renovable. El escenario del cambio climático que se refleja en un aumento de las temperaturas medias (mayor evapotranspiración) y un régimen de lluvias más irregular, pueden contribuir a incrementar las pérdidas de suelo por erosión.

Funciones del suelo	
Económicas	Producción de alimentos, fibras, energía, minerales, vías comunicación, etc.
Ecológicas	Suministro de nutrientes, reciclaje de materia orgánica, ciclo del agua, filtro de contaminantes.
Biológicas	Hábitat para la fauna y microorganismos, banco de genes, reserva de biodiversidad, etc.
Hidrológicas	Almacén de agua, control de la escorrentía, suministro para las plantas
Control de la contaminación	Fuente y sumidero para contaminantes, reciclaje residuos. Capacidad filtrante, Fuente y depósito de gases invernadero.
Paisaje y patrimonio cultural	Indicador de la evolución del paisaje, preservación material paleontológico

Tabla 4.1.- Funciones del suelo. Modificado a partir de Bullock et al, 1999.

Muchas de las actividades humanas que se desarrollan en el suelo comportan un riesgo importante de erosión, por lo que, en la mayoría de los casos, se hace necesaria la adopción de medidas de prevención y de conservación del suelo como, por ejemplo, el laboreo mínimo, labrar siguiendo las curvas de nivel o la reposición de la materia orgánica perdida con el estercolado. El laboreo intensivo continuado produce también un desplazamiento del suelo pendiente abajo que, a su vez, contribuye a la erosión (*tillage erosion*). La prevención y control de la erosión se convierten, pues, en una necesidad para el sostenimiento de las comunidades campesinas que dependen directamente de la productividad agrícola o ganadera de sus suelos, para asi contribuir a evitar la espiral de pobreza que genera la destrucción de los recursos naturales en muchos lugares de Centroamérica.

4.1 Los costes de la erosión

Los costes sociales y económicos de la erosión son complejos de calcular. Por una parte, se deben considerar las pérdidas de cosecha por reducción de la superficie de suelo cultivable o de su productividad (FAO, 1993). Hay que tener en cuenta que lo primero que se pierde por erosión es la parte superficial del suelo, generalmente la más fértil, por lo que el daño económico puede ser importante aunque no se pierda mucho espesor de suelo. Debemos añadir también los costes por el mayor requerimiento de fertilizantes y por un mayor consumo de combustible o de esfuerzo en suelos erosionados. Entre los costes indirectos de la erosión se deben incluir los derivados de la contaminación de las aguas, el colmatado de embalses por los sedimentos, el incremento del riesgo de inundación al disminuir la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos erosionados, la pérdida de biodiversidad, o los relacionados con el incremento

de polvo atmosférico en zonas afectadas por erosión eólica, lo que tiene repercusiones en los costes de la sanidad o en el mantenimiento de los filtros de los motores de combustión. En la tabla 4.2 se citan las principales causas y algunos efectos de los procesos erosivos.

Proceso Erosivo	Causas principales	Efectos socio-económicos
Deslaves y derrumbes	Deforestación Cambios de uso del suelo Sobreexplotación del suelo Pendiente elevada Composición del suelo	Pérdida de vidas humanas Daños en viviendas e infraestructuras Pérdida de suelos agrícolas Alteración del paisaje
Pérdida de suelos	Deforestación Cambios de uso del suelo Sobreexplotación del suelo Erosión hídrica Erosión eólica	Pérdida de productividad de la tierra Mayor presión sobre recursos naturales Emigraciones
Desbordamiento de ríos	Deforestación de cuencas Ampliación de la frontera agrícola Vías de comunicación mal ubicadas Deterioro de los drenajes naturales Urbanización de las llanuras aluviales	Pérdida de vidas humanas Destrucción de infraestructuras Inundaciones Pérdidas de cultivos Contaminación de las aguas Enfermedades

Tabla 4.2.- Algunas causas y efectos de la erosión. Fuente: elaboración propia.

4.2 Tipos de erosión

La superficie terrestre se ve afectada por la acción de fuerzas naturales que producen o facilitan el desplazamiento de partículas individuales o de la masa del suelo. La fuerza de la gravedad es el principal motor de los procesos erosivos pero, por sí misma, solo es capaz de producir erosión cuando la pendiente es suficientemente elevada para permitir el deslizamiento del suelo. En este caso, ocurren los movimientos en masa, como los deslaves, derrumbes, reptaciones, etc. Cuando, además de la gravedad, interviene la energía cinética de un fluido como el aire o el agua, los desplazamientos de partículas son muy importantes y extensos. En el caso de la **erosión eólica** las partículas pueden ser transportadas por el viento a grandes distancias. La **erosión hídrica**, no obstante, es la que tiene mayores repercusiones ambientales y económicas en el contexto centroamericano y es la que se estudiará con detalle en este capítulo. En la figura 4.1 se muestra una clasificación de los tipos de erosión.

4.3 Tasas de erosión tolerables

Todo uso del suelo conlleva un riesgo de erosión determinado, por lo que es conveniente establecer unos valores máximos de pérdida de suelo que se considere que permiten un uso sostenible del mismo, sin perjudicar a las funciones ambientales y económicas que debe realizar. La tasa de erosión tolerable debe ser menor o igual a la tasa de formación o de recuperación natural del suelo. Para suelos agrícolas de climas templados o cálidos, la FAO propone como tasa aceptable pérdidas inferiores a las 10 Mg ha^{-1} a^{-1} pero, en condiciones climáticas desfavorables a la meteorización, o en suelos muy delgados, este valor puede ser excesivo. La pérdida de 1mm de suelo equivale aproximadamente a la pérdida de entre 10 y 15 toneladas por hectárea del mismo.

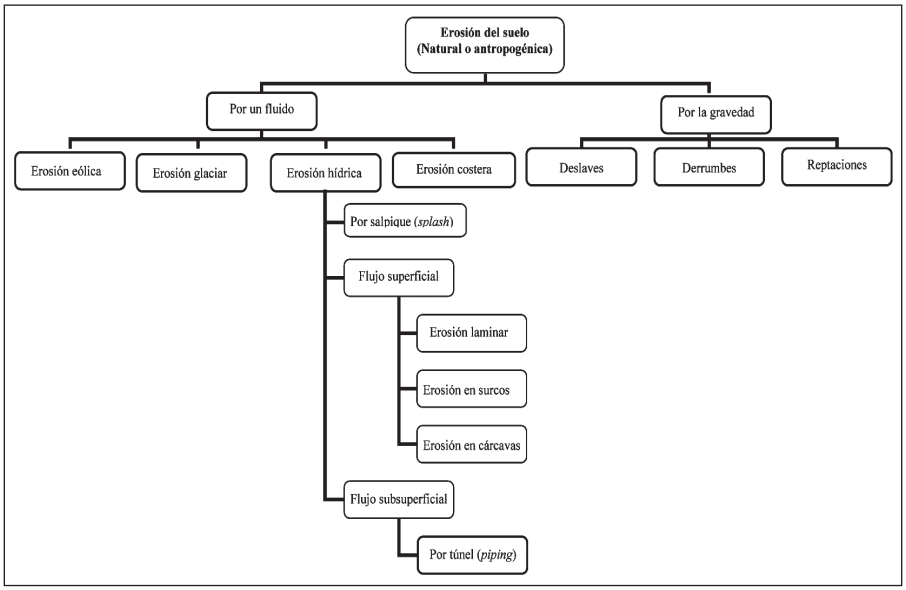


Figura 4.1.- Tipos de erosión en función del agente dominante. Fuente: Modificado a partir de Lal, 1990.

Desde un punto de vista aplicado, se puede definir el concepto de **vida útil** de un suelo (L) frente a una tasa de erosión, como el tiempo en que permanecerá productivo afectado por esta tasa de erosión (Stoking & Pain, 1983).

$$L = (P_i - P_0)da / (Z-Z_0)$$

donde:

P_i = profundidad actual (m)

P_0 = profundidad mínima efectiva (m)

da = densidad aparente (Mg m^{-3} 10^3)

Z = tasa de degradación anual media (Mg ha^{-1} a^{-1})

Z_0 = tasa de erosión tolerable (Mg ha^{-1} a^{-1})

En la tabla 4.3 se muestra un ejemplo de la vida útil de dos suelos de distinta textura, sometidos a distintos grados de erosión. Estos datos deben ser considerados como un ejercicio para poder estimar el efecto que puede tener sobre un determinado suelo distintas prácticas de cultivo más o menos erosivas, pero no para calcular pérdidas reales.

Debe tenerse en cuenta que la erosión hídrica no es un proceso continuo de degradación, sino que se produce por eventos de lluvia muy irregulares en intensidad y frecuencia. Por lo tanto, las tasas medias de erosión solo tienen un valor indicativo. Para establecer grados de intensidad de la erosión hídrica, la FAO (1979) propuso las categorías que se muestran en la tabla 4.4.

Tipo de suelo	**Textura Franco-arenosa**			**Textura arcillosa**		
Densidad aparente (Mg $ha^{-1}m^{-1}$)	14 000			13 000		
Tasa aceptable (Mg ha^{-1} a^{-1})	1			1		
Profundidad mínima útil (m)	0,20			0,15		
Profundidad actual (m)	0,5	0,3	0,25	0,3	0,25	0,20
Tasas erosión (Mg $ha^{-1}a^{-1}$)	**Vida útil** (años)					
2	2800	1400	700	1950	1300	650
5	700	350	175	488	325	163
10	311	156	78	217	144	72
20	147	74	37	103	68	34
50	57	29	14	40	27	13
100	28	14	7	20	13	7

Tabla 4.3.- Ejemplo de vida útil frente a diferentes tasas de erosión. Fuente: Stoking and Pain, 1983.

Intensidad	Mg ha^{-1} a^{-1}	mm a^{-1}
Ligera	<10	<0,6
Moderada	10-50	0,6- 3,3
Alta	50-200	3,3-13,3
Muy alta	>200	>13,3

Tabla 4.4.- Categorías para considerar distintos grados de erosión hídrica, expresadas en Mg ha^{-1} a^{-1} y en mm a^{-1}. Fuente: FAO, 1979.

4.4 Procesos que intervienen en la erosión hídrica

Desde el momento en que una gota de lluvia incide sobre la superficie del suelo, tienen lugar una secuencia de procesos que producen el desplazamiento y el transporte de partículas. A efectos de estudio es conveniente diferenciar entre los siguientes tipos si bien en la mayoría de casos se dan simultáneamente:

- Erosión por salpicadura, chapoteo (*splash*)
- Erosión por escorrentía superficial *(overland flow)*
- Flujo laminar o difuso (*sheet erosion, inter-rill erosion*)
- Flujo concentrado (*rill erosion, gully erosion*)
- Erosión por flujo subsuperficial (*piping*)
- Movimientos en masa
  - — Deslaves (flujos de barro)
  - — Derrumbes (deslizamientos por gravedad)

4.4.1 Erosión por salpicadura (splash)

Consiste en el arranque y desplazamiento de partículas del suelo por impacto de las gotas de lluvia (Figura 4.2). Depende sobre todo de la energía cinética con que impactan las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo. Cada tormenta aportará una energía cinética acumulada en función de las dimensiones de las gotas (intensidad de la lluvia) y de la cantidad de agua caída. Depende también de la resistencia específica de cada suelo a este proceso erosivo, es decir de la estabilidad de la estructura, de la textura, contenido de materia orgánica, cobertura vegetal, etc. En la superficie de los suelos afectados por este proceso se observa a menudo la aparición de "pináculos" (Figura 4.2). Para medir la cantidad de partículas desplazadas por el salpique se utilizan embudos o tazas situadas a nivel del terreno, o mejor las denominadas **tazas de Morgan** que permiten cuantificar el desplazamiento en una ladera (Porta et al, 2003).

4.4.2 Erosión laminar (sheet erosion)

Se produce por la circulación de una lámina fina de agua por la ladera, siempre que la superficie sea uniforme. Para que aparezca la escorrentía sobre la superficie del suelo la intensidad de la precipitación debe ser mayor que la capacidad de infiltración del suelo (**flujo hortoniano**), o bien que esté ya saturado. La velocidad del agua de escorrentía laminar es limitada, por lo que la capacidad de arrastre también, lo que selecciona partículas de tamaño pequeño y afecta a una superficie relativamente amplia. Como consecuencia, en la superficie de un suelo

afectado por este tipo de erosión puede aparecer una capa de gravas o piedras, más o menos continua, acumuladas. Se denomina también **erosión entre-surcos** (*inter-rill erosion*) porque ocupa las superficies más o menos regulares que hay entre dos canales o surcos (Figura 4.3).

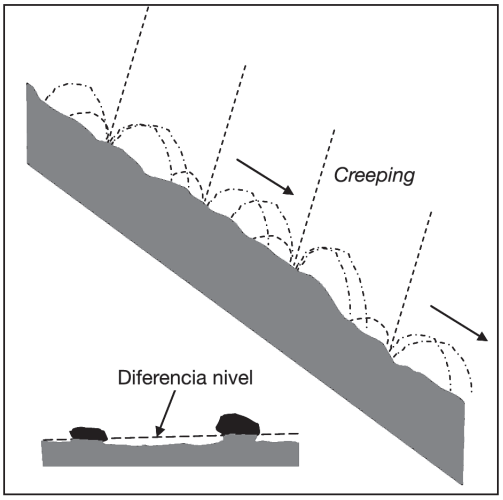


Figura 4.2.- (a) Desplazamiento de partículas en una ladera producido por el salpique. (b) Aparición de pináculos o micropedestales bajo las piedras que actúan de escudo protector. Fuente: elaboración propia.

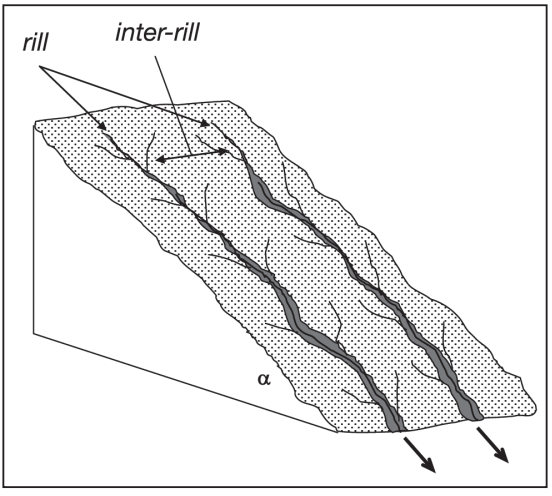


Figura 4.3.- La erosión laminar predomina en las superficies regulares de una ladera situada entre dos surcos (sheet erosion). En estos se concentra el flujo de agua y aumenta la capacidad de socavación y arrastre (rill erosion). Fuente: elaboración propia.

La erosión laminar depende principalmente de la intensidad de la precipitación y de la erosionabilidad del suelo.

$$D_i \sim k_i I^2$$

donde:

D_i = flujo de sedimento

k_i = erosionabilidad del suelo

I= intensidad de la lluvia

Para medir la erosión laminar se emplean los llamados **canales Gerlach**, que consisten en un canal situado a ras del suelo, con uno de los bordes laterales perfectamente acoplado a la superficie del terreno. El colector tiene un desagüe conectado a un depósito que almacena el agua y las partículas transportadas por la escorrentía. Una tapa semiabierta evita la entrada directa de agua de lluvia en el canal. También se pueden emplear estaquillas o clavos fijados en el suelo (*erosion pins*) repartidos por una ladera o talud, que permiten medir periódicamente la distancia entre el extremo superior y la superficie del terreno. Las variaciones en relación al nivel del suelo dependen de las pérdidas o acumulaciones producidas por la erosión.

4.4.3 Erosión por escorrentía concentrada

Se produce por la concentración del flujo superficial en cicatrices o incisiones lineales sobre el terreno (Figura 4.3). La capacidad de transporte de partículas aumenta al crecer la velocidad del agua en el surco y también al aumentar la densidad del fluido por la mayor concentración de partículas en suspensión. En esta situación se produce la **socavación** de las paredes del cauce que suministra más partículas y también **erosión remontante**. Adopta distintas morfologías lineales y tamaños excavados por la fuerza erosiva del agua: **surcos**, **regueros** *(rill)* que pueden ser eliminados fácilmente por las operaciones de laboreo, **arroyaderos** o **cárcavas** *(gully)* de varios decímetros de profundidad y **barrancos** de dimensiones métricas que, cuando se anastomosan, confieren al paisaje un aspecto desertizado (*badlands*). Este tipo de erosión es muy destructiva y debe combatirse desde su inicio evitando la formación de surcos largos. Se puede expresar como capacidad de socavación del suelo, que es función de la erosionabilidad del reguero y la fuerza hidráulica de socavación. A su vez, influyen la pendiente del surco, su longitud y el área de captación.

$$D_c \sim k_r (\tau - \tau_c)$$

donde:

D_c = Capacidad de socavación

k_r = erosionabilidad del reguero

τ = fuerza hidráulica de socavación

τ_c = fuerza hidráulica crítica

Se puede medir por técnicas microtopográficas, estableciendo microperfiles o midiendo el volumen de las cárcavas. Existen métodos de campo para estimar las pérdidas de suelo, por ejemplo, el denominado **VADEA** (Valoración del daño por erosión actual) publicado por Herwerg (1996) y que, por su simplicidad, ha tenido una considerable difusión en Centroamérica. Se trata de un procedimiento rápido, de bajo coste, pensado para evaluar los daños más que para cuantificar la erosión. Se centra en la medida de cárcavas y surcos de erosión, y está muy adaptado a la agricultura de laderas.

4.4.4 Erosión por flujo subsuperficial (Piping)

Consiste en la formación de túneles, grietas o cavidades tubulares dentro del suelo por la circulación subsuperficial del agua, que socava el terreno. Puede estar asociada a galerías de animales. En fases avanzadas, se producen pequeños hundimientos o deslizamientos. Se produce también en terrenos que presentan cambios bruscos de permeabilidad interna, grietas, o suelo dispersable (arcillas sódicas).

4.5 Movimientos en masa

Consisten en el desplazamiento de una masa importante de suelo por acción del agua y de la gravedad. Se clasifican en función de los mecanismos de ruptura dominantes: **desprendimientos**, **derrumbes** y **vuelcos** cuando la fuerza de la gravedad predomina, aunque la lluvia o la escorrentía sean la causa que origina el movimiento. Se describen como **deslizamientos** cuando la masa de suelo se desplaza conservando la disposición original de las capas y pueden ser **rotacionales** o **translacionales** según la forma del plano de deslizamiento. Cuando el suelo queda saturado de agua, puede pasar de estado sólido a fluido, produciendo una colada o flujo de suelo que generalmente es muy destructivo. Son los denominados **deslaves**, muy frecuentes en las laderas de Centroamérica afectadas por los huracanes.

En la aparición de movimientos en masa influyen varios factores, como el tipo de sustrato geológico y la topografía por un lado (factores pasivos), y la pluviometría, sismicidad y acciones antrópicas (factores activos) por otro.

4.6 Erosión por laboreo (tillage erosion)

Actualmente, entre los fenómenos erosivos se incluyen también los desplazamientos de suelo producidos por los arados de vertedera y otros aperos agrícolas en laderas que son labradas repetidamente. Las partes culminales de las lomas pueden quedar desprovistos de suelo que se acumula en el pie de monte.

4.7 Modelos para estimar las pérdidas de suelo

La importancia económica y las repercusiones ambientales que tiene la erosión han llevado al desarrollo de muchos modelos para estimar las pérdidas de suelo, especialmente en áreas de cultivo o cuencas hidrográficas. La complejidad de los procesos erosivos, los muchos factores que intervienen y la irregularidad espacial y temporal, suponen una dificultad para poder hacer predicciones de las pérdidas de suelo que sean fiables. En los apartados anteriores, se han citado algunos métodos para medir las pérdidas reales de suelo que han producido determinados eventos de lluvia. También se recurre a la medida de los sedimentos transportados por un río, que proceden de la erosión que se da en una determinada cuenca, si bien estos datos no están directamente relacionados con las pérdidas de suelo que se originan a nivel de ladera o parcela y que son los que más interés tienen en la gestión agroambiental de una zona. Debe tenerse en cuenta que los sedimentos en suspensión transportados por un río son tan solo una parte del material erosionado en la cuenca, dado que una parte importante sedimenta a poca distancia del origen y que se producen removilizaciones en el propio cauce. Se pueden obtener medidas más precisas del suelo erosionado en una ladera instalando parcelas con colectores de sedimentos en su base. Estos datos son importantes para poder medir las pérdidas reales de suelo y poder validar los modelos de predicción de la erosión.

Los modelos que tratan de estimar las pérdidas de suelo se pueden subdividir en dos grupos. Aquellos que se basan en los procesos físicos que tienen lugar en la erosión, es decir que se basan en ecuaciones matemáticas que tienen en cuenta las leyes de conservación de la masa y la energía, y los modelos empíricos que utilizan una serie de algoritmos matemáticos y de correlaciones con factores erosivos, pero sin que se pueda establecer una relación directa de causa-efecto con las pérdidas de suelo. Estos últimos suelen ser del tipo "caja negra", es decir, que se conocen las entradas y salidas principales del sistema, pero no el funcionamiento del proceso. Conviene recordar que los modelos para predecir la erosión han sido establecidos considerando unos límites para cada variable, por lo que no se debe extrapolar su uso fuera de estos márgenes. Los resultados que proporciona un modelo deben interpretarse correctamente. Por ejemplo, si proporciona valores medios anuales de pérdida de suelo, no podemos utilizarlo para calcular la erosión que producirá un evento concreto de lluvia. Dada la complejidad de los fenómenos naturales que intervienen en la erosión,

hay modelos que tienen un enfoque probabilístico, es decir que asocian una probabilidad a cada suceso erosivo. De entre los modelos existentes podemos destacar los siguientes.

— **El modelo CREAMS** (*Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*). Establecido por Knisel (1980), combina una componente hidrológica con la erosión-sedimentación y la concentración de nutrientes. Predice pérdidas anuales o mensuales, aunque necesita muchos datos meteorológicos y de condiciones de uso del suelo.

— **El modelo WEPP** (*Water Erosion Prediction Project*). Es un modelo basado en procesos físicos y trabaja con cálculos diarios. Se basa en que el arranque de partículas y su deposición en los surcos depende de la capacidad de transporte del flujo de escorrentía.

— **El modelo KINEROS2** (*A Kinematic Runoff and Erosion Model*). Está diseñado para modelar la intercepción, la infiltración, la escorrentía superficial y la erosión que producirían eventos de lluvia individuales (Smith et al., 1995).

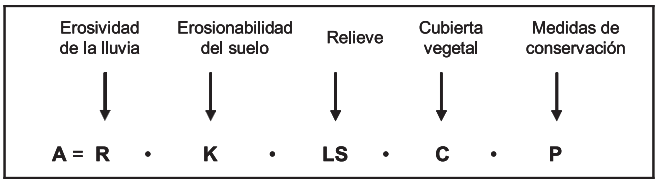
— **El modelo EUROSEM** (*European Soil Erosion Model*). Propuesto por Morgan et al. (1994), es un modelo físico parecido a KINEROS2 que simula eventos de escorrentía.

— **La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)**. Es, sin duda, el modelo de caja negra que ha tenido más difusión. Fue propuesto por Wischmeier y Smith (1978) y resulta útil para tomar decisiones sobre el uso y la conservación del suelo. Considera seis factores y estima las pérdidas medias anuales de suelo a nivel de parcela agrícola o laderas de pendiente moderada. Ha sido actualizado y ampliado en diferentes versiones (*RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation*).

4.7.1 Ecuación universal de la pérdida de suelo y sus versiones actualizadas

4.7.1.1 Estructura de la USLE

La USLE es un modelo relativamente simple, que considera que las perdidas de suelo en una finca o parcela agrícola dependen de la agresividad de cada episodio de precipitación, de la capacidad de resistencia de cada suelo al impacto de las gotas de lluvia, de la pendiente de la ladera, de la longitud que recorre el agua de escorrentía en la ladera, siendo estas pérdidas modificadas por el grado de protección que ofrece la cubierta vegetal o las prácticas de conservación que se apliquen. El esquema del modelo es el siguiente:



donde:

A = Estimación de las pérdidas medias por erosión anual (Mg ha^{-1} a^{-1})

R = Erosividad de la lluvia (MJ ha^{-1} mm h^{-1} a^{-1})

K = Erosionabilidad del suelo-*erodibility* (Mg ha^{-1} a^{-1})

L = Factor longitud ladera (adimensional)

S = Factor pendiente (adimensional)

C = Protección del suelo por el cultivo o vegetación (adimensional)

P = Factor prácticas de conservación del suelo (adimensional)

El modelo da una estimación de la cantidad media anual de suelo que se puede perder en una finca agrícola, pero no tiene en cuenta si ha habido erosión y sedimentación dentro de la propia parcela. Más información sobre las limitaciones de la USLE se puede consultar en Hudson (1993). También existen hojas de cálculo que facilitan las operaciones necesarias para estimar las pérdidas de suelo según USLE (ver en referencias, Internet).

A continuación, se presenta un resumen de cada uno de los factores considerados en USLE.

4.7.1.2 Factor erosividad de la lluvia (factor R)

Depende de la intensidad de la lluvia y de la cantidad de agua caída en cada episodio de precipitación a lo largo de años. Se calcula como la suma de los productos de la energía cinética de cada episodio de lluvia por su intensidad máxima, considerando intervalos de 30 minutos.

$R = \sum E\, I_{30}$

donde:

E = energía cinética de la lluvia

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos de cada episodio (mm h^{-1})

Para su cálculo, se necesita disponer de información de estaciones pluviométricas que hayan registrado de forma detallada la cantidad de agua de lluvia en función del tiempo durante unos 10 años. Este factor se basa en que las lluvias de mayor

intensidad contienen una proporción mayor de gotas de tamaño grande, por lo que la energía cinética con que impactan sobre la superficie del suelo es también mayor. Existen diversas ecuaciones que relacionan la intensidad de la lluvia con la energía cinética equivalente, por ejemplo la que fue propuesta por Wischmeier & Smith,

$$Ec_i = 11{,}87 + 8{,}73 \log I_i \quad (Jm^{-2}\ mm^{-1})$$

El detalle del procedimiento de cálculo se puede consultar en Porta et al. (2003). Es importante resaltar que la erosión es un fenómeno muy irregular que se origina de forma mayoritaria durante intervalos de tiempo relativamente cortos de precipitación muy intensa. Por lo tanto, las intensidades medias de precipitación diaria no sirven para estimar la agresividad de la lluvia. En la tabla 4.5 se muestra un ejemplo de los valores de intensidad y de energía cinética correspondientes a episodios de lluvia ocurridos en una localidad de Cataluña (NE, España).

En la USLE no se tiene en cuenta de forma directa la capacidad erosiva de la escorrentía superficial y, por lo tanto, es un modelo que explica mejor la erosión por salpique o de tipo laminar que la de flujo concentrado.

Evento Nº	Fecha	Precipitación total (mm)	I_{30} (mm h^{-1})	I_{15} (mm h^{-1})	EC (MJ ha^{-1})	R = EC*I_{30} (MJ ha^{-1} mm h^{-1})
1	22/05/2001	16,6	19,2	22,4	3,11	59,7
2	15/07/2001	22,4	26,4	48,8	4,37	115,3
3	19/07/2001	31,4	8,8	11,2	5,57	49,0
4	30/08/2001	15,2	14,8	27,2	2,84	42,1
5	17/09/2001	24,0	23,6	25,6	4,78	112,7
6	22/09/2001	15,0	6,0	7,2	2,31	13,9
7	18/10/2001	19,0	9,6	10,4	3,53	33,9
8	20/10/2001	15,8	9,2	12,8	2,61	24,0
9	15/11/2001	35,8	6,8	8,8	5,93	40,3
10	16/11/2001	27,4	11,6	15,2	4,48	52,0
11	05/03/2002	18,6	6,0	7,2	2,60	15,6
12	03/04/2002	41,0	12	13,6	7,11	85,3
13	07/04/2002	14,6	4,8	5,6	2,02	9,7
14	02/05/2002	17,2	2,4	3,4	2,29	5,5

Tabla 4.5.- Precipitación total, I_{30}, I_{15}, energía cinética y erosividad de la lluvia, calculados a partir de los registros pluviométricos de una estación meteorológica situada en Taradell (NE España). Fuente: elaboración propia.

4.7.1.3 Factor K - erosionabilidad (erodibility)

Expresa el conjunto de factores intrínsecos de cada suelo que influyen sobre la erosión, es decir, indica la vulnerabilidad específica de cada tipo de suelo.

Representa la pérdida anual de suelo por unidad de factor R. Depende por lo tanto de la textura y estructura (tipo y estabilidad) del suelo, del contenido de materia orgánica, de la capacidad de infiltración, de la pedregosidad superficial, etc. El establecimiento de este parámetro en el modelo se realizó en parcelas experimentales tipo USLE (22m de largo por 5m de ancho aproximadamente) en las que se midió la cantidad de suelo perdido por unidad de precipitación erosiva. También se puede recurrir al empleo de simuladores de lluvia, que permiten comparar suelos distintos bajo unas mismas condiciones de precipitación.

Cuando la USLE se emplea para estimar las pérdidas potenciales de suelo en función de distintos manejos o prácticas de conservación, se suele determinar el factor K mediante figuras que dan un valor aproximado en función del contenido de limo y arena muy fina, porcentaje de arena gruesa y contenido de materia orgánica del suelo. Se suele afinar el valor de K considerando también el tipo de estructura del suelo y la clase de permeabilidad.

4.7.1.4 Factores topográficos (S, L)

Expresan las pérdidas de suelo en función de la inclinación de la ladera y del recorrido máximo del agua de escorrentía a lo largo de una vertiente, siguiendo la línea de máxima pendiente. El factor L viene definido por el número de unidades de longitud de la parcela USLE estándar:

$$L = \left(\frac{l}{22{,}13} \right)^{m}$$

donde:

L = valor del factor

l = longitud de la ladera considerada en m

m = exponente que depende del tipo de pendiente:

m = 0,6 para pendientes > 10%

m = 0,5 para pendientes 10-3%

m = 0,3 para pendientes <3 y de mucha longitud

El factor S depende de la pendiente de la ladera o parcela:

$$S = \frac{0{,}43 + 0{,}30s + 0{,}043s^2}{6{,}613}$$

donde s = pendiente en %

Muchas veces, se calculan de forma combinada los factores LS y se emplean nomogramas para su determinación gráfica aproximada (ver en referencias, Internet). No se consideran la rugosidad ni la forma de la pendiente, por lo que en laderas irregulares puede dar resultados alejados de los reales.

4.7.1.5 Factor cubierta del suelo (C)

Expresa la protección del suelo por la cubierta vegetal en comparación con el suelo desnudo (C=1). Puede variar mucho estacionalmente en terrenos con vegetación caducifolia y en suelos de cultivo. Lo que importa es el recubrimiento efectivo del suelo por la vegetación más que la densidad de la formación vegetal. En suelos agrícolas, se debería calcular un factor C para cada tipo de cultivo y periodo vegetativo. Existen muchas tablas publicadas de valores del factor C, por ejemplo en Porta et al. (2003), pero se deberían escoger aquellas que reflejen mejor el tipo de cultivo o de vegetación de cada región.

4.7.1.6 Factor prácticas de protección del suelo (P)

Representa la reducción de las pérdidas de suelo cuando se emplean técnicas de conservación, en comparación con las que ocurrirían si no se aplicaran. Permite evaluar la eficacia de diversas técnicas de conservación de suelos en la reducción de la erosión y ser utilizado como instrumento de gestión, ya que si se fija una pérdida máxima tolerable de suelo, nos indica las prácticas de conservación más eficientes para conseguir este objetivo. Este factor toma el valor 1 en la peor de las situaciones, es decir con el suelo en barbecho, labrado en el sentido de máxima pendiente, y su valor disminuye cuanto más eficiente sea la medida tomada. Entre las prácticas de conservación habituales estarían el cultivo a nivel, el cultivo en franjas, la construcción de terrazas y bancales, las técnicas de laboreo mínimo, etc.

4.7.2 Modelos derivados, la RUSLE y la MUSLE

El modelo básico de la USLE se ha mantenido, si bien las versiones revisadas (**RUSLE**) incluyen mejoras en la medida de la erosividad de la lluvia en condiciones áridas, la consideración de que la erosividad del suelo puede variar estacionalmente, un mayor detalle en el establecimiento del factor protección de la cubierta del suelo, mediante el empleo de subfactores que consideran el uso previo de la tierra, restos vegetales, cubierta herbácea y rugosidad del terreno, la posibilidad de ajustar el factor topográfico a pendientes de formas variables, etc. La versión disponible actualmente es la **RUSLE2** que se puede consultar en la Web del *National Soil Erosion Research Lab* del Departamento de Agricultura de EEUU, donde se ofrece una versión informática de este modelo (ver en referencias, Internet).

Tanto USLE como RUSLE son modelos elaborados para predecir pérdidas de suelo a escala de parcela, finca o ladera, pero no sirven para cuencas hidrográficas. Para esta finalidad, se propuso la **MUSLE** (*Modified Universal Soil Loss Equation*), que estima la producción de sedimento en una cuenca para cada evento de precipitación y sustituye el factor erosividad de la lluvia por el factor de energía o capacidad de transporte de la escorrentía ($Q \cdot q_p$). MUSLE es adecuada para cuencas de unos 100 km^2.

$$Y = 11{,}8(Q \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde:

Y = producción de sedimento a la salida de la cuenca (Mg)

Q = volumen de escorrentía producido por cada evento de lluvia (m^3)

q_p (factor de escurrimiento) = velocidad máxima de caudal ($m^3\ s^{-1}$)

Los otros factores son iguales que en la USLE.

Las unidades de Y se convierten en Mg ha^{-1} cuando Q se expresa en mm y q_p en mm h^{-1}. Dado que la tasa de escorrentía por unidad de superficie disminuye a medida que aumenta la superficie de la cuenca, el modelo contiene una tasa de desplazamiento implícita.

4.8 Prácticas de conservación de suelos

La protección del suelo contra la erosión requiere compatibilizar su uso con medidas que eviten o limiten su degradación. Existen numerosos procedimientos que actúan sobre la cubierta vegetal, el control de la escorrentía, o sobre los factores topográficos, sea de forma única o combinada. Los más simples consisten en seleccionar el tipo de vegetación más efectiva para la fijación del suelo, combinar cultivos, la rotación de cultivos, cultivo en fajas en una ladera, establecimiento de barreras vivas entre cultivos, etc. Cuando estas medidas no son suficientes, se pueden construir terrazas con los correspondientes canales de drenaje que permitan la evacuación del agua de escorrentía de forma controlada. Cuando se trata de paisajes montañosos con laderas pronunciadas se pueden construir bancales, como los que construyeron los pueblos incas o mayas en América para poder establecer sus cultivos y viviendas y que tienen un valor histórico y paisajístico indudable.

Existen bastantes publicaciones donde se describen estas prácticas de conservación. Podemos destacar el clásico Manual de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EE.UU., el manual de Prácticas Integradas para el Manejo y Conservación de Suelos Agrícolas de la FAO (1998), o de suelos forestales (FAO, 1988), prácticas de conservación de suelos y aguas validadas en Bolivia (Arteaga, 2002). También se dispone de páginas Web especializadas

al respecto (ver en referencias, Internet). A continuación, se explican las características principales de las terrazas y bancales si bien se remite al lector a las obras más especializadas citadas.

4.8.1 Terrazas y bancales

Son obras que limitan el recorrido del agua de escorrentía o modifican el perfil topográfico de una zona, de manera que disminuyan los procesos erosivos sin impedir el uso agrícola o forestal del suelo. En la figura 4.4 se muestra un esquema de una terraza agrícola en la que se indican los elementos básicos que la componen: canal, lomo y talud. Este tipo de terrazas no modifica la pendiente general de la ladera, sino que tan solo acorta la distancia que recorrería la escorrentía en la ladera, desviándola lateralmente hacia los cauces naturales. Los bancales, en cambio, tienen un perfil en escalera, por lo que alteran la topografía natural al nivelar el terreno.

Las principales funciones que realizan las terrazas son: reducir la erosión laminar y/o en regueros (factores LS de la USLE), nivelar el terreno para facilitar la mecanización agrícola (solo los bancales), retener agua y mantener la humedad del suelo y evacuar el exceso de agua de escorrentía sin erosión.

Estas obras de conservación del suelo se pueden clasificar como sigue:

- Según el perfil
  - — Bancales (estrechos y altos), normalmente nivelados
  - — Terrazas: plataformas de base ancha (anchas, poco desnivel, ligera pendiente). Existen muchas variantes y formas de construcción.
- Según el control del agua
  - — Absorción
  - — Desagüe o drenaje

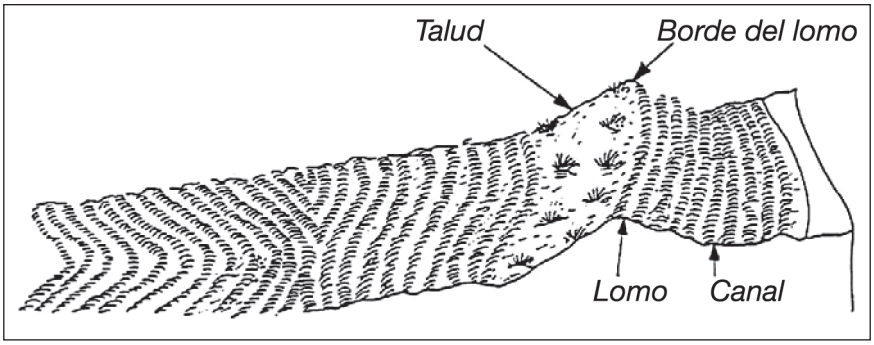


Figura 4.4.- Esquema de una terraza de cultivo. Fuente: TRAGSA-MMA (1998)

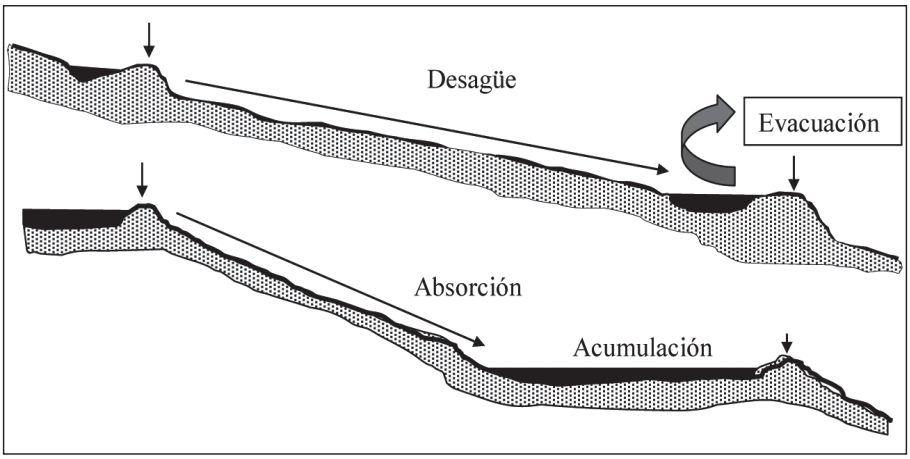


Figura 4.5.- Esquema de terrazas diseñadas para la evacuación de la escorrentía (drenaje o desagüe) y las que su función es almacenar el agua en el suelo (absorción). Fuente: elaboración propia.

En la figura 4.5 se muestra la diferencia entre las terrazas de absorción y las de drenaje. En las primeras, la principal función es evacuar el agua de escorrentía de forma controlada, mientras que las segundas facilitan la infiltración y retención del agua en el suelo, por lo que son muy apropiadas para las zonas áridas. El diseño de las terrazas debe dificultar lo mínimo posible el uso del suelo. La decisión de construir terrazas de drenaje o absorción se debe tomar en función del clima de la zona y de la capacidad de infiltración de los suelos. Es muy arriesgado construir terrazas de absorción en climas con precipitaciones intensas, aunque sean ocasionales, ya que si se sobrepasa la capacidad de retención de estas, se pueden producir cárcavas. También es importante hacer un mantenimiento periódico de los bancales y terrazas, retirando sedimentos que puedan obstruir los canales y reparando los lomos y taludes.

En zonas de pendientes suaves, se pueden cultivar la plataforma, el lomo y el canal, siempre que se pueda garantizar que no se erosionarán. En caso contrario, se debe mantener el talud con vegetación permanente (barreras vivas) o, si es muy vertical, se puede construir con muros de piedra seca (barrera muerta de piedras) u otras técnicas.

4.8.1.1 Cálculo del espaciamiento de las terrazas

Cuando se planifica la construcción de terrazas en una zona, hay que determinar la altura o separación vertical y la anchura o intervalo horizontal, además de la forma del perfil y del sistema de construcción. El diseño de las terrazas debe ir acompañado de una red de drenaje bien organizada y dimensionada. Para una determinada pendiente del terreno, el intervalo vertical y el horizontal están

relacionados. El intervalo horizontal está muy condicionado por el uso del suelo (por ejemplo, por el tipo de cultivo que se quiera implantar). Se pueden calcular atendiendo a la modificación del factor topográfico de la USLE.

Cálculo de la anchura de las terrazas (intervalo horizontal):

$$\text{Anchura (m)} = (100\ LS / 0{,}75 + 0{,}53p + 0{,}076\ p^2)^2$$

donde:

LS = factor USLE

p = pendiente (%)

Cálculo del intervalo vertical (altura) según el Ministerio de Agricultura español:

$$h = \sqrt{1{,}15\,p - 2}$$

donde:

h = altura en m

p = pendiente (%)

En la tabla 4.6 se proponen unas longitudes máximas de las terrazas en función de la pendiente que se pueda dar al canal construido sobre suelos poco o muy erosionables. Si la situación de las quebradas o torrentes naturales no permite un desagüe directo, se deberán construir canales protegidos con bloques de piedra u hormigón para bajar las aguas hasta el fondo del valle.

En la tabla 4.7 se comparan las dimensiones verticales y horizontales de bancales diseñados atendiendo a diferentes criterios, según países. Se debe buscar una solución de compromiso entre la mínima altura posible de talud y la máxima anchura (es decir, superficie cultivable) atendiendo al tipo de cultivo que se quiere instalar, sus requerimientos de mecanización, estabilidad de los taludes y coste de construcción.

Longitud lateral (m)	**Pendiente lateral máxima del bancal (%)**	
	erosionables	*poco erosionables*
< 30	2,00	2,50
31-60	1,00	1,50
61-150	0,50	0,65
151-365	0,35	0,50

Tabla 4.6.- Longitud lateral de las terrazas de desagüe, según Beasley.

Criterio	p 15%		p 20%		p 25%		p 30%		p 35%		p 40%	
	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L
Ramser	2,13	14,2	2,64	13,2	3,15	12,6	3,66	12,2	4,17	11,9	4,68	11,7
Israel	3,50	23,3	4,00	20,0	4,50	18,0	5,00	16,7	5,50	15,7	6,00	15,0
Saccary	3,35	22,3	3,37	18,6	4,00	16,0	4,38	14,6	4,73	13,5	5,06	12,6
MAPA	3,90	26,0	4,58	22,9	5,17	20,6	5,70	19,0	6,18	17,7	6,63	16,6
Schwab	3,05	20,3	3,96	19,8	4,88	19,5	5,80	19,3	6,71	19,2	7,62	19,1

Tabla 4.7.- Espaciados verticales (H) y horizontales (L) en metros de las terrazas según diferentes criterios y pendientes de la ladera original (p). Elaboración propia a partir de los autores

4.8.1.2 Movimientos de tierras para la construcción de bancales

La construcción de bancales supone excavar suelo de unos puntos para terraplenar en otros. Estas operaciones se deben realizar teniendo en cuenta que el suelo está formado por distintas capas u horizontes que no tienen las mismas propiedades ni fertilidad, por lo que si no se realiza correctamente, el resultado final puede ser peor que la situación de partida si se entierran las capas más productivas. Dentro de lo posible, se debe separar previamente la capa superficial (horizonte A) para reponerlo una vez nivelado el terreno. Los rellenos de terraplenes se pueden construir con los materiales más pedregosos y estériles, colocando en superficie los horizontes B y A del suelo original.

4.9 Referencias

- Agassi M. (1996). "Soil erosion, conservation and rehabilitation". Marcel Dekker. New York.
- Arteaga E. (2002). "Prácticas de conservación de suelos y aguas validadas por el proyecto JALDA". Serie "Estudios e Investigación", Corporación de Recursos Verdes de Japón (JGRC). Prefectura del Departamento de Chuquisaca, Documento 2, Sucre, Bolivia.
- Barber R. (1999). "Manejo de suelos y cultivos en zonas de ladera de América" Central. Boletín Suelos de la FAO nº 76. Roma.
- Bryan R.B. (ed) (1990). "Soil Erosion: Experiments and models". Catena Supplement 17, Catena Verlag, Cremlingen, Germany. .
- Bullock P. Jones R.J.A. and Montanarella L. (eds.) (1999). "Soil Resources of Europe". European Soil Bureau Research Report No. 6. The European Soil Bureau. Joint Research Centre. Ispra. Publication EUR 18991 EN. Softcover, 202 p.
- F.A.O. (1979). "A provisional methodology for soil degradation assessment". Roma
- F.A.O. (1985). "Evaluación de tierras con fines forestales". Roma.
- F.A.O. (1988). "Manual de ordenación de cuencas hidrográficas. Estabilización de laderas con tratamientos del suelo y la vegetación". Guías FAO Conservación, No. 13, Roma.

- F.A.O. (1993). "Sistemas de labranza para la conservación de suelos y aguas". Bol. No. 54, Roma.
- F.A.O. (1993). "Erosión de suelos en América Latina". Taller sobre la Utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Evaluación de la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial. Santiago, Chile, 27 de julio al 1° de agosto de 1992. Proyecto GCP/RLA/107/JPN. ISBN 92-854-3001-5 (http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S06.htm)
- F.A.O. (1998). "Manual de Prácticas Integradas para el Manejo y Conservación de Suelos". Boletín de Tierras y Aguas No. 8, Roma.
- Herwerg K. (1998). "Manual de campo para la valoración del daño por erosión actual (VADEA)". Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDMA). Universidad de Berna. Suiza. Programa para la agricultura sostenible en laderas de América Central (PASOLAC).
- **Hudson N. (1982).** "Conservación del suelo". Ed. Reverté. Barcelona. Buenos Aires.
- Hudson N. (1993). "Field measurement of soil erosion and runoff". FAO Roma and Silsoe Associates. Bedford. United Kingdom. Consultable en:

  http://www.fao.org/docrep/T0848E/t0848e00.htm#TopOfPage
- Knisel W.G. (1980). "CREAMS a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems". USDA Conservation Research Report 26.
- Lal R., Blum W.H., Valentine C. and Stewart B.A. (1998.) "Methods for assessement of Soil Degradation". Advances in Soil Science, CRC Press. New York.
- López Bermúdez F. (2002). "Erosión y desertificación. Heridas de la Tierra". Ed. Nívola libros y ediciones S.L. Tres Cantos.
- MMA (2000). "Guía para la elaboración de estudios del medio físico". Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Morgan R.P.C., Quinton J.N. and Rickson R.J. (1994). "Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach". *Outlook in Agriculture,* 23: 5-9.
- Morgan R.P.C. (1997). "Erosión y Conservación del Suelo" (edición española) Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- PASOLAC (2001). "Guía para seleccionar prácticas de conservación del suelo y del agua". Managua.
- Porta J., López-Acevedo M. y Roquero C (2003). "Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente" (3ª ed.). Mundi-Prensa, Madrid..
- Sánchez Ledesma G., García Flores F. y Morales H. (2001). "Manual de conservación de Suelos y Aguas". Centro de Conservación del Agua. México.
- Schwab G.O., Frevert R.K., Edminster T.W. and Barnes K.K. (1990). "Ingeniería de conservación de suelos y aguas". Ed. Limusa, México.
- Servicio de Conservación de Suelos Departamento de Agricultura de los EE.UU. (1977) "Manual de Conservación de Suelos", 2da edición. Ed. Limusa. México.
- Smith R.E., Goodrich D.C., Woolhiser D.A. and Unkrich C.L. (1995). "KINEROS2 – A kinematic runoff erosion model". In: Singh VJ Ed. Computer models of Watershed Hydrology, Chap. 20, Water Resources Publications.
- Stocking M. and Murnaghan N. (2003). "Manual para la evaluación de campo de la degradación de la Tierra". Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

- Stocking M. and Pain A. (1983). "The Cost of Soil Erosion in Zimbabwe in Terms of the Loss of Three Major Nutrients". Consultants Working Paper No. 3. FAO, Roma.
- TRAGSA-MMA (1998). "Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión". Mundi-Prensa, Madrid.
- Wischmeier W.H and Smith D.D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses". USDA Agricultural Research Service Handbook 537.

En red

Erosión y sus efectos
http://soilerosion.net/

Erosión por laboreo
http://www.umanitoba.ca/outreach/tillage_erosion/background/background.asp

USLE general
http://topsoil.nserl.purdue.edu/usle/index.html

Hojas de cálculo para USLE
http://www.co.dane.wi.us/landconservation/uslepg.htm http://soilerosion.net/

Nomogramas para el cálculo del factor LS
http://edafologia.ugr.es/alumnos/u9915.htm

RUSLE2
http://www.ars.usda.gov/main/docs.htm?docid=2973
http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/RUSLE2_Index.htm

Conservación de suelos
PASOLAC http://www.pasolac.org.ni/

Soil and Water Conservation Society http://www.swcs.org/
NRCS http://www.nrcs.usda.gov/programs/swca/