

LA ECUACION UNIVERSAL DE PERDIDAS DE SUELO. PASADO, PRESENTE Y FUTURO

MARTA GONZÁLEZ DEL TÁNAGO

RESUMEN

En este trabajo se hace una revisión crítica de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, USLE, de WISCHMEIER y SMITH (1978), analizando su formulación inicial, su reciente versión RUSLE y el modelo WEPP diseñado para sustituir en los Estados Unidos a dicha Ecuación, en un futuro próximo.

Se estudian las distintas metodologías para evaluar los factores que intervienen en cada una de estas versiones, comentando sus ventajas e inconvenientes de acuerdo con la escala de trabajo, medios disponibles y grado de exactitud de los resultados obtenidos.

Finalmente se comentan brevemente algunas de las ventajas e inconvenientes que presentan los modelos con base física frente a los modelos empíricos, y se propone un marco de actuación futura para España, dentro del ámbito de la investigación para el control de la erosión.

INTRODUCCION

Han sido muchos los procedimientos propuestos para estimar las pérdidas de suelo relacionadas con actividades humanas (erosión acelerada), pero es quizá la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, USLE, (Universal Soil Loss Equation), formulada inicialmente por WISCHMEIER y SMITH en 1962 y publicada posteriormente en su forma definitiva en el Manual 534 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (WISCHMEIER y SMITH, 1978), la que ha tenido mayor aceptación y difusión, no sólo en el continente americano sino en los demás países con problemas de erosión.

Esta Ecuación estima las pérdidas de suelo anuales, como valor promedio de un período representativo de años, que se producen en una parcela o superficie de terreno debidas a la erosión superficial, laminar y en regueros, ante unas determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos del suelo.

Las hipótesis de partida de esta Ecuación se centran en considerar a las precipitaciones como el principal agente activo de esta erosión superficial y así se establece que las pérdidas de suelo anuales

son directamente proporcionales al índice de erosividad de las lluvias, relacionado con la energía cinética de cada aguacero y su intensidad máxima.

Las mismas condiciones de erosividad de las lluvias pueden producir erosiones diferentes según las características del suelo sobre el que actúan. Así se reconocen una serie de características del propio suelo que determinan su erosionabilidad o vulnerabilidad a la erosión, relacionadas con su textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad.

A su vez, un mismo suelo, expuesto a la acción de las mismas lluvias, sufre intensidades de erosión distintas según se encuentre en la parte alta, media o baja de una ladera, y según sea la pendiente de dicha ladera (efecto de relieve). Y, finalmente, la erosión resultante también varía según sea el tipo de vegetación que protege al suelo, las prácticas de cultivo o de aprovechamiento de dicha vegetación, su disposición respecto a la pendiente de la ladera, etcétera. Estos dos últimos factores, el relieve y la cubierta vegetal, son los que matizan la acción erosiva de las lluvias sobre la erosionabilidad de cada suelo, dando por resultado unas tasas de erosión diferentes en cada caso, que pueden evaluarse a través de la estimación del efecto de cada uno de estos factores mencionados.

Inicialmente, la Ecuación Universal de Pérdidas de

Laboratorio de Hidrología Forestal, ETS de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040-Madrid.

Suelo fue formulada para calcular las pérdidas de suelo producidas por los diferentes cultivos, rotaciones y prácticas agrícolas, y la principal base experimental se realizó en parcelas agrícolas relativamente pequeñas (22,1 m de longitud de declive), situadas al este del río Mississippi.

Posteriormente, y dada la aparente facilidad de aplicación de esta Ecuación, se propuso la ampliación de su utilización a pequeñas cuencas vertientes que tuvieran unas condiciones relativamente homogéneas de clima, suelo, relieve y vegetación, haciendo extrapolable la información procedente de las parcelas agrícolas a dichas cuencas (WILLIAMS y BERNDT, 1972) con nuevos métodos para el cálculo del factor topográfico LS de la USLE a cuencas vertientes (WILLIAMS y BERNDT, 1977). Siguiendo en esta línea, BOYCE (1975) propuso la utilización de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo para el cálculo del coeficiente de emisión de sedimentos de una cuenca, como cociente entre la erosión bruta de la misma, calculada con la USLE, y la erosión neta observada en el cauce, relacionando dicho coeficiente con la superficie vertiente (ROEHL, 1962. Fig. 1).

Esta progresiva ampliación del ámbito de aplicación de la USLE ha llevado a que, en muchas ocasiones, esta Ecuación se haya utilizado erróneamente (WISCHMEIER, 1978), ignorando la fuente

experimental de la que proceden los coeficientes y tablas empíricas que hacen posible su cálculo o tratando de evaluar tasas de erosión no debidas a los procesos superficiales (erosión laminar o en regueros), sino a causas geomorfológicas con movimientos en masa, erosiones de cauce, etcétera, donde el agente activo no es ya la energía cinética de las lluvias sino la humedad del suelo, determinando problemas de drenaje, inestabilidad de laderas, etcétera.

En España se ha seguido un proceso similar al descrito en la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, desde sus primeros cálculos por el Servicio de Hidrología de la Administración Forestal en 1980 hasta nuestros días, llegando a ser en la actualidad casi un requisito indispensable en las memorias de los proyectos de restauración hidrológico-forestal.

Desgraciadamente, no todos los usuarios de la USLE han leído el manual original de WISCHMEIER y SMITH (1978), y así desconocen las grandes limitaciones del modelo que utilizan y los errores que cometen en su aplicación, no tanto por el modelo en sí como por tratar de utilizarlo en casos muy ajenos a los que la USLE trata de simular

Con este trabajo pretendemos colaborar al mejor conocimiento científico de esta Ecuación Univer-

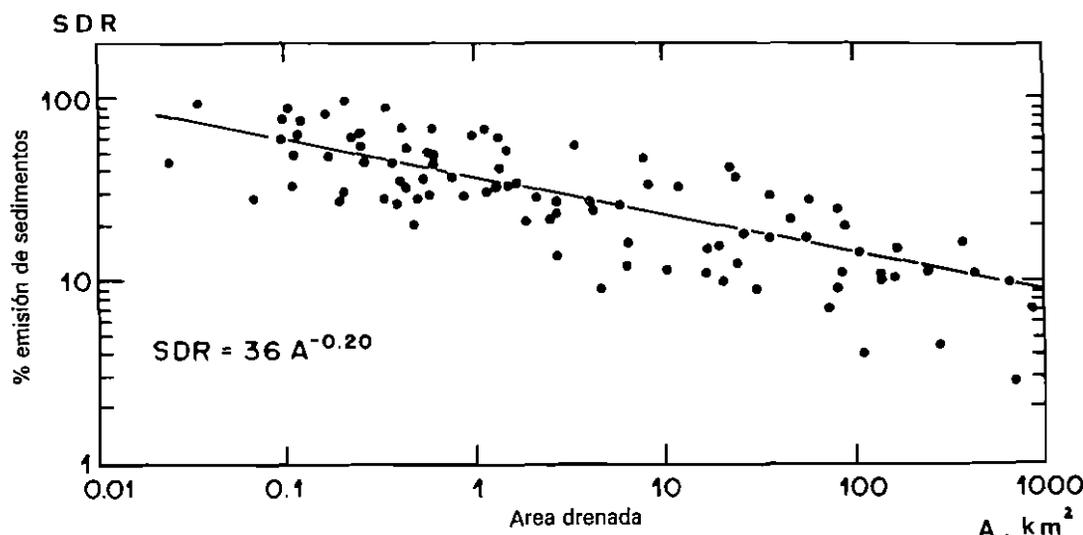


Fig. 1. Coeficiente de emisión de sedimentos vs. superficie de cuenca drenada (según ROEHL (1962), en DUNNE, 1977).

sal, aportando algunos comentarios sobre lo que ha representado en el pasado, las revisiones de las que es objeto en el presente y los planes que existen para sustituirla en el futuro por un modelo de erosión con base física, el cual trata de aprovechar la mayor disponibilidad actual de ordenadores y el mejor conocimiento que hoy día se tiene de los procesos físicos que intervienen en el fenómeno de la erosión.

PASADO

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo de WISCHMEIER y SMITH (1978) procede de numerosas experiencias y formulaciones anteriores como la de ZINGG (1940), quien relacionó la erosión con el grado de pendiente y longitud del declive; la de MUSGRAVE (1947), el cual añadió un factor de clima basado en la precipitación máxima en treinta minutos con un período de retorno de dos años; o la de SMITH (1958), en la que se consideraron factores de cultivo que tuvieran en cuenta el diferente grado de protección del suelo suministrado por la cubierta vegetal.

En 1962, WISCHMEIER y SMITH formularon la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo en su forma actual:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{1}$$

donde **A** representa el valor promedio de las pérdidas de suelo anuales (Tm/ha, año) en función de un índice de erosividad de la lluvia **R**, la erosibilidad del suelo **K**, un factor de relieve **L**, un factor de cubierta vegetal **C** y un factor de prácticas de conservación de suelos **P**.

Sucesivos trabajos y ampliaciones de las series de datos experimentales dieron lugar a la formulación de la USLE en su última versión (WISCHMEIER y SMITH, 1978), sobre la que posteriormente a su vez se han hecho modificaciones respecto a la forma de evaluación de algunos de sus parámetros.

Factor de erosividad de la lluvia, R

El factor **R** es el índice de erosión pluvial y recoge la influencia que sobre la erosión tiene la energía cinética de los aguaceros, disgregando las partículas del suelo y compactando su superficie, y su intensidad máxima, determinando la aparición de es-

correntía superficial cuando se supera la capacidad de infiltración.

La energía cinética de la lluvia es función del tamaño dominante de las gotas de agua, que a su vez está relacionado con la intensidad de la lluvia. CARTER *et al.* (1974) y HUDSON (1963) han demostrado que la distribución del tamaño de las gotas de lluvia incluye una mayor proporción de gotas grandes, con diámetros superiores a 4 mm, cuando las intensidades de lluvia oscilan entre 50 y 100 mm por hora, o superan los 200 mm/h. Las gotas mayores de 4 mm de diámetro son inestables y se rompen, si bien con intensidades superiores a 200 mm/h vuelven a unirse las de menor tamaño, de forma que las intensidades de lluvia más erosivas son las comprendidas entre 50 y 100 mm/h, y las superiores a 250 mm/h (Fig. 2).

El índice propuesto en la Ecuación Universal para cuantificar este efecto erosivo de las lluvias debido a su intensidad tiene como expresión:

$$R = E \cdot I_{30} \tag{2}$$

siendo **E** la energía cinética del aguacero, estimada a su vez por la fórmula:

$$E = 210,2 + 89 \log I \tag{3}$$

R es el índice de erosividad de la lluvia (julios/m² por cm de lluvia),

E es la energía cinética de la lluvia (julios/m²)

I es la intensidad de lluvia (cm/h)

I₃₀ es la intensidad máxima en treinta minutos del aguacero (cm/h).

Para el cálculo del valor de **R** a introducir en la expresión (1) es necesario calcular el valor de **R** de cada aguacero de un mismo año, calcular el **R** de ese año como suma de los **R** de cada aguacero ocurridos en el año; repetir este cálculo para un período de años representativo y, finalmente, calcular el valor medio de **R** anual, como media aritmética de los valores de **R** anuales del período de años considerado.

Todos estos cálculos requieren una información detallada de las precipitaciones, con un registro continuo de las variaciones de intensidad de la lluvia durante el aguacero suministrado por pluviógrafos, y su elaboración consume mucho tiempo dada la gran cantidad de datos que es necesario manejar.

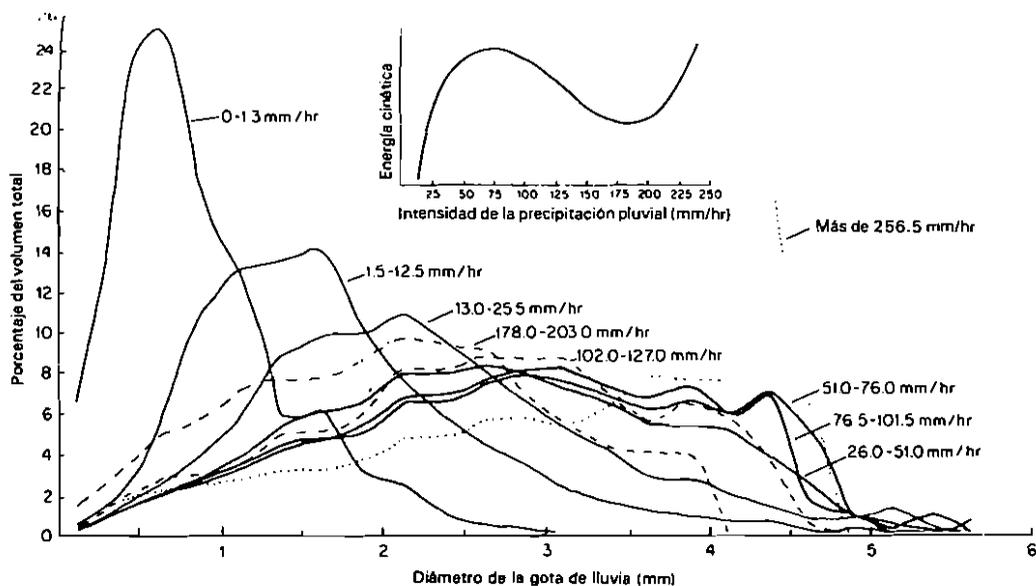


Fig. 2. Distribución del tamaño de la gota de lluvia en relación a su intensidad y energía cinética resultante (según CARTER *et al.*, 1974).

No obstante, el valor de este índice de erosividad de las lluvias es relativamente constante para cada zona, puesto que se trata de un valor promedio anual, y es posible disponer de una cartografía adecuada donde se indiquen los distintos valores de R por regiones, mediante isóneas.

La publicación reciente del ICONA (1988) sobre la agresividad de la lluvia en España, de gran interés para la aplicación extensiva de la USLE, proporciona unas ecuaciones de regresión para las distintas regiones españolas que permiten calcular el valor de R en función de variables de precipitación fácilmente disponibles, como precipitaciones totales (media anual, media del período de junio a septiembre, o media del período de octubre a mayo) o precipitaciones máximas en un mes, o en veinticuatro horas con distintos períodos de retorno, evitando la necesidad de disponer de información de pluviógrafos (ver Fig. 3).

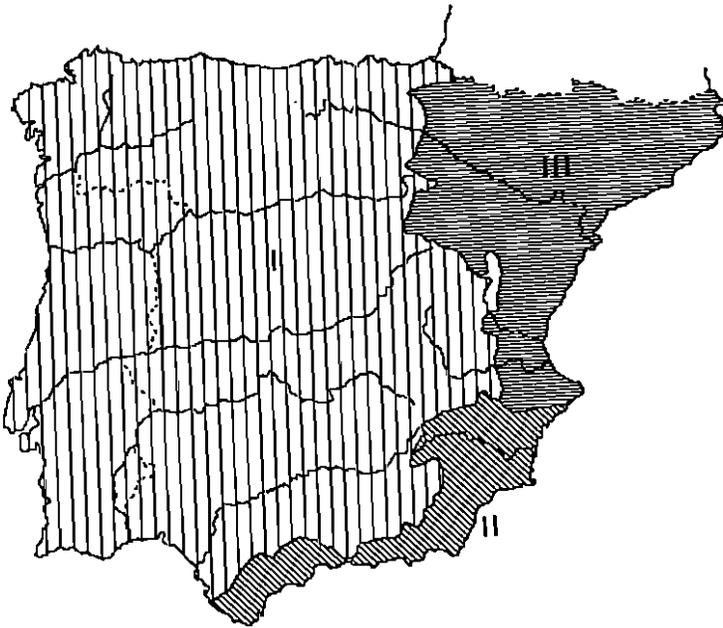
En dicha publicación se incluyen, asimismo, los mapas de isóneas de R de toda España a escala 1:1.000.000, sobre los que se observa la influencia en el valor de R de la excesiva pluviosidad del norte de España (puntos con $R = 300$) o de Grazalema (máximo absoluto de $R = 500$), o de la

torrencialidad de las lluvias del Levante (puntos con $R = 200, 250$), estando la mayor parte de la superficie española comprendida entre las isóneas de 50 y 150.

Un aspecto importante del factor R es su distribución a lo largo del año, que puede expresarse en porcentajes acumulados del valor de R anual, para cada mes (Fig. 4). Con esta distribución se pueden detectar los períodos de mayor riesgo de erosión en cuanto a las precipitaciones, en los que es conveniente lograr que la vegetación presente su máxima cobertura o desarrollo sobre el suelo, estableciendo la rotación de cultivos, el manejo de la vegetación permanente o la planificación de obras, aprovechamientos, etcétera, más adecuados cuando los objetivos prioritarios son los de conservación del suelo frente a la erosión.

Factor de erosionabilidad del suelo, K

La «erosionabilidad», o vulnerabilidad del suelo a la erosión, es una característica propia del suelo ligada a su granulometría, porosidad, condiciones hidrológicas, etcétera, y distinta a la «erosión» del suelo, proceso resultante de esta erosionabilidad,



I: $R = e^{-0,834} (PMEX)^{1,314} (MR)^{-0,388} (F24)^{0,363}$

II: $R = e^{-1,235} (PMEX)^{1,297} (MR)^{-0,511} (MV)^{0,366} (F24)^{0,414}$

III: $R = e^{0,754} (T2)^{1,031} (T10)^{-0,828} (F)^{-0,482} (PMEX)^{1,628} (MR)^{-1,22} (MV)^{0,536} (F24)^{0,800} e^{(Z,7)(0,211)} e^{(Z,9)(-0,157)}$

Fig. 3. Zonas en que queda dividida la Península Ibérica para el cálculo del factor R, y expresiones matemáticas correspondientes a cada una de ellas (ICONA, 1988).

PMEX: Valor medio anual de la máxima lluvia mensual (mm).

MR: Precipitación media del período octubre-mayo (mm).

F24: Valor medio de los cocientes entre la lluvia máxima en 24 horas de cada año, elevada al cuadrado, y la suma de las máximas en 24 horas de todos los meses de ese mismo año. MV: Precipitación media del período junio-septiembre (mm). F: Valor medio del índice de agresividad de la lluvia de Fournier, como cociente entre la lluvia máxima mensual del año elevada al cuadrado y la precipitación anual de ese mismo año; T2: Lluvia máxima en veinticuatro horas con período de retorno de dos años; T10: Lluvia máxima en veinticuatro horas con período de retorno de diez años.

expuesta a unas determinadas condiciones de clima, relieve y cobertura vegetal.

El factor K de la USLE cuantifica la erosionabilidad de cada suelo mediante una expresión deducida experimentalmente y representa la tasa de erosión del suelo por unidad de índice de erosión pluvial (R), cuando las condiciones de relieve y de vegetación son las consideradas «estándar» y en la expresión (1) los factores L, S, C y P valen la unidad. (Las condiciones estándar se refieren a las de una parcela de 22,1 m de longitud de declive y 9% de pendiente, mantenida en barbecho continuo y laboreada siguiendo la línea de máxima pendiente).

En el Manual de WISCHMEIER y SMITH (1978) se incluye un gráfico para estimar el valor de K en

función de la textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad del suelo (Fig. 5), considerando que son estos factores, y por el orden mencionado, los que determinan la erosionabilidad de cada suelo.

Experimentalmente se comprueba que los suelos más erosionables corresponden a las texturas intermedias (fracción de limos más abundante), considerando que los suelos con un porcentaje de arcillas superior al 30% son poco erosionables.

La disminución de la fracción de limos aumenta la resistencia a la erosión, ya sea por un aumento del porcentaje de elementos más finos (arcillas) que aumentan la cohesión del suelo, o por un aumento del porcentaje de los elementos más gruesos (arenas) con los que se mejoran las condiciones de

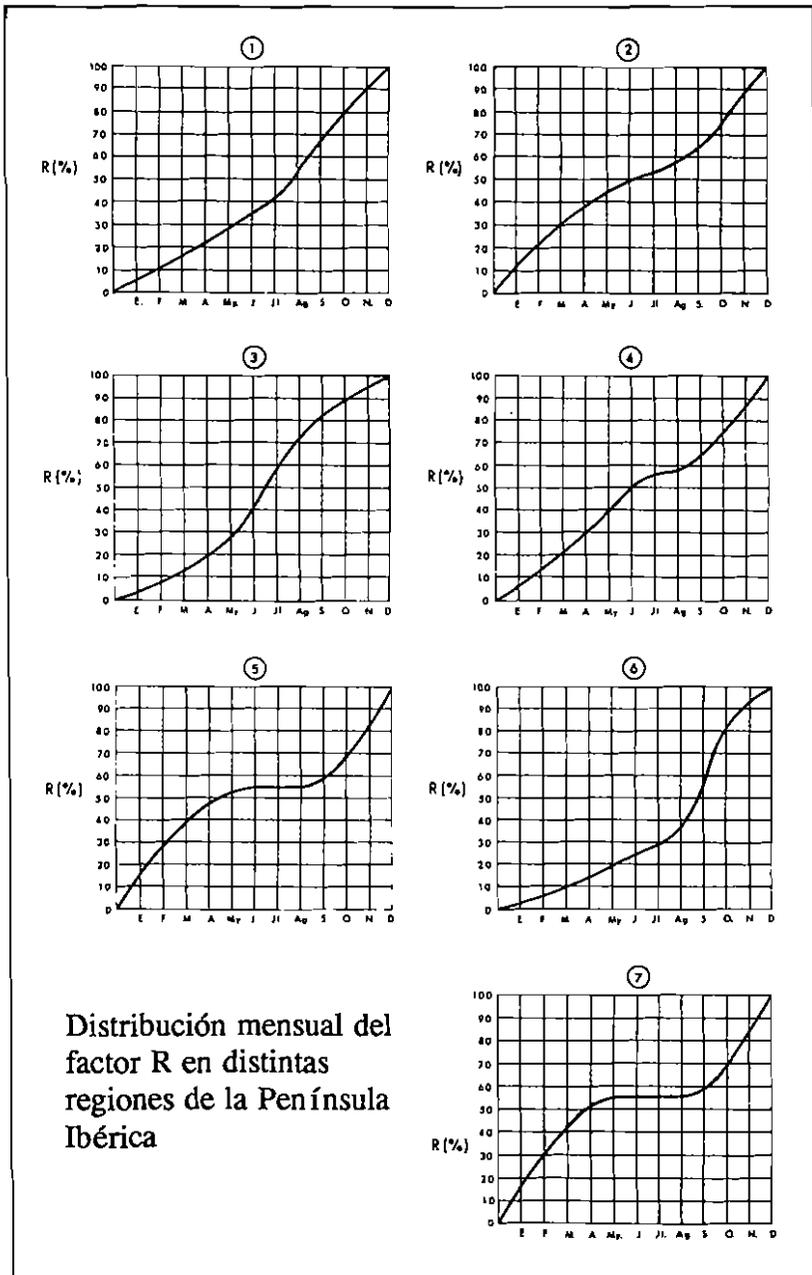


Fig. 4. Porcentajes del valor de R anual para cada mes, según las distintas zonas de la Península Ibérica. 1: Cuenca del Norte, vertiente Cantábrica. 2: Cuenca del Norte, exposición Oeste. 3: Cuenca del Duero, vertiente Norte y Meseta; Cuenca del Ebro, Noroeste; Duero, Sistemas Ibérico y Central; Cuenca del Tajo, Sistema Ibérico y zonas pirenaicas de las Cuencas del Ebro y del Pirineo Oriental. 4: Cuenca del Tajo excepto Sistema Ibérico, Cuencas del Guadiana, Guadalquivir excepto Sureste y Levante interior. 5: Cuenca del Guadalquivir Sureste, Cuenca del Sur, Cuenca del Segura y Levante Sur. 6: Cuencas de Levante, Ebro y Pirineo Oriental costeros y Baleares. 7: Canarias (ICONA, 1988).

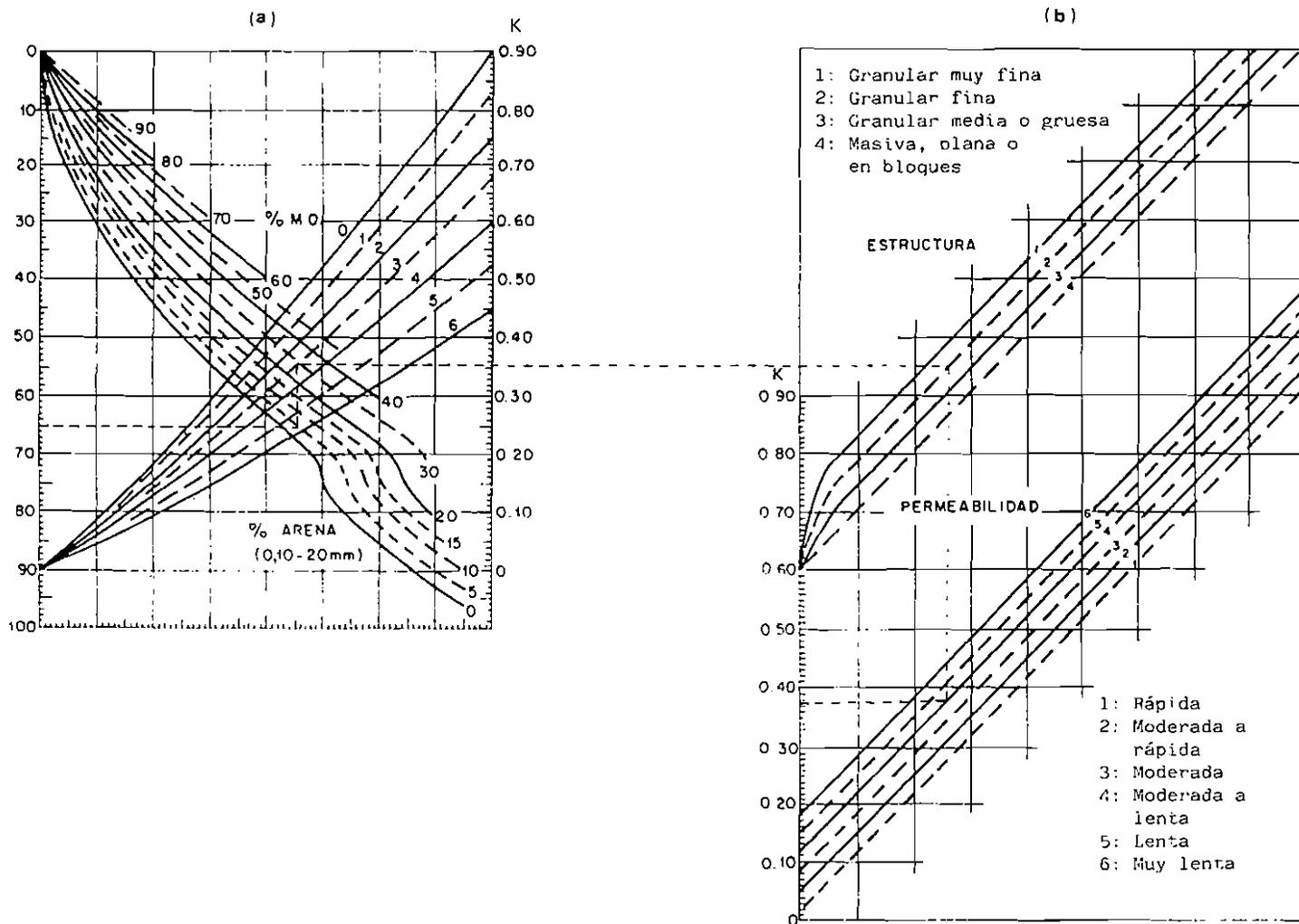


Fig. 5. Gráficos para el cálculo del factor de erosionabilidad del suelo, K de la USLE. a) Cálculo del factor K en primera aproximación. b) Cálculo del factor K en segunda aproximación.

infiltración y se retrasa la aparición de escorrentía superficial.

El contenido de materia orgánica suministra estabilidad a los agregados del suelo y mejora su estructura y resistencia a la erosión, demostrándose experimentalmente que es el segundo factor, después de la textura, determinando la erosionabilidad de cada suelo. La estructura y permeabilidad también influyen en la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, así como otras características químicas como el contenido en óxidos de Fe y Al de algunos suelos arcillosos.

Para porcentajes de limos y arenas finas iguales o inferiores al 70%, la expresión de la Figura 5 corresponde a la ecuación:

$$100 K = 10^{-4} \cdot 2,71 M^{1,14} (12 - a) + 4,20 (b - 2) + 3,23 (c - 3) \tag{4}$$

donde **K** es el factor de erosionabilidad por unidad del índice de erosión pluvial **R**.

M es el parámetro de granulometría, definido como el producto entre el porcentaje de limos y arenas muy finas (0,1—0,002 mm) y 100 veces el porcentaje de arcillas.

a es el porcentaje de materia orgánica.

b el código de estructura del suelo indicado en el gráfico.

c el código de permeabilidad del suelo indicado en el gráfico.

Utilizando únicamente las características de textura y contenido de materia orgánica se obtiene un valor de **K** en primera aproximación, que en muchos casos se considera suficiente para estimar las pérdidas de suelo. Este primer valor puede afinarse en segunda aproximación utilizando la gráfica de la derecha (Fig. 5), si se dispone de la información relativa a la estructura y permeabilidad del suelo necesario para ello.

Factor topográfico, LS

Tanto la longitud de la ladera como su pendiente influyen considerablemente en las tasas de erosión de un suelo, siendo el relieve uno de los principales factores que determinan la emisión de sedimentos de las cuencas vertientes.

Respecto a la longitud del declive, desde hace tiempo se conoce la existencia de una zona prác-

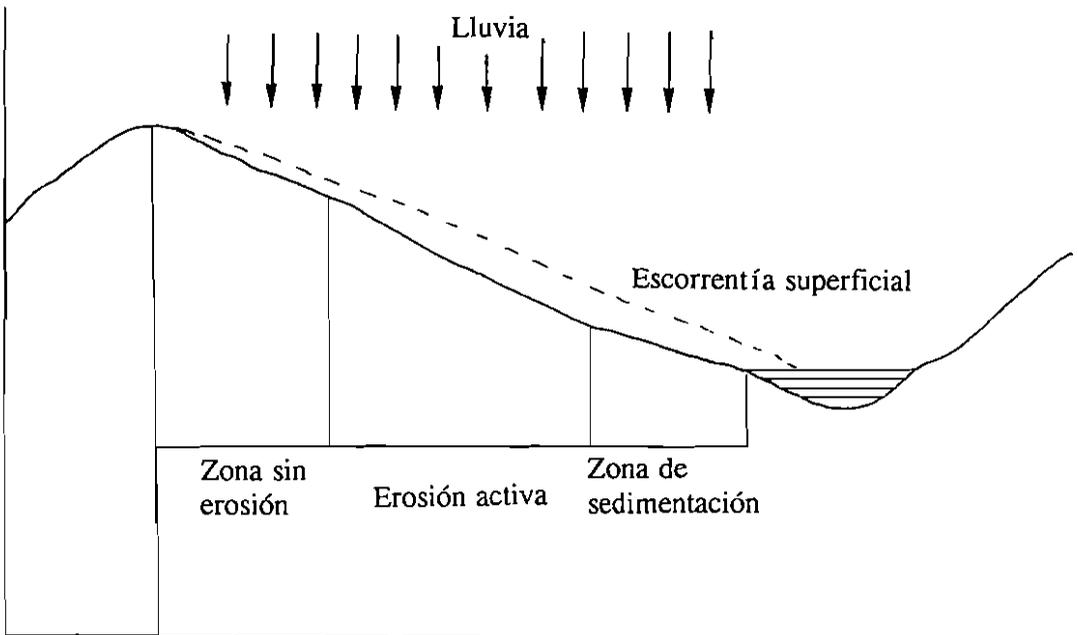


Fig. 6. Modelo de escorrentía de HORTON (1945) y zonas de erosión en una ladera.

ticamente sin erosión en las partes más altas de la ladera, la aparición de fenómenos erosivos de mayor intensidad en la parte media y la sedimentación como proceso dominante en la parte más baja de la ladera, donde en general disminuye su pendiente (Fig. 6) (HORTON, 1945).

Experimentalmente se comprueba que, a igualdad de todos los demás factores que intervienen en la erosión, las pérdidas de suelo por unidad de superficie aumentan al aumentar la longitud de la ladera, siendo mayores en su parte baja, debido a que la lámina de escorrentía se va acumulando hacia aguas abajo, incrementándose su fuerza de arrastre a medida que desciende por la ladera. Por otra parte, en las laderas de mayor longitud es más frecuente la aparición de regueros, con los cuales se aumentan considerablemente las tasas de erosión, al concentrarse las aguas en estos pequeños cauces, aumentando su velocidad y capacidad de transporte de las partículas del suelo erosionadas (MEYER *et al.*, 1975).

WISCHMEIER y SMITH (1978) definen la longitud de ladera como la longitud que recorre la gota de escorrentía desde que se forma, en la divisoria, hasta que encuentra un cauce o una zona de sedimentación. La influencia de esta longitud de ladera sobre la erosión es estimada por la USLE a través del factor L, mediante la expresión:

$$L = (l/22,1)^m \quad (5)$$

siendo L el factor de longitud de ladera, adimensional, definido como el cociente entre la tasa de erosión anual de una parcela con una longitud de ladera determinada l, y la tasa de erosión de esa parcela con las mismas condiciones de clima (R), suelo (K), pendiente (S) y vegetación (C, P), y de longitud de ladera igual a 22,1 m que corresponde a la parcela estándar, donde L es igual a la unidad.

l la longitud de la ladera (m).

m un exponente que depende de la pendiente de la ladera, oscilando entre 0,2 para pendientes suaves y homogéneas (inferiores al 1%) y 0,5 para las más acusadas (superiores al 5%).

El exponente m ha sido objeto de numerosas revisiones, con valores de 0,6 sugeridos por ARNOLDUS (1977) para pendientes entre el 10 y el 50%, ó de 0,3 propuesto más recientemente por

MCCOOL *et al.* (1982) para las pendientes superiores al 9%.

Respecto al efecto de la pendiente su influencia sobre la erosión es muy notable, ya que es directamente proporcional a la cantidad de escorrentía que se genera en una ladera por unidad de superficie y determina la velocidad de las aguas y su fuerza de arrastre.

La influencia de la pendiente es estimada por la USLE a través del factor S, mediante la ecuación:

$$S = 65,41 \text{ sen}^2 \theta + 4,56 \text{ sen } \theta + 0,065 \quad (6)$$

siendo S el factor de pendiente, definido como el cociente entre la tasa de erosión de una determinada parcela con una pendiente s y la tasa de erosión de esa parcela con las mismas condiciones de R, K, L, C y P pero con una pendiente del 9% considerada como «estándar», donde S es igual a 1 y

θ es el ángulo del declive.

Expresar el factor S en función del seno del ángulo es más correcto que expresarlo en función de su tangente, ya que la fuerza del impacto de las gotas de lluvia sobre el terreno, así como su tensión de arrastre, son funciones del seno. No obstante, para pendientes inferiores al 20% el error de sustituir el seno por la tangente no altera significativamente el valor de S, y se facilitan los cálculos cuando en la expresión (6) se sustituye $100 \text{ sen } \theta$ por $100 \text{ tg } \theta$, quedando la expresión definitiva en la forma:

$$S = 0,006541 s^2 + 0,045 s + 0,065 \quad (7)$$

siendo s el valor de la pendiente de la ladera, en %.

En la expresión conjunta del factor LS:

$$LS = (l/22,1)^m (0,006541 s^2 + 0,0456 s + 0,065) \quad (8)$$

se observa una mayor influencia de la pendiente (elevada al cuadrado) que de la longitud de ladera (elevada a un exponente generalmente inferior a 0,5), dando por resultado que el error cometido en la evaluación de l tiene mucha menor incidencia en el valor de LS que el cometido al estimar la pendiente s.

Si se estiman sobre la cartografía las variables l y s, en general se observa que se sobreestima la longitud de ladera y se subestima la pendiente, resul-

tando valores de **LS** generalmente inferiores a los obtenidos en campo para pendientes superiores al 15%, por esa mayor incidencia del error de la pendiente antes comentada, y valores de **LS** superiores a los reales para las pendientes menores, con el máximo error para pendientes comprendidas entre el 12 y el 36% (GONZÁLEZ DEL TÁNAGO y REDONDO, 1989).

Tanto el factor **L** como el factor **S** son adimensionales, y su ecuación de cálculo ha sido ajustada experimentalmente, en función de las variables **l** y **s**. En general, este factor **LS** está sujeto a grandes errores y su evaluación resulta siempre muy subjetiva (SIMANTON *et al.*, 1980), dependiendo de la metodología seleccionada para evaluar **l** y **s** y del tamaño de cuadrícula utilizada (GONZÁLEZ DEL TÁNAGO *et al.*, 1980).

La ecuación (8) permite el cálculo del factor **LS** para una parcela de relieve conocido, pero WILLIAMS y BERNDT (1977) suministran diferentes metodologías para evaluar dicho factor en cuencas vertientes, discretizando la superficie en cuadrículas o considerando la cuenca en conjunto, haciendo posible la aplicación de la USLE a zonas más extensas.

La utilización de sistemas de información geográfica facilita enormemente en estos casos el cálculo del factor **LS**, si bien es necesario tener presente en todo momento las diferentes fuentes de error en su estimación y los límites físicos de las parcelas experimentales de las que proceden las expresiones (5) y (6), con el fin de interpretar adecuadamente los resultados del factor **LS** procedentes de tales cuencas.

Factor de cubierta, C

La cubierta vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad de la escorrentía superficial.

El factor **C** de la USLE recoge esta influencia debida no sólo al tipo de vegetación existente, sino al manejo o disposición de los residuos que produce sobre el suelo. WISCHMEIER y SMITH (1978) proporcionan unas tablas de cálculo del factor **C**, que para los cultivos agrícolas tienen en cuenta la

forma y tipo de cultivo, las distintas rotaciones según el período del año y su correspondiente porcentaje del valor de **R**, etcétera.

Para el caso de una vegetación permanente, los valores de **C** suministrados por estos autores están únicamente relacionados con los porcentajes de cobertura de las copas o parte aérea de la vegetación, y los de la vegetación en contacto con el suelo (Tablas I y II).

Teniendo en cuenta que la USLE sólo se refiere a los procesos de erosión superficial, es interesante resaltar la mayor protección ofrecida por la vegetación en contacto con el suelo (principalmente de herbáceas y restos vegetales o «mulch») que la suministrada por las copas, respecto a las cuales se considera que su efecto es prácticamente nulo cuando su altura media supera los 10 m (Figs. 7 y 8).

Este factor **C** es, de forma similar a los factores **L** y **S**, adimensional y se define como el cociente entre la tasa de erosión de una parcela con una determinada cubierta vegetal, y la tasa de erosión de esa misma parcela con las mismas condiciones de clima (**R**), suelo (**K**), relieve (**LS**) pero en barbecho continuo (en que **C** = 1) y laboreada según las líneas de máxima pendiente (**P** = 1). En los casos de cubierta vegetal no permanente, con variación de su cobertura o densidad a lo largo del año, como sucede con los diferentes estados de desarrollo de los cultivos agrícolas, este factor **C** debe calcularse en relación al porcentaje del índice de erosividad anual **R** de cada período considerado, siendo entonces su valor medio anual:

$$\bar{C} = \sum C_i \times R_i / n \quad (9)$$

donde C_i es el factor **C** relativo al período i de cada rotación, R_i es el porcentaje de **R** anual de dicho período i , y n el número de años que dura el ciclo de rotaciones agrícolas consideradas.

Factor de prácticas de conservación, P

Este último factor de la USLE recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión de una parcela, realizando los trabajos culturales o disponiendo la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía.

TABLA I

VALORES DEL FACTOR DE CUBIERTA VEGETAL, C, PARA MATORRALES Y VEGETACION PERMANENTE (1)
(WISCHMEIER y SMITH, 1979)

Cubierta de copas	Tipo y altura (2)	% cubierta (3)	Tipo (4)	Cubierta en contacto con el suelo					
				Porcentaje suelo cubierto					
				0	20	40	60	80	+95
No apreciable.			G	0,45	0,20	0,10	0,042	0,013	0,003
			W	0,45	0,24	0,15	0,091	0,043	0,011
Herbáceas altas o matorral bajo, con altura media de caída de la gota de lluvia 0,5 m.	25		G	0,36	0,17	0,09	0,038	0,013	0,003
			W	0,36	0,20	0,13	0,083	0,041	0,011
	50		G	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
			W	0,26	0,16	0,11	0,076	0,039	0,011
	75		G	0,17	0,10	0,06	0,032	0,011	0,003
			W	0,17	0,12	0,09	0,068	0,038	0,011
Apreciable cubierta de matorral y arbustos con una altura media de caída de la gota de lluvia de 2 m.	25		G	0,40	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
			W	0,40	0,22	0,14	0,087	0,042	0,011
	50		G	0,34	0,16	0,08	0,038	0,012	0,003
			W	0,34	0,19	0,13	0,082	0,041	0,011
	75		G	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
			W	0,28	0,17	0,12	0,078	0,040	0,011
Arboles, pero sin cubierta apreciable de matorral. Altura media de caída de la gota de lluvia de 4-5 m.	25		G	0,42	0,19	0,10	0,041	0,013	0,003
			W	0,42	0,23	0,14	0,089	0,042	0,011
	50		G	0,39	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
			W	0,39	0,21	0,14	0,087	0,042	0,011
	75		G	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003
			W	0,36	0,20	0,13	0,084	0,041	0,011

- (1) Los valores de C asumen que la vegetación presenta una distribución aleatoria sobre el suelo.
- (2) La altura de copas se mide como altura media de caída de las gotas de lluvia desde la parte aérea de la vegetación. El efecto de las copas es inversamente proporcional a dicha altura media de caída de las gotas de lluvia, siendo nulo si ésta es mayor de 10 m.
- (3) Porción de superficie que quedaría oculta por las copas en una proyección vertical de éstas.
- (4) G: Cubierta sobre el suelo de césped o similares, restos vegetales en descomposición o humus de al menos 5 cm de espesor.
- W: Cubierta sobre el suelo de herbáceas de hoja ancha, con escasa extensión lateral de su sistema radical, o residuos vegetales sin descomponer.

Los valores de la Tabla III, suministrados por WISCHMEIER y SMITH (1978) para deducir el valor del factor P según las prácticas de conservación del suelo seleccionadas, se refieren al porcentaje de las pérdidas de suelo que tiene la parcela

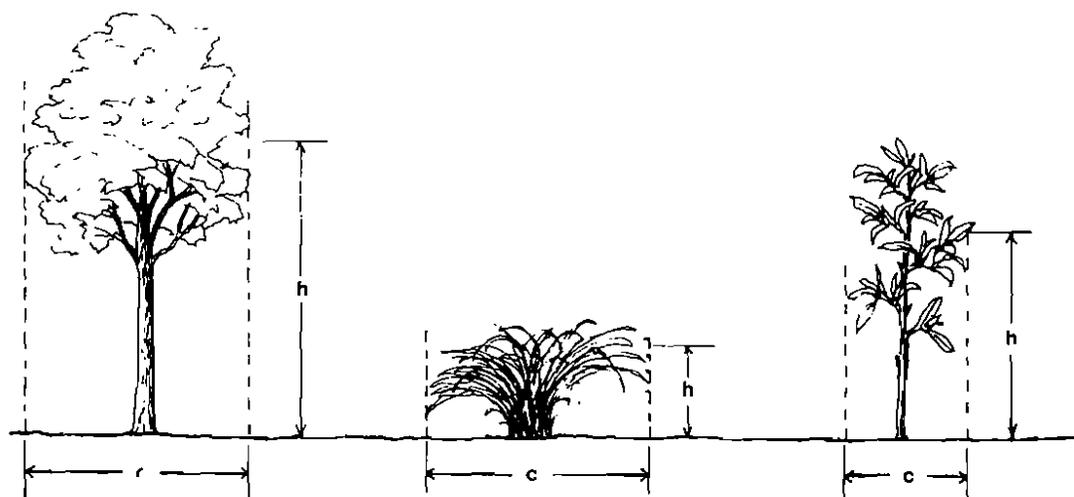
considerada en conjunto, frente a las que tendría sin la práctica de conservación.

La disposición en terrazas crea «escalones» donde se diferencian los taludes de la terraza, con pen-

TABLA II

VALORES DE FACTOR C PARA BOSQUES NO ALTERADOS (WISCHMEIER y SMITH, 1979)

% superficie cubierta por copas de árboles y sotobosques	% superficie cubierta por humus de al menos 5 cm de espesor	Factor C
100-75	100-90	0,0001-0,001
70-45	85-75	0,002-0,004
40-20	70-40	0,003-0,009



h : altura media de copas
 c : cobertura de copas sobre el suelo

Fig. 7. Altura media de copas o de caída de las gotas de lluvia desde la parte aérea y cobertura ofrecida al suelo por las diferentes formas vegetales.

diente similar a la de la ladera pero con una longitud de declive mucho menor, y las zonas horizontales o terraza misma, donde supuestamente no hay erosión. La influencia de la práctica de conservación consiste pues en disminuir la longitud del declive efectivo para la escorrentía, y puede estimarse modificando el valor de l en el factor LS para calcular las tasas de erosión en los taludes de cada terraza, o introduciendo un valor de P adecuado para valorar las tasas de erosión de toda la ladera.

Con un diseño correcto de la terraza se consigue una sedimentación igual o superior al 80% de los materiales erosionados en los taludes que quedan por encima de cada zona horizontal, de forma que de toda la ladera sólo se pierde aproximadamente el 20% de la erosión total producida ($P = 0,2$). No obstante, cuando en las terrazas se acumula más cantidad de agua de la que pueden infiltrar y no se ha preparado convenientemente su desagüe, existe el riesgo de que la terraza se abra y deje salir el agua por la línea de máxima pendiente, produciéndose en este caso importantes regueros o barrancos que aumentan las pérdidas de suelo de forma considerable, en términos incluso superiores a los de la ladera antes del aterrazamiento.

Discusión

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo así formulada tuvo un gran impacto y difusión entre los gestores de la conservación de los suelos agrícolas de Estados Unidos, sirviendo no sólo para evaluar las pérdidas de suelo medias ocasionadas por un determinado cultivo, sino el posible aumento o disminución de las mismas al cambiar el uso del suelo, representando una herramienta muy útil para incentivar ciertas prácticas de cultivo y de conservación de suelos en determinadas regiones, o limitar su aplicación en otros lugares con fines de control de la erosión y conservación del suelo.

También en Europa este modelo de predicción de pérdidas de suelo tuvo su aceptación, si bien las diferentes condiciones de clima y de suelo europeas respecto a las condiciones de las parcelas experimentales estadounidenses, todas ellas hasta entonces situadas al este del río Mississippi, no permiten en muchos casos la aplicación directa de las tablas o gráficos suministrados por WISCHMEIER y SMITH, para el cálculo de los respectivos factores de erosión.

Así, por ejemplo, ZANCHI y TORI (1980) resaltan la necesidad de considerar en el cálculo del valor

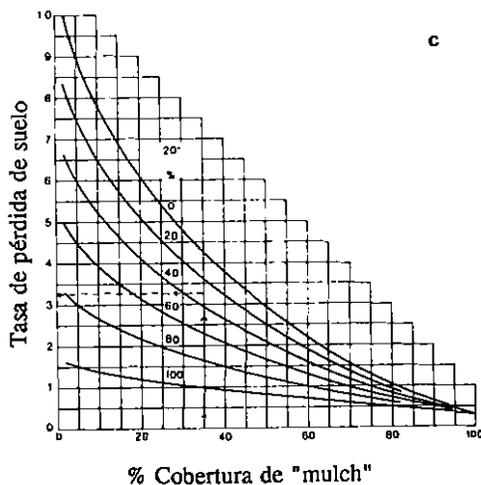
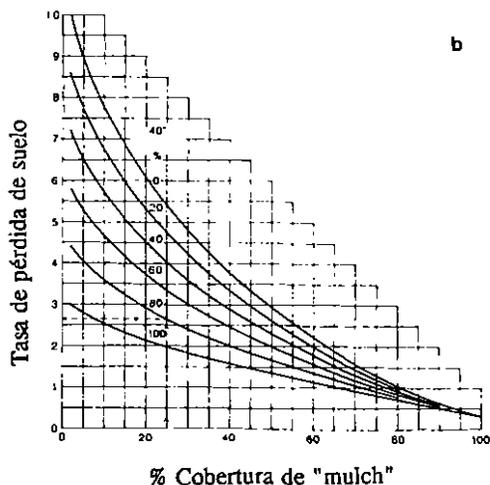
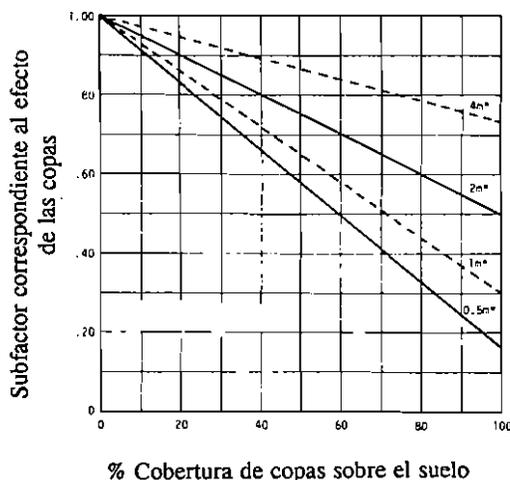


Fig. 8. Efecto de la altura de copas y cobertura sobre el suelo en la protección de este último. a) Influencia de la altura media de caída de las gotas de lluvia y cobertura de las copas sobre el suelo, en el cálculo del factor C. b) Efecto combinado del «mulch» y parte aérea de la vegetación, cuando la altura media de ésta es aproximadamente de 1 m. c) Efecto combinado del «mulch» y parte aérea de la vegetación cuando la altura media de ésta es aproximadamente de 0,5 m (tomado de WISCHMEIER y SMITH, 1978).

del factor R la temperatura a la que se producen las precipitaciones, la cual modifica sustancialmente el tamaño de las gotas de lluvia en función de su intensidad, obteniendo expresiones para el cálculo de la energía cinética de dichas precipitaciones significativamente diferentes a la ecuación (3) propuesta por WISCHMEIER y SMITH.

Es indudable que la Ecuación Universal representa una metodología muy práctica y de resultados

«cuantitativos» para estimar la erosión del suelo y la influencia que sobre ella tienen los diferentes cultivos o prácticas de cultivo, pero quizá en nuestro país, donde prácticamente no existen datos experimentales para su contraste, haya representado un modelo excesivamente utilizado sin el debido rigor científico, sustituyendo a otras aproximaciones a la estimación de la erosión quizá menos vistosas en cuanto a producir «números», pero más efectivas para la interpretación del proceso de la

TABLA III
VALORES DEL FACTOR P PARA LAS DISTINTAS PRACTICAS DE CONSERVACION DE SUELOS
(WISCHMEIER y SMITH, 1979)

Pendiente (%)	Trabajos a nivel		Trabajos en fajas		Trabajos en terrazas (2)		
	Factor	Máxima longitud de declive (m)	Factor P (1)	Anchura de faja (m)	Máxima longitud de declive (m)	Desagües en canales encespedados	Desagüe subterráneo en contrapendiente
1-2	0,60	130	0,30-0,60	43	260	0,12	0,05
3-5	0,50	100	0,25-0,50	33	200	0,10	0,05
6-8	0,50	65	0,25-0,50	33	130	0,10	0,05
9-12	0,60	40	0,30-0,60	26	80	0,12	0,05
13-16	0,70	26	0,35-0,70	26	55	0,14	0,05
17-20	0,80	20	0,40-0,80	20	40	0,16	0,06
21-25	0,90	16	0,45-0,90	16	33	0,18	0,06

(1) Los valores dados de P dependen del tipo y duración de la rotación agrícola.

(2) Los valores dados de P incluyen la capacidad de retención de sedimentos dentro de la ladera y deben utilizarse para calcular la salida de sedimentos fuera de la misma o su contribución a la degradación específica de la cuenca a la que pertenece.

erosión y ayuda para plantear las actuaciones más convenientes para su control (ver MORGAN, 1986).

De todos los factores que esta Ecuación contempla quizá el de erosividad R, ateniéndose a los datos de pluviógrafos disponibles, y el de erosionalidad K, según los análisis de suelos efectuados, son los que pueden calcularse con mayor precisión de una manera objetiva. Dichos factores determinan en general las diferencias de tasas de erosión entre una regiones y otras, pero en ocasiones, dentro de una misma cuenca o región, tienen poca influencia o significación en la variación espacial de las tasas de erosión.

Por el contrario, el factor de relieve LS, teniendo un peso importante en los resultados de las pérdidas de suelo, puede ser uno de los factores más difíciles de evaluar, estando sometido a errores significativos en función de la metodología utilizada para su cálculo sobre la cartografía. Asimismo, la estimación del factor C está sujeta a una gran carga subjetiva en la aplicación de las tablas suministradas por WISCHMEIER y SMITH a nuestro país, donde los cultivos y rotaciones agrícolas y la ordenación de bosques y pastizales son completamente diferentes a los existentes en las zonas de donde procede la base experimental de la USLE. Paradójicamente, son estos dos factores, relieve y vegetación, los que determinan en mayor medida las variaciones espaciales de las tasas de erosión dentro de una misma cuenca o región, siendo la cubierta vegetal responsable en gran medida de las

pérdidas de suelo de una determinada ladera o superficie, y el relieve el factor más determinante en la emisión o conducción de los sedimentos producidos hacia los cauces (COLEMAN y SCATENA, 1986).

PRESENTE

Es difícil separar el «pasado» de la USLE, correspondiente a su utilización en los Estados Unidos en su versión inicial, con el «presente» en nuestro país, donde se siguen utilizando las mismas metodologías de cálculo de cada uno de los factores antes descritas, sin tener en cuenta las últimas revisiones, quizá menos contrastadas empíricamente.

Refiriéndonos al presente de la USLE en su país de origen, es necesario considerar la gran crítica de la que es hoy objeto esta Ecuación, debido fundamentalmente al mal uso que se ha hecho de ella queriéndola hacer válida para todo tipo de condiciones y regiones.

Con el fin de hacer el modelo más «universal», el Departamento de Agricultura de Estados Unidos ha ampliado en los últimos años la cantidad de parcelas experimentales, disponiendo un número considerable de las mismas en la región oeste del país, con el fin de cubrir con mayor representación todo el rango de condiciones de clima, suelo y vegetación.

En su más reciente versión, RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), se han modificado algunas fórmulas de evaluación de los factores de erosión, así como el mapa de isóneas de R con la ampliación de su extensión al oeste del Mississipi y rectificación de algunos valores correspondientes a ciertas regiones concretas.

Quizá la característica más notable de esta nueva versión de la USLE es que viene en forma de programa de ordenador y necesita en ocasiones de una información más detallada del terreno en estudio, no siempre fácilmente disponible.

Hay que tener en cuenta que la mayor generalización de las condiciones de aplicación de la RUSLE frente a la USLE inicial no siempre procede de una ampliación de los datos experimentales, sino de una mayor extrapolación estadística de los ya existentes, a veces fuera de los límites físicos de los

que se derivaron las expresiones analíticas (RE-NARD *et al.*, 1989).

Los cambios que se proponen en esta nueva formulación de la Ecuación Universal son los siguientes:

Factor K

Respecto a la erosionabilidad de los suelos o factor K se considera (ROMKENS *et al.*, 1989) que dicho factor varía no sólo con las variables anteriormente consideradas (textura, materia orgánica, estructura y permeabilidad) sino también con el contenido de humedad del suelo y estado de la superficie del suelo en el momento de las lluvias, teniendo, por tanto, un rango de variación estacional a lo largo del año. La probabilidad de que el suelo esté húmedo en una determinada época del

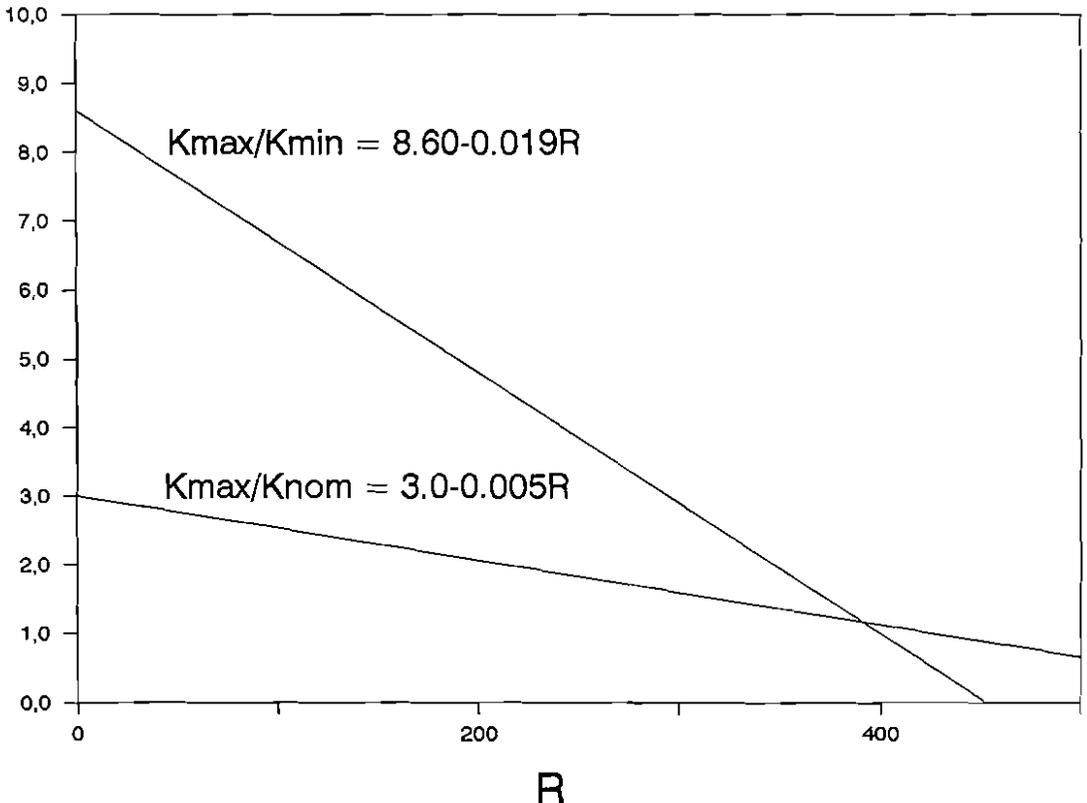


Fig. 9. Relación entre k_{max}/k_{min} , k_{max}/k_{nom} y el factor R, dado este último en unidades americanas (pies-cons./acre, pulgada X pulgadas/hora).

año es una función del tiempo y de la precipitación anual, la cual viene reflejada en la distribución anual del factor R o de erosión pluvial.

Para su cálculo, según esta revisión del factor K, se definen $K_{máx.}$ como el máximo valor de erosionabilidad de un determinado suelo y $K_{mín.}$ como su mínimo valor, a lo largo del año; $t_{máx.}$ como el tiempo en que se produce $K_{máx.}$, y $t_{mín.}$ cuándo se produce $K_{mín.}$. El cociente entre $K_{máx.}$ y $K_{mín.}$ guarda una relación con el valor del índice de erosión pluvial R, como demuestra la Fig. 9, así como el cociente entre $K_{máx.}$ y $k_{nom.}$ deducida esta última del nomograma inicial para el cálculo de K de WISCHMEIER y SMITH (1978). De la misma forma, el tiempo en que el suelo es más erosionable, $t_{máx.}$, contado a partir del 1 de noviembre también guarda una relación con R como se indica en la Fig. 10.

De esta forma, conocido el valor de R y el de $k_{nom.}$ de una parcela determinada, utilizando las Figs. 9 y 10 se obtienen los valores de $K_{máx.}/K_{mín.}$, de $K_{máx.}/k_{nom.}$ y de $t_{máx.}$.

El valor de $t_{mín.}$ debe hacerse corresponder en la Península Ibérica, donde el suelo en general no se hiela, aproximadamente a mediados o finales de la estación seca, como proponen los autores de este método para la mitad sur de los Estados Unidos.

Una vez deducidos todos estos parámetros se obtiene el valor medio anual de la erosionabilidad del suelo mediante la expresión:

$$K_w = \sum K_i (EI)_i / 100 \quad (10)$$

donde K_w es el valor medio anual del factor de erosionabilidad del suelo, ligeramente diferente al valor de K obtenido directamente del nomograma de la Fig. 4, $k_{nom.}$; K_i es el valor parcial de erosionabilidad correspondiente al período i y $(EI)_i$ es el porcentaje del índice de erosión pluvial anual R, correspondiente al período i.

Se pueden diferenciar los siguientes casos:

1) $t_{máx.} < t_{mín.}$

Si $t_{máx.} < t_i < t_{mín.}$,

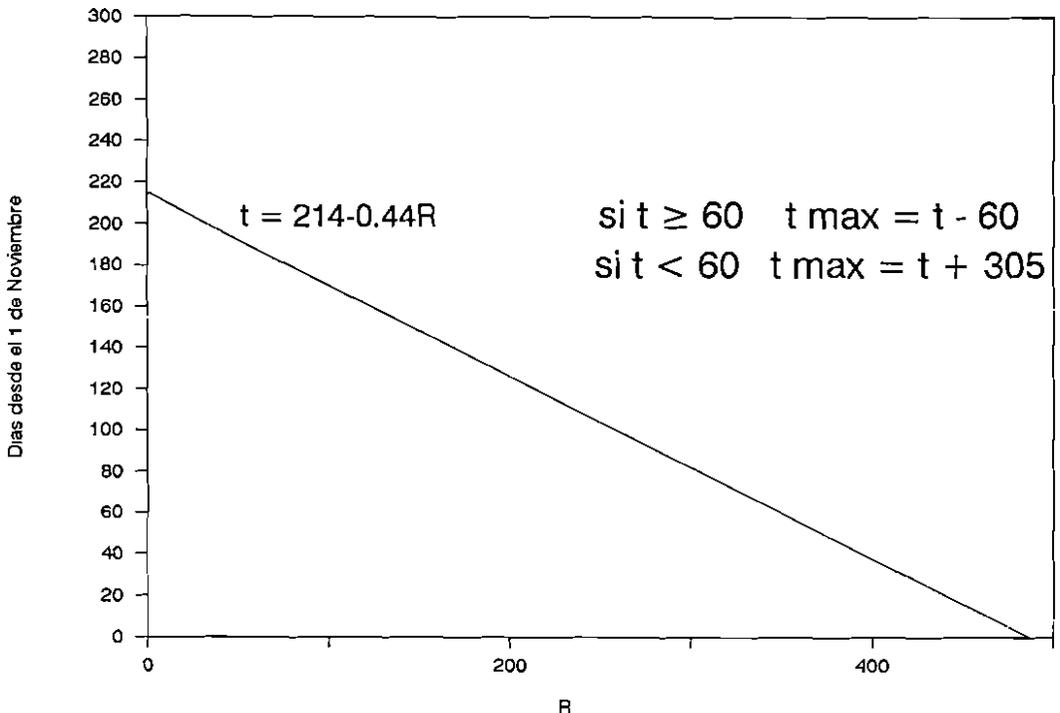


Fig. 10. Relación entre el número de días en que se alcanza la máxima erosionabilidad del suelo, contados a partir del 1 de noviembre, $t_{máx.}$, y el valor del factor R expresado en unidades americanas (pies-ton./acre, pulgada x pulgada/hora).

se calcula K_i mediante la expresión:

$$K_i = K_{máx.} (K_{mín.}/K_{máx.})^{(t_i - t_{máx.})/\Delta t} \quad (11)$$

Si $t_i < t_{máx.}$ ó $t_i > t_{mín.}$

se calcula K_i mediante la expresión:

$$K_i = K_{mín.} \cdot \exp. (0,009 (t_i - t_{mín.} + 365 d)) \quad (12)$$

siendo $d = 1$ si $(t_i - t_{mín.}) \leq 0$

$d = 0$ si $(t_i - t_{mín.}) > 0$

2) $t_{máx.} > t_{mín.}$

Si $t_{máx.} > t_i > t_{mín.}$

$$K_i = K_{mín.} \cdot \exp. (0,009 (t_i - t_{mín.})) \quad (13)$$

Si $t_i > t_{máx.}$ ó $t_i < t_{mín.}$

$$K_i = K_{máx.} (K_{mín.}/K_{máx.})^{(t_i - t_{máx.} + 365 d)/\Delta t} \quad (14)$$

siendo $d = 1$ si $(t_i - t_{máx.}) \leq 0$

$d = 0$ si $(t_i - t_{máx.}) > 0$

considerando que si las ecuaciones (10), (11) ó (12) dan:

$K_i > K_{máx.}$, sustituir K_i por $K_{máx.}$

$K_i < K_{mín.}$, sustituir K_i por $K_{mín.}$

En la Península Ibérica en general nos encontramos en el caso 1, donde a partir del 1 de noviembre, debido a la distribución de las precipitaciones, se llega antes al período de máxima erosionabilidad $K_{máx.}$ y, posteriormente, según se va agotando la reserva hídrica del suelo se alcanza el valor mínimo $K_{mín.}$.

También en el factor K revisado por ROMKENS *et al.* (1989) se contempla el efecto de la pedregosidad en el suelo, condicionando su erosionabilidad. Las piedras y fragmentos de roca protegen al suelo del impacto de la gota de lluvia y actúan de «pavimento» protector (JENNINGS y JARRETT, 1985). Por otra parte, la presencia de piedras reduce el volumen de suelo infiltrable y la conductividad en profundidad, y es necesario, por tanto, tener en cuenta la fracción del suelo superior a 2 mm que afecta de esta manera al proceso de la infiltración. (Esta fracción de «gravas» normalmente se excluye de los análisis granulométricos del suelo para el

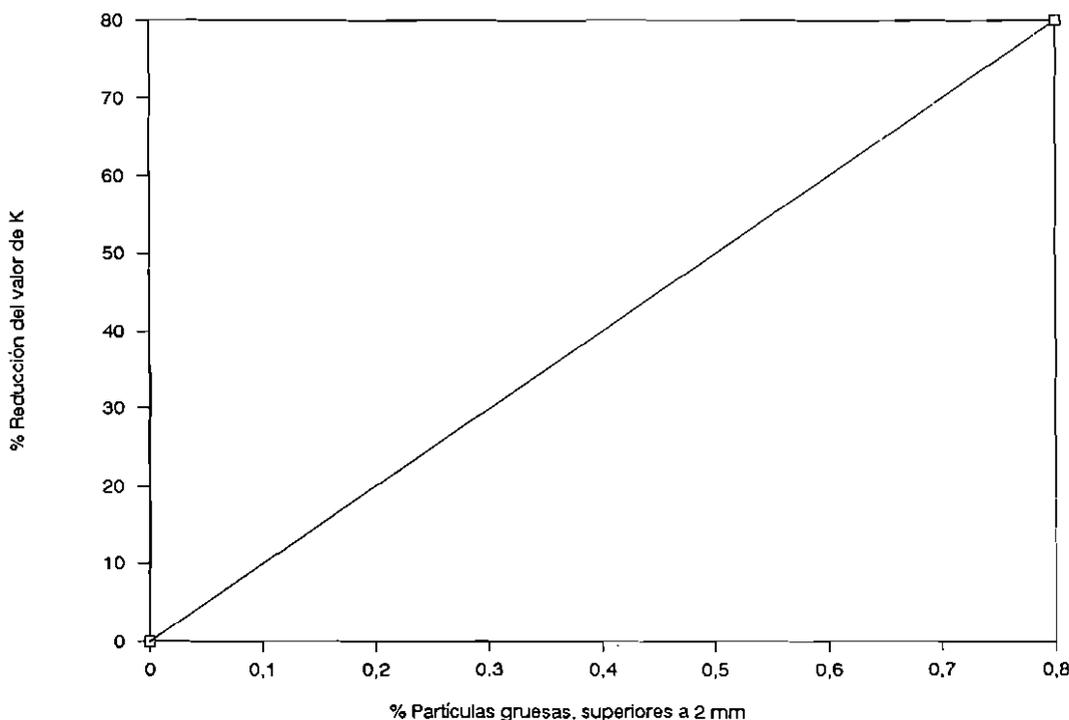


Fig. 11. Efecto de la presencia de fragmentos de roca o pedregosidad en el perfil del suelo, disminuyendo el factor de erosionabilidad del suelo, K.

cálculo de K, y es necesario entonces considerarla por separado.)

El efecto de «cobertura» de las piedras de superficie es mucho más notable que el efecto de reducción de la permeabilidad de las piedras en el perfil del suelo y, así, debe considerarse que la pedregosidad reduce la erosionabilidad del suelo, según aparece en la Fig. 11. En la Fig. 12 se ha representado la variación del factor K con el tamaño medio de las partículas del suelo, indicando un máximo de erosionabilidad para partículas de diámetro geométrico en torno a 0,03 mm, correspondiente a los limos.

Factor topográfico, LS

En la revisión del factor topográfico LS efectuada por MCCOOL *et al.* (1989) se sigue considerando la influencia de las mismas variables, longitud y ángulo de declive, sobre las pérdidas de suelo, si bien se evalúa dicha influencia con algunas modificaciones.

En la fórmula inicial (8) propuesta por WISCHMEIER y SMITH (1978) para el cálculo de este fac-

tor tiene mucho mayor peso el valor de la pendiente s que el de su longitud l, al estar elevado al cuadrado la primera, y a un valor próximo a 0,5 la segunda (aproximadamente 4 veces mayor).

En la RUSLE se aumenta la influencia concedida a la longitud del declive l, teniendo en cuenta que es decisiva para la iniciación de la formación de regueros a partir de los cuales se incrementan notablemente las pérdidas de suelo de las laderas (MEYER *et al.*, 1975; FOSTER *et al.*, 1977). Así, el factor L debe evaluarse a partir de la nueva expresión:

$$L = \left(\frac{l}{22,1} \right)^m \text{ siendo } m = \frac{B}{(1+B)} \tag{15}$$

donde l es la proyección horizontal de la longitud de ladera (no la longitud de la ladera paralela al terreno), y B es el cociente entre la erosión en regueros y la erosión entre regueros que se producen en cada parcela, y puede evaluarse en función de la pendiente del terreno, según la expresión de MCCOOL *et al.*, (1989):

$$B = (\text{sen } \theta / 0,0896) / (3,0 (\text{sen } \theta)^{0,8} + 0,56) \tag{16}$$

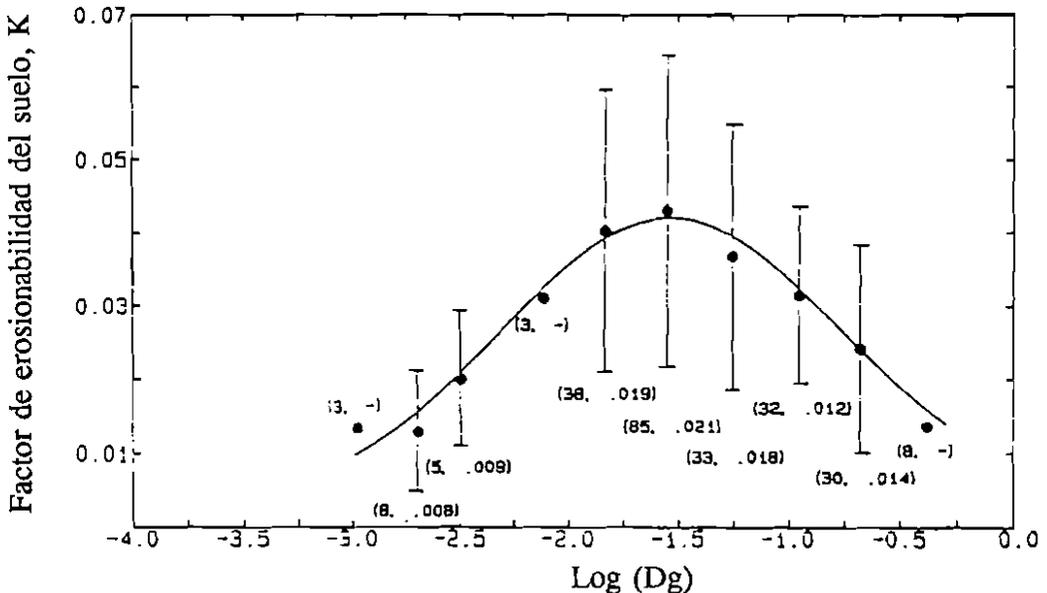


Fig. 12. Factor de erosionabilidad del suelo K en función del diámetro geométrico medio de las partículas del suelo, Dg, en mm. La línea continua ha sido trazada con los valores medios de Dg (clases de Dg con distribución normal), y las barras verticales representan los valores de K en cada clase de Dg, sumando o restando una desviación típica (en ROMKENS *et al.*, 1989).

TABLA IV

VALORES DEL COEFICIENTE m PARA LA OBTENCIÓN DEL FACTOR LS EN FUNCIÓN DE LA PENDIENTE DE LA LADERA Y LA RELACION ENTRE LA EROSIÓN EN REGUEROS Y ENTRE REGUEROS (NO APLICABLE A SUELOS EN DESHIELO) (McCOOL *et al.*, 1989)

Pendiente (%)	Relación erosión en regueros/erosión entre regueros		
	Baja	Moderada	Alta
0,2	0,02	0,04	0,07
0,5	0,04	0,08	0,16
1,0	0,08	0,15	0,26
2,0	0,14	0,24	0,39
3,0	0,18	0,31	0,47
4,0	0,22	0,36	0,53
5,0	0,25	0,40	0,57
6,0	0,28	0,43	0,60
8,0	0,32	0,48	0,65
10,0	0,35	0,52	0,68
12,0	0,37	0,55	0,71
14,0	0,40	0,57	0,72
16,0	0,41	0,59	0,74
20,0	0,44	0,61	0,76
25,0	0,47	0,64	0,78
30,0	0,49	0,66	0,79
40,0	0,52	0,68	0,81
50,0	0,54	0,70	0,82
60,0	0,55	0,71	0,83

siendo θ el ángulo de pendiente. Para cada ladera, según su ángulo de pendiente se calcula el valor de B , y con este último el del coeficiente m a introducir en la expresión de cálculo de L , quedando recogidos sus valores en la Tabla IV.

El factor S es evaluado por estos mismos autores según la expresión:

$$S = 10,8 \operatorname{sen} \theta + 0,03 \text{ si } s < 9\% \quad (17)$$

$$S = 16,8 \operatorname{sen} \theta - 0,50 \text{ si } s \geq 9\% \quad (18)$$

donde se observa la disminución del peso de la pendiente s a través del $\operatorname{sen} \theta$ en el valor de S , sin estar elevada al cuadrado como sucedía en la expresión inicial (6).

El efecto de la pendiente en las pérdidas de suelo es muy variable. En declives muy cortos o donde se prevé que no se van a formar regueros (se considera que los regueros aparecen en general a partir de 5 m de longitud de escorrentía), la fórmula que debe utilizarse es:

$$S = 3,0 (\operatorname{sen} \theta)^{0,8} + 0,56 \quad (19)$$

aplicables a las zonas donde el agua dreña con facilidad.

Las Tablas V, VI y VII dan valores de LS para pendientes uniformes, en diferentes condiciones de suelo. Para pendientes con formas irregulares se deben hacer las correcciones pertinentes en función de la pendiente y la longitud de cada segmento, utilizando la Tabla VIII, según el ejemplo adjunto suministrado por los autores.

Factor de cubierta, C

En el manual de WISCHMEIER y SMITH se incluyen tablas y figuras para calcular este factor del tipo de cubierta, donde se consideran como subfactores de C la cobertura de la parte aérea o de copas de la vegetación, en función de su altura media; la cobertura sobre el suelo procedente de vegetación herbácea o de residuos vegetales «mulch», etcétera, y el manejo o prácticas de los cultivos, con la posible incorporación de los rastrojos al suelo.

DISSMEYER y FOSTER (1983, 1984) han propuesto una modificación al cálculo del factor C en terrenos forestales, considerando en este caso un número mayor de subfactores, relacionados con la copa o parte aérea de la vegetación, con la cobertura

TABLA V

VALORES DEL FACTOR TOPOGRAFICO LS PARA ZONAS DE VEGETACION PERMANENTE Y CONDICIONES DE CONSOLIDACION DEL SUELO, CON UN BAJO PORCENTAJE DE EROSION «EN-REGUEROS» FRENTE A LA EROSION «ENTRE-REGUEROS». PARA UTILIZAR UNIDADES METRICAS CONSIDERAR 1 PIE=0,33 m (McCool *et al.*, 1989)

Pen- diente (%)	Longitud de declive (pies)																
	<3	6	9	12	15	25	50	75	100	150	200	250	300	400	600	800	1.000
0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,5	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
1,0	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17
2,0	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,23	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,34	0,35
3,0	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,29	0,33	0,36	0,38	0,40	0,43	0,44	0,46	0,48	0,52	0,55	0,57
4,0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,36	0,43	0,46	0,50	0,54	0,58	0,61	0,63	0,67	0,74	0,78	0,82
5,0	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,44	0,52	0,57	0,62	0,68	0,73	0,78	0,81	0,87	0,97	1,04	1,10
6,0	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,50	0,61	0,68	0,74	0,83	0,90	0,95	1,00	1,08	1,21	1,31	1,40
8,0	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,64	0,79	0,90	0,99	1,12	1,23	1,32	1,40	1,53	1,74	1,91	2,05
10,0	0,60	0,63	0,65	0,66	0,68	0,81	1,03	1,19	1,31	1,51	1,67	1,80	1,92	2,13	2,45	2,71	2,93
12,0	0,61	0,70	0,75	0,80	0,83	1,01	1,31	1,52	1,69	1,97	2,20	2,39	2,56	2,85	3,32	3,70	4,02
14,0	0,63	0,76	0,85	0,92	0,98	1,20	1,58	1,85	2,08	2,44	2,73	2,99	3,21	3,60	4,23	4,74	5,18
16,0	0,65	0,82	0,94	1,04	1,12	1,38	1,85	2,18	2,46	2,91	3,28	3,60	3,88	4,37	5,17	5,82	6,39
20,0	0,68	0,93	1,11	1,26	1,39	1,74	2,37	2,84	3,22	3,85	4,38	4,83	5,24	5,95	7,13	8,10	8,94
25,0	0,73	1,05	1,30	1,51	1,70	2,17	3,00	3,63	4,16	5,03	5,76	6,39	6,96	7,97	9,65	11,04	12,26
30,0	0,77	1,16	1,48	1,75	2,00	2,57	3,60	4,40	5,06	6,18	7,11	7,94	8,68	9,99	12,19	14,04	15,66
40,0	0,85	1,36	1,79	2,17	2,53	3,30	4,73	5,84	6,78	8,37	9,71	10,91	11,99	13,92	17,19	19,96	22,41
50,0	0,91	1,52	2,06	2,54	3,00	3,95	5,74	7,14	8,33	10,37	12,11	13,65	15,06	17,59	21,88	25,55	28,82
60,0	0,97	1,67	2,29	2,86	3,41	4,52	6,63	8,29	9,72	12,16	14,26	16,13	17,84	20,92	26,17	30,68	34,71

TABLA VI

VALORES DEL FACTOR TOPOGRAFICO LS PARA ZONAS DE CULTIVOS AGRICOLAS ROTURADAS Y OTRAS CONDICIONES DE MODERADA CONSOLIDACION DEL SUELO, CON UNA COBERTURA VEGETAL PEQUEÑA A MODERADA, Y CON BAJO PORCENTAJE DE EROSION «EN-REGUEROS» FRENTE A LA EROSION «ENTRE-REGUEROS» (NO APLICABLE A SUELOS EN DESHIELO. l PIE=0,33 m) (McCool *et al.*, 1989)

Pen- diente (%)	Longitud de declive (pies)																
	<3	6	9	12	15	25	50	75	100	150	200	250	300	400	600	800	1.000
0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06
0,5	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10
1,0	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20
2,0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,19	0,22	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,41	0,44	0,47
3,0	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,25	0,32	0,36	0,39	0,44	0,48	0,52	0,55	0,60	0,68	0,75	0,80
4,0	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,31	0,40	0,47	0,52	0,60	0,67	0,72	0,77	0,86	0,99	1,10	1,19
5,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,37	0,49	0,58	0,65	0,76	0,85	0,93	1,01	1,13	1,33	1,49	1,63
6,0	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,43	0,58	0,69	0,78	0,93	1,05	1,16	1,25	1,42	1,69	1,91	2,11
8,0	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,53	0,74	0,91	1,04	1,26	1,45	1,62	1,77	2,03	2,47	2,83	3,15
10,0	0,46	0,48	0,50	0,51	0,52	0,67	0,97	1,19	1,38	1,71	1,98	2,22	2,44	2,84	3,50	4,06	4,56
12,0	0,47	0,53	0,58	0,61	0,64	0,84	1,23	1,53	1,79	2,23	2,61	2,95	3,26	3,81	4,75	5,56	6,28
14,0	0,48	0,58	0,65	0,70	0,75	1,00	1,48	1,86	2,19	2,76	3,25	3,69	4,09	4,82	6,07	7,15	8,11
16,0	0,49	0,63	0,72	0,79	0,85	1,15	1,73	2,20	2,60	3,30	3,90	4,45	4,95	5,86	7,43	8,79	10,02
20,0	0,52	0,71	0,85	0,96	1,06	1,45	2,22	2,85	3,40	4,36	5,21	5,97	6,68	7,97	10,23	12,20	13,99
25,0	0,56	0,80	1,00	1,16	1,30	1,81	2,82	3,65	4,39	5,69	6,83	7,88	8,86	10,65	13,80	16,58	19,13
30,0	0,59	0,89	1,13	1,34	1,53	2,15	3,39	4,42	5,34	6,98	8,43	9,76	11,01	13,30	17,37	20,99	24,31
40,0	0,65	1,05	1,38	1,68	1,95	2,77	4,45	5,87	7,14	9,43	11,47	13,37	15,14	18,43	24,32	29,60	34,48
50,0	0,71	1,18	1,59	1,97	2,32	3,32	5,40	7,17	8,78	11,66	14,26	16,67	18,94	23,17	30,78	37,65	43,02
60,0	0,76	1,30	1,78	2,23	2,65	3,81	6,24	8,33	10,23	13,65	16,76	19,64	22,36	27,45	36,63	44,96	52,70

TABLA VII

VALORES DEL FACTOR TOPOGRAFICO LS PARA ZONAS DE RECIENTE PREPARACION PARA PLANTACIONES O CULTIVOS Y OTRAS CONDICIONES DE SUELO NO CONSOLIDADO, CON UNA COBERTURA VEGETAL NULA O PEQUEÑA, Y CON UN ALTO PORCENTAJE DE EROSION «EN-REGUEROS» FRENTE A LA EROSION «ENTRE-REGUEROS» (NO APLICABLE A SUELOS EN DESHIELO. 1 PIE=0,33 m) (McCool *et al.*, 1989)

Pen- diente (%)	Longitud de ladera (pies)																
	<3	6	9	12	15	25	50	75	100	150	200	250	300	400	600	800	1.000
0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
0,5	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13
1,0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27
2,0	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,16	0,21	0,25	0,28	0,33	0,37	0,40	0,43	0,48	0,56	0,63	0,69
3,0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,21	0,30	0,36	0,41	0,50	0,57	0,64	0,69	0,80	0,96	1,10	1,23
4,0	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,26	0,38	0,47	0,55	0,68	0,79	0,89	0,98	1,14	1,42	1,65	1,86
5,0	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,31	0,46	0,58	0,68	0,86	1,02	1,16	1,28	1,51	1,91	2,25	2,55
6,0	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,36	0,54	0,69	0,82	1,05	1,25	1,43	1,60	1,90	2,43	2,89	3,30
8,0	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,45	0,70	0,91	1,10	1,43	1,72	1,99	2,24	2,70	3,52	4,24	4,91
10,0	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,57	0,91	1,20	1,46	1,92	2,34	2,72	3,09	3,75	4,95	6,03	7,02
12,0	0,36	0,41	0,45	0,47	0,49	0,71	1,15	1,54	1,88	2,51	3,07	3,60	4,09	5,01	6,67	8,17	9,57
14,0	0,38	0,45	0,51	0,55	0,58	0,85	1,40	1,87	2,31	3,09	3,81	4,48	5,11	6,30	8,45	10,40	12,23
16,0	0,39	0,49	0,56	0,62	0,67	0,98	1,64	2,21	2,73	3,68	4,56	5,37	6,15	7,60	10,26	12,69	14,96
20,0	0,41	0,56	0,67	0,76	0,84	1,24	2,10	2,86	3,57	4,85	6,04	7,16	8,23	10,24	13,94	17,35	20,57
25,0	0,45	0,64	0,80	0,93	1,04	1,56	2,67	3,67	4,59	6,30	7,88	9,38	10,81	13,53	18,57	23,24	27,66
30,0	0,48	0,72	0,91	1,08	1,24	1,86	3,22	4,44	5,58	7,70	9,67	11,55	13,35	16,77	23,14	29,07	34,71
40,0	0,53	0,85	1,13	1,37	1,59	2,41	4,24	5,89	7,44	10,35	13,07	15,67	18,17	22,95	31,89	40,29	48,29
50,0	0,58	0,97	1,31	1,62	1,91	2,91	5,16	7,20	9,13	12,75	16,16	19,42	22,57	28,60	39,95	50,63	60,84
60,0	0,63	1,07	1,47	1,84	2,19	3,36	5,97	8,37	10,63	14,89	18,92	22,78	26,51	33,67	47,18	59,93	72,15

TABLA VIII

CÁLCULO DEL FACTOR TOPOGRÁFICO LS EN UNA PENDIENTE IRREGULAR CONVEXA, DONDE SE IDENTIFICAN TRAMOS DE DISTINTA PENDIENTE

- a) Factor LS de cada segmento en que puede dividirse una ladera de pendiente uniforme (1).
- b) Ejemplo de procedimiento de cálculo de factor LS de la ladera, cuando cada uno de los segmentos en que se divide tiene distinta pendiente.

(a)

Número de tramos	Número secuencial del tramo (comenzando por la parte superior)	Exponente de longitud del declive (n)								
		.05	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8
2	1	0,97	0,93	0,87	0,81	0,76	0,71	0,66	0,62	0,57
	2	1,03	1,07	1,13	1,19	1,24	1,29	1,34	1,38	1,43
3	1	0,95	0,90	0,80	0,72	0,64	0,58	0,52	0,46	0,42
	2	1,01	1,02	1,04	1,05	1,06	1,05	1,05	1,04	1,03
	3	1,04	1,08	1,16	1,23	1,30	1,37	1,43	1,50	1,55
4	1	0,93	0,87	0,76	0,66	0,57	0,50	0,44	0,38	0,33
	2	1,00	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,88	0,85	0,82
	3	1,03	1,05	1,09	1,13	1,16	1,18	1,20	1,22	1,23
	4	1,04	1,08	1,17	1,25	1,33	1,40	1,48	1,55	1,62
5	1	0,92	0,85	0,73	0,62	0,53	0,45	0,38	0,32	0,28
	2	0,99	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,77	0,73	0,69
	3	1,01	1,03	1,04	1,05	1,06	1,06	1,06	1,05	1,03
	4	1,03	1,06	1,12	1,17	1,21	1,25	1,29	1,32	1,35
	5	1,05	1,09	1,17	1,26	1,34	1,42	1,50	1,58	1,65

(1) Valores obtenidos con la expresión $[i^{1+m} - (i-1)^{1+m}] / n^m$, donde i número secuencial del segmento o tramo; m : exponente de longitud del declive, y n el número de segmentos o tramos de la ladera.

(b)

(1) Tramo	(2) Pendiente (%)	(3) LS de Tabla VI	(4) LS de Tabla VIIIa	(5) (3)·(4)/n	(6) LS para el tramo (3)·(4)
1	5	1,13	0,64	0,24	0,72
2	10	2,84	1,05	0,99	2,98
3	15	5,34	1,42	2,53	7,58

LS total para la ladera = 3,76 (Σ col. (5)).

sobre la superficie del suelo con el efecto del sistema radical y con la influencia de la cobertura forestal sobre la microtopografía del terreno, que influye notablemente en las tasas resultantes de erosión.

La fórmula de cálculo propuesta por estos autores es:

$$C_7 = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times C_6 \times C_7 \times C_8 \quad (20)$$

donde C_1 es el subfactor que evalúa el porcentaje de suelo desnudo, sin vegetación directamente en contacto con el mismo; C_2 recoge el efecto de la cobertura de copas; C_3 es el subfactor de consoli-

dación del suelo después de su última roturación, que va aumentando según pasan los años; C_4 se refiere al incremento de materia orgánica aportado por la vegetación forestal, donde los suelos pueden contener porcentajes superiores al 4%, valor máximo considerado para suelos agrícolas recogido en el nomograma inicial del factor K (Fig. 5); C_5 se relaciona con el sistema radical de la vegetación sobre el suelo, distinguiendo si se extiende lateralmente, aumentando su protección del suelo más allá que lo que corresponde a la cobertura de la parte aérea, o si crece verticalmente, sin desarrollo lateral; C_6 incluye el efecto de los residuos del bosque (efecto «mulch»), en general muy abun-

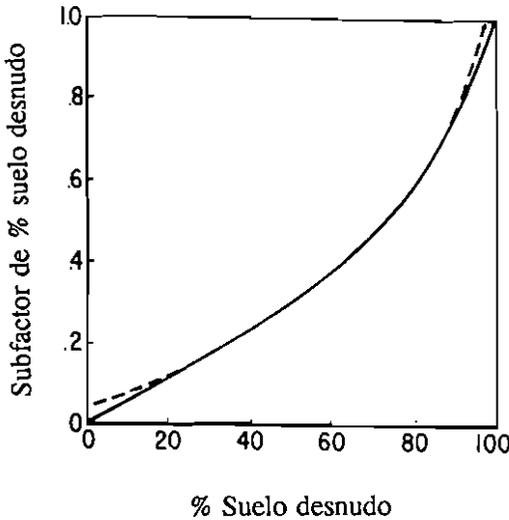


Fig. 13. Subfactor debido al porcentaje de suelo desnudo, sin cubierta ni restos vegetales (DISSMEYER y FOSTER, 1984).

dantes; C_7 se refiere a la capacidad de acumulación de sedimentos del suelo forestal; C_8 recoge la influencia de la microtopografía en «escalones» que existe siempre en las laderas forestales; y finalmente, también se considera un último posible subfactor C_9 , que recoge la influencia de la desviación, respecto a las curvas de nivel, de las líneas de ro-

turación o de preparación del terreno en suelos forestales, donde la excesiva pendiente o las necesidades de drenaje impiden un trazado de las mismas completamente a nivel y se produce una cierta inclinación a favor de la pendiente.

La erosión superficial depende principalmente de la cantidad de suelo desnudo expuesto a la acción de las precipitaciones y de las escorrentías, considerando que donde no existe este suelo desnudo la erosión es prácticamente inexistente. La Fig. 13 y Tablas IX, Xa, Xb, Xc y Xd permiten el cálculo de este subfactor C_1 en función del porcentaje de superficie sin ninguna protección o cubierta, incluyendo en esta última tanto la vegetación de herbáceas, matorrales rastreros, etcétera, como los propios residuos vegetales, hojas caídas, ramillas, piedras, etcétera, y en función de las condiciones de estructura y permeabilidad de los horizontes del suelo, y del efecto de reconsolidación después de la última labor dada al suelo.

Este porcentaje de suelo desnudo puede estar a su vez parcial o totalmente cubierto por las copas o parte aérea de la vegetación de una determinada altura, cuyo efecto trata de recoger el subfactor C_2 , evaluado a través de la Fig. 14 y Tabla XI.

En los terrenos forestales no se realizan labores periódicas del suelo, como sucede en los cultivos agrí-

TABLA IX

VALOR DEL SUBFACTOR C_1 , DEBIDO AL PORCENTAJE DE SUELO DESNUDO EN SUELOS NO ROTURADOS, DONDE EXISTE UN DENSA RED DE RAICES FINAS EN EL HORIZONTE SUPERIOR DEL SUELO

Porcentaje suelo desnudo	Porcentaje de suelo desnudo con una densa red de raíces finas en los 3 cm superiores del suelo										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	.0000										
1	.0004	.0004	.0005	.0006	.0007	.0008	.0010	.0012	.0014	.0016	.0018
2	.0008	.0008	.0010	.0012	.0014	.0017	.0020	.0023	.0027	.0031	.0036
5	.003	.003	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009	.011	.012
10	.005	.005	.006	.008	.009	.011	.013	.015	.017	.020	.023
20	.011	.012	.014	.017	.020	.024	.028	.033	.038	.044	.050
30	.017	.018	.020	.025	.029	.036	.042	.050	.059	.068	.077
40	.023	.024	.027	.034	.042	.049	.058	.068	.079	.092	.104
50	.030	.032	.038	.045	.054	.064	.074	.088	.103	.118	.135
60	.037	.038	.043	.055	.067	.079	.092	.109	.127	.147	.167
70	.047	.049	.054	.068	.083	.098	.117	.138	.161	.187	.212
80	.055	.058	.066	.081	.098	.118	.141	.164	.192	.221	.252
85	.066	.069	.078	.095	.115	.138	.165	.195	.228	.264	.300
90	.075	.080	.089	.111	.133	.157	.187	.222	.260	.301	.342
95	.086	.090	.102	.125	.155	.182	.217	.255	.298	.345	.392
100	.099	.104	.117	.144	.180	.207	.248	.293	.342	.396	.450

TABLA X

VALOR DEL SUBFACTOR C, DEBIDO AL PORCENTAJE DE SUELO DESNUDO EN SUELOS ROTURADOS
(DISSMEYER y FOSTER, 1984)

a) Con una buena red de raíces finas en el horizonte superior del suelo y con buenas condiciones de estructura y permeabilidad en los horizontes inferiores.

Porcentaje suelo desnudo	Meses desde el último cultivo			
	0	6	12	24 +
0	.0000	.0000	.0000	.0000
1	.0014	.0017	.0018	.0020
2	.0029	.0033	.0036	.0041
5	.009	.011	.012	.013
10	.019	.022	.023	.026
20	.037	.045	.049	.056
30	.059	.068	.074	.084
40	.083	.095	.104	.117
50	.108	.124	.136	.153
60	.137	.157	.172	.194
70	.169	.194	.212	.240
80	.212	.244	.267	.301
85	.241	.277	.303	.342
90	.274	.315	.344	.388
95	.313	.360	.393	.444
100	.360	.414	.450	.510

b) Con una escasa red de raíces finas en el horizonte superior del suelo, pero buenas condiciones de estructura y permeabilidad de los horizontes inferiores

Porcentaje suelo desnudo	Meses desde el último cultivo					
	0	6	12-36	48	60	72 +
0	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
1	.0021	.0023	.0025	.0022	.002	.0018
2	.0042	.0047	.0050	.0045	.004	.0036
5	.014	.015	.016	.015	.013	.0117
10	.027	.031	.033	.029	.026	.023
20	.058	.065	.069	.060	.054	.049
30	.087	.098	.103	.092	.082	.074
40	.122	.135	.144	.129	.115	.104
50	.159	.176	.188	.167	.150	.135
60	.201	.224	.239	.213	.190	.171
70	.249	.277	.296	.263	.235	.212
80	.313	.348	.352	.330	.295	.266
90	.403	.448	.479	.426	.380	.342
95	.461	.513	.548	.487	.435	.392
100	.530	.590	.630	.560	.500	.450

colas. Por ello, y en el caso de referirnos a repoblaciones efectuadas con alguna labor de preparación del terreno, es necesario considerar un efecto de reconsolidación progresiva del suelo con el tiempo, desde que se realizó la plantación. La Fig. 15 permite calcular el subfactor C_s, relativo a este efecto de consolidación que determina que a igualdad de las demás circunstancias, la suscepti-

bilidad a la erosión del suelo vaya disminuyendo con el paso de los años.

También es necesario considerar en los terrenos forestales el efecto de la vegetación de pequeño porte, que con su sistema radical realiza una importante labor de sujeción del suelo frente a la erosión. A este respecto es interesante mencionar al-

TABLA X (cont.)

c) Con una escasa red de raíces finas superficiales sin horizonte superior y buenas condiciones de estructura y permeabilidad del subsuelo.

Porcentaje suelo desnudo	Meses desde el último cultivo							
	0	6	12	24	36	48	60	72 +
0	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
1	.0028	.0029	.0030	.0029	.0026	.0022	.0020	.0018
2	.0056	.0058	.0059	.0057	.0052	.0045	.0040	.0036
5	.018	.019	.019	.018	.017	.015	.013	.012
10	.036	.038	.038	.037	.034	.029	.026	.023
20	.076	.079	.080	.077	.070	.060	.054	.049
30	.115	.120	.121	.116	.107	.092	.086	.074
40	.161	.169	.170	.163	.150	.129	.115	.104
50	.210	.220	.222	.213	.195	.168	.150	.135
60	.266	.279	.281	.270	.247	.213	.190	.171
70	.329	.345	.347	.334	.306	.263	.235	.212
80	.413	.432	.436	.419	.384	.330	.295	.266
85	.469	.491	.495	.476	.436	.375	.335	.302
90	.532	.557	.562	.540	.494	.426	.380	.342
95	.609	.638	.643	.618	.566	.487	.435	.392
100	.700	.733	.739	.710	.650	.560	.500	.450

d) Con escasa red de raíces superficiales, horizonte superior ausente y malas condiciones de estructura y permeabilidad del subsuelo.

Porcentaje suelo desnudo	Meses desde el último cultivo							
	0	6	12	24	36	48	60	72 +
0	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
1	.0032	.0033	.0033	.0030	.0026	.0022	.0020	.0018
2	.0064	.0066	.0065	.0059	.0052	.0045	.0040	.0036
5	.021	.022	.021	.019	.017	.015	.013	.012
10	.042	.043	.043	.038	.034	.029	.026	.023
20	.086	.089	.088	.080	.070	.060	.054	.049
30	.131	.136	.134	.122	.107	.092	.084	.074
40	.184	.190	.188	.170	.150	.129	.115	.104
50	.240	.248	.245	.222	.195	.168	.150	.135
60	.304	.314	.311	.281	.247	.213	.190	.171
70	.376	.389	.384	.348	.306	.263	.235	.212
80	.472	.488	.483	.437	.384	.330	.295	.266
85	.536	.554	.548	.496	.436	.375	.335	.302
90	.608	.629	.622	.562	.494	.426	.380	.342
95	.696	.719	.712	.644	.566	.487	.435	.392
100	.800	.827	.818	.740	.650	.560	.500	.450

gunas especies de nuestra flora, adaptadas a zonas muy áridas, cuyo sistema radical tiene a veces una dimensión mucho mayor que su parte aérea, como sucede con el esparto (*Stipa tenacissima*), albarcín (*Lygeum spartium*), algunas especies de *Festuca*, la albaída (*Anthyllis cytisoides*), etcétera.

En la Fig. 16 se recoge la influencia del sistema radical de esta vegetación, incluida en el subfactor

C_4 , cuyos valores pueden también deducirse de la Tabla XII.

En algunos bosques la descomposición de los residuos forestales es muy lenta, y se van acumulando en una capa más o menos densa de «litter» o materia orgánica, que tiene un claro efecto protector del suelo. Ello ocurre en algunos sorobosques del norte de la península, no siendo en general el caso

TABLA XI

SUBFACTOR DEBIDO A LA PROTECCION DE LAS COPAS SOBRE SUELO DESNUDO, EN FUNCION DE SU ALTURA MEDIA (DISSMEYER y FOSTER, 1984)

Altura media de copas (m)	Porcentaje de suelo desnudo con cobertura de copas										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,5	1.00	.91	.83	.74	.66	.58	.49	.41	.32	.24	.16
1,0	1.00	.93	.86	.79	.72	.65	.58	.51	.44	.37	.30
2,0	1.00	.95	.90	.85	.80	.75	.70	.65	.60	.55	.50
4,0	1.00	.97	.95	.92	.90	.87	.84	.82	.79	.76	.74
6,0	1.00	.98	.97	.96	.94	.93	.92	.90	.89	.87	.85
8,0	1.00	.99	.98	.97	.96	.95	.95	.94	.93	.93	.92
16,0	1.00	1.00	.99	.99	.98	.98	.98	.97	.97	.96	.96
20,0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

de los bosques mediterráneos, donde las elevadas temperaturas del ambiente determinan tasas de mineralización de esta materia orgánica más rápidas (ver FASSBINDER, 1986).

Cuando el contenido de materia orgánica del suelo excede el 4%, máximo valor recogido en el nomograma de WISCHMEIER y SMITH (1978) para el cálculo del factor K, es necesario utilizar un coeficiente que recoja la influencia en la disminución de la erosionabilidad del suelo debida a este mayor contenido en materia orgánica, a través del subfactor C_s. Este coeficiente es estimado por DISSMEYER y FOSTER en 0,7, equivaliendo a disminuir

en un 30% el valor del factor K obtenido para la curva de contenido de materia orgánica del 4%.

Otro subfactor importante a tener en cuenta en suelos forestales es el de la rugosidad de la micrografía de las laderas, con numerosos «escalones» donde los sedimentos se van quedando retidos o acumulados, y que indudablemente representa una mayor capacidad de retención, al reducir la pendiente efectiva. En este caso es necesario usar un coeficiente que tenga en cuenta este tipo de disminución de la erosión, para el cual se ha propuesto utilizar la Tabla XIII (ver Fig. 17).

Finalmente, para las laderas donde se hayan realizado prácticas de conservación de suelos, o preparación del terreno para llevar a cabo las plantaciones

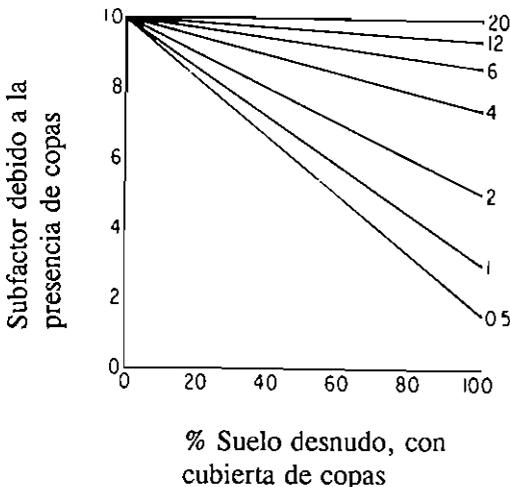


Fig. 14. Subfactor debido a la protección de las copas sobre el suelo desnudo (DISSMEYER y FOSTER, 1984).

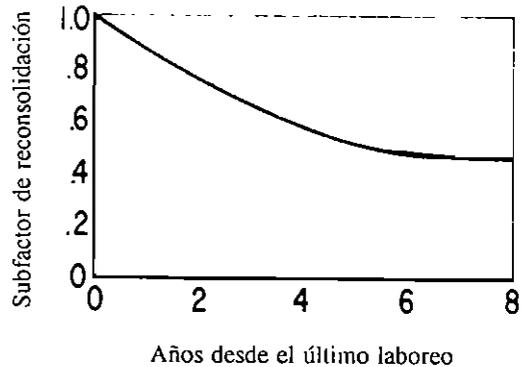


Fig. 15. Subfactor debido al efecto de reconsolidación del suelo desde su última remoción o laboreo (DISSMEYER y FOSTER, 1984).

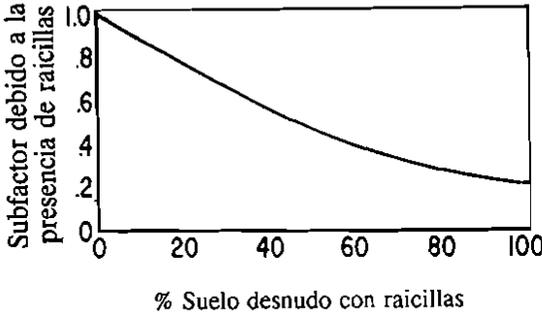
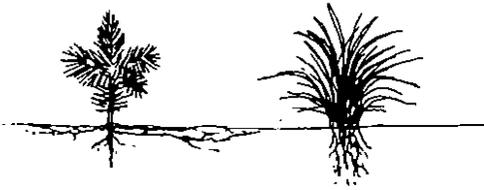


Fig. 16. Efecto portector de la red de raíces finas que se desarrollan en el horizonte superior del suelo (5 cm) procedente de una vegetación invasora (DISSMEYER y FOSTER, 1984).

nes, se propone la consideración de un subfactor C₃, evaluado según se indica en la Tabla XIV, donde se recoge la desviación de las labores practicadas respecto a la curva de nivel.

El valor del factor C en terrenos forestales debe recoger la influencia simultánea de todos estos subfactores, mediante la multiplicación de todos ellos, obteniéndose en general valores muy pequeños que indican la dificultad de los procesos de ero-

TABLA XII
SUBFACTOR DEBIDO A LA PRESENCIA DE RAICILLAS EN EL HORIZONTE SUPERIOR DEL SUELO, EN SUELOS ROTURADOS (DISSMEYER y FOSTER, 1984)

Porcentaje suelo desnudo con raíces finas	Subfactor
0	1.00
10	.87
20	.76
30	.65
40	.56
50	.47
60	.40
70	.34
80	.28
90	.24
100	.22

sión en suelos con cubierta forestal. Si se trata de evaluar el factor C para estos terrenos siguiendo las indicaciones del manual de WISCHMEIER y SMITH (1978) se obtienen siempre valores muy superiores a los reales, y en algunas cuencas puede resultar que es en las zonas forestales donde se estiman las mayores pérdidas de suelo, quizá por ser las de mayor pendiente, cuando en la práctica, si existe una buena cubierta sobre el suelo, esas pérdidas son prácticamente nulas.

Más recientemente, PORTER *et al.* (1989) han revisado la estimación del factor C y sintetizado todas las investigaciones anteriores, determinando cuáles son los factores más efectivos en la protección del suelo. En esta última revisión los autores

TABLA XIII
SUBFACTOR DEBIDO A LOS «ESCALONES» FORMADOS EN LAS LADERAS FORESTALES, EN FUNCION DE SU PENDIENTE (DISSMEYER y FOSTER, 1989)

Pendiente (%)	Porcentaje de ladera con «escalones»										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	1.00	.99	.99	.98	.97	.96	.95	.94	.94	.93	.92
6	1.00	.97	.94	.92	.89	.86	.84	.81	.78	.76	.73
7	1.00	.96	.92	.88	.84	.80	.75	.71	.67	.63	.59
8	1.00	.95	.90	.85	.80	.75	.69	.64	.59	.54	.49
9	1.00	.94	.89	.83	.77	.71	.65	.60	.54	.48	.42
10	1.00	.94	.87	.81	.75	.68	.62	.56	.49	.43	.36
12	1.00	.93	.85	.78	.71	.63	.56	.49	.42	.34	.27
15	1.00	.92	.84	.75	.67	.59	.51	.43	.34	.26	.18
20	1.00	.91	.82	.74	.65	.56	.47	.38	.29	.20	.11
30+	1.00	.91	.81	.72	.63	.53	.44	.35	.25	.15	.06

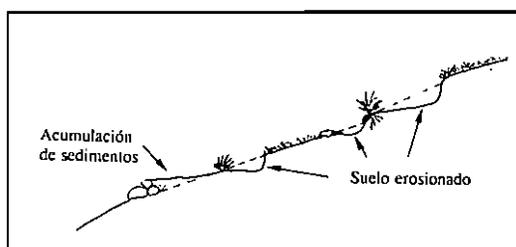


Fig. 17. Pequeños escalones naturales formados en las laderas forestales, que reducen considerablemente la longitud efectiva de la escorrentía. La línea discontinua indica el nivel original de la ladera, con mayor pendiente que la efectiva después de los procesos de erosión y sedimentación.

consideran, para cualquier tipo de cultivo agrícola o vegetación forestal, los siguientes subfactores: la vegetación o cultivo antecedente al actual (PLU); la cobertura del suelo de las copas o parte aérea de la vegetación (CC); la cobertura ofrecida por la vegetación sobre el suelo (SC); y la rugosidad de la superficie (SR), siendo estimado el factor C, o relación de pérdidas de suelo respecto a las condiciones de la parcela estándar SLR, mediante la expresión:

$$SLR = PLU \times CC \times SC \times SR \quad (21)$$

PLU expresa la influencia en la erosión de los cultivos anteriores, la práctica de laboreo dominante, el efecto de consolidación del suelo, el efecto del tiempo y la actividad biológica, y se estima a partir de la fórmula:

$$PLU = DEN (IV + RA \times T) \exp. (-0,00053 RS) \quad (22)$$

siendo DEN una variable de densidad de la superficie; IV el valor inicial de una función decreciente en el tiempo; RA la tasa de variación del efecto

del cultivo anterior; T el tiempo en meses desde que se cambió el cultivo y RS la cantidad de raíces vivas y residuos enterrados que pueden encontrarse en los 10 cm superiores del suelo. En la Tabla XV se dan valores aconsejables de DEN, IV y RA, y en la Tabla XVI se recogen los valores relativos al efecto de la biomasa vegetal enterrada en el suelo, faltando en ambos casos la información relativa a los sistemas forestales.

Factor de prácticas de conservación de suelos, P

Finalmente, respecto al factor de prácticas de conservación de suelos P, que contempla el efecto mecánico de las prácticas de cultivo sobre la cantidad y dirección de la escorrentía, WELTZ *et al.* (1978), aportan sobre los valores dados por WISCHMEIER y SMITH (1978) para los cultivos agrícolas otros relativos a la vegetación de matorral («rangeland»), mejor adaptados a las preparaciones mecánicas del terreno más propias de esta vegetación de monte, que aparecen recogidos en la Tabla XVII.

Discusión

Es indudable que la revisión de la USLE, motivada por una crítica fundamentada en su formulación empírica, ha supuesto un avance en el conocimiento de los procesos de erosión y un incremento de los estudios relativos a los diferentes mecanismos y factores que intervienen. Pero también ha complicado en cierta medida la evaluación de las tasas de erosión, perdiendo la USLE una de sus mayores ventajas frente a otros modelos, cual era su sencillez.

Para llevar a cabo esta revisión de la USLE se ha ampliado el número de parcelas experimentales,

TABLA XIV

SUBFACTOR DEBIDO A LAS LABORES DE PREPARACION DEL TERRENO A NIVEL O CON UNA CIERTA DESVIACION DE ESTE EN SUELOS FORESTALES, EN FUNCION DE LA PENDIENTE DE LA LADERA

Pendiente (%)	A nivel	Grados de desviación respecto a la curva de nivel				
		15	30	45	60	90
0-2	0.80	.88	.91	.94	.96	1.00
3-7	0.70	.82	.87	.91	.94	1.00
8-12	0.80	.88	.91	.94	.96	1.00
13-18	0.90	.94	.96	.97	.98	1.00
19+	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA XV

VALORES PROPUESTOS POR PORTER *et al.* (1989), PARA ESTIMAR LA VARIABLE DE DENSIDAD SUPERFICIAL (DEN), EL VALOR INICIAL DE LA FUNCIÓN DECRECIENTE EN EL TIEMPO (IV) Y LA TASA DE CAMBIO DEL EFECTO DEL CULTIVO ANTERIOR (1/MES) (RA) PARA CONDICIONES DE PASTIZALES Y CULTIVOS AGRÍCOLAS

Uso del suelo	Período	DEN		IV	RA
		No cultivado	Cultivado		
Matorral y pastizal cultivado	Tres años desde el cultivo	—	0,45	1	—0,015
Matorral bajo y pastizal no cultivado	Cualquier período	0,45	—	1	0
Prado permanente	Cualquier período	0,45	—	1	0
Cultivo agrícola	Cualquier período	0,56	0,86	(1)	(2)

(1) Toma valores de 1,4, 1 ó 0,3 en función del tratamiento dado a la cosecha oleaginosa o al prado.

(2) Varía de forma similar a IV, tomando los valores de —0,033, 0 y +0,03, respectivamente.

TABLA XVI

VALORES DE LA VARIABLE RS, O CANTIDAD DE RAICES VIVAS Y RESIDUOS ENTERRADOS, EXISTENTES EN LOS 10 CM SUPERIORES DEL SUELO (lb./acre, plg.) (PORTER *et al.*, 1989)

Uso del suelo	RS
Monte bajo y pastizal:	
Vegetación esteparia, <25% copas	33
Vegetación esteparia, >25% copas	82
Pastizal en malas condiciones	160
Pastizal en buenas condiciones	250
Pastizal en excelentes condiciones	330
— Prados:	
Alfalfa, festuca	100
Otras mezclas	50-230

TABLA XVII

VALORES DE FACTOR DE PRACTICAS DE CONSERVACION DE SUELOS P, EN TERRENOS FORESTALES (WELTZ *et al.*, 1987)

Práctica de conservación de suelos	Factor P
En curvas de nivel (1-16% pendiente)	0,60
En curvas de nivel (17-25% pendiente)	0,85
Terrazas (desagües encespedadas)	0,14
Terrazas (desagües subterráneos)	0,05
Hoyos a nivel	0,13
Sin prácticas de conservación	1,00

aumentando notablemente las existentes al oeste del río Mississippi representativas de los climas, suelos y vegetación muy diferentes a los del este (estados de Colorado, Arizona, Wyoming, Washington, etcétera), lo que ha permitido calcular con mayor precisión el factor de erosividad de la lluvia R en estas regiones (ofreciendo un nuevo mapa ampliado y mejorado de isolíneas de R) y la erosionabilidad de algunos tipos de suelos no representados en el conjunto de parcelas primitivo.

La incorporación de la variabilidad del factor K a lo largo del año en función del contenido de humedad del suelo; la consideración de la longitud de la ladera como determinante de la formación de regueros; la cuantificación de la influencia de la biomasa del sistema radical en la protección del suelo, etcétera, son ejemplos del avance que ha supuesto esta nueva versión, RUSLE, en el conocimiento que se tiene sobre la erosión. Pero es evidente que al ir aumentando los factores o subfactores para el cómputo de la erosión se va complicando su utilización.

La RUSLE necesita de un ordenador para su cálculo y, lo que es quizá más desventajoso, requiere una mayor información de detalle de la zona de estudio, por ejemplo, para calcular el factor C, que a veces no está disponible y tampoco compensa o es posible adquirir, dada la escala de trabajo en función de la superficie de estudio o del tiempo y medios disponibles para realizarlo.

Indudablemente, con la aplicación correcta de la RUSLE se deben obtener unas tasas de erosión más cercanas a la realidad de cada zona que con la USLE según la formulación de WISCHMEIER y SMITH (1978). Pero en cualquier caso hemos de tener en cuenta el carácter empírico del modelo en ambas versiones, y el relativo grado de incertidumbre que debemos otorgar a los resultados obtenidos cuando no se disponga de datos de campo para su contraste, dando a las estimaciones efectuadas no tanto un valor absoluto por las cifras que suministran, sino un valor relativo, en órdenes de magnitud, queriendo cuantificar la mayor influencia de los factores naturales más limitantes en cada caso, la localización de las zonas o superficies más críticas, y las posibilidades de disminuir las tasas de erosión modificando la cubierta vegetal, su uso y prácticas de aprovechamiento.

En este sentido la RUSLE proporciona algunos criterios más de análisis de los factores que intervienen en la erosión que la USLE, detallando en mayor medida las características del suelo, del relieve y de la vegetación que intervienen y facilitando la interpretación de situaciones «equivalentes» en cuanto a su grado de protección del suelo.

Pero desde un punto de vista teórico, la RUSLE sigue siendo un modelo basado en formulaciones empíricas y ajustes estadísticos, al que se puede seguir aplicando gran parte de la crítica efectuada a la USLE, habiendo perdido algunas de las ventajas de esta última.

FUTURO

Hoy día, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos está preparando una nueva metodología para la evaluación de la erosión hídrica, destinada a sustituir a la USLE y RUSLE (LANE *et al.*, 1988).

El nuevo producto, denominado WEPP (Water Erosion Prediction Project) tiene como objetivo general crear una nueva generación de tecnología para predecir la erosión del suelo por el agua mediante el uso de ordenador, cuya plena difusión y funcionamiento están previstos para 1992.

El modelo WEPP representa un gran avance en la formulación matemática del proceso de la erosión, al estar basado en los fundamentos de la teoría de la infiltración, física del suelo, conocimiento de la vegetación y mecánica de la erosión, dentro del campo de la Hidrología y de la Hidráulica.

Este proyecto WEPP trata de analizar el problema de la erosión desde un punto de vista físico y descriptivo matemáticamente, y para ello parte del planteamiento inicial propuesto por MEYER y WISCHMEIER (1969), donde se diferencia la acción de la gota de lluvia y la acción de la escorrentía, su capacidad de remoción del suelo y su capacidad de transporte (factores activos de la erosión); y por otra, las características del suelo en cuanto a su vulnerabilidad a ser desmenuzado y removido, y a ser transportado (factores pasivos de la erosión) (Fig. 18).

Por otra parte, también se contempla la diferencia entre los procesos debidos a la lámina de escorrentía originando una erosión «entre regueros» (*inter-*

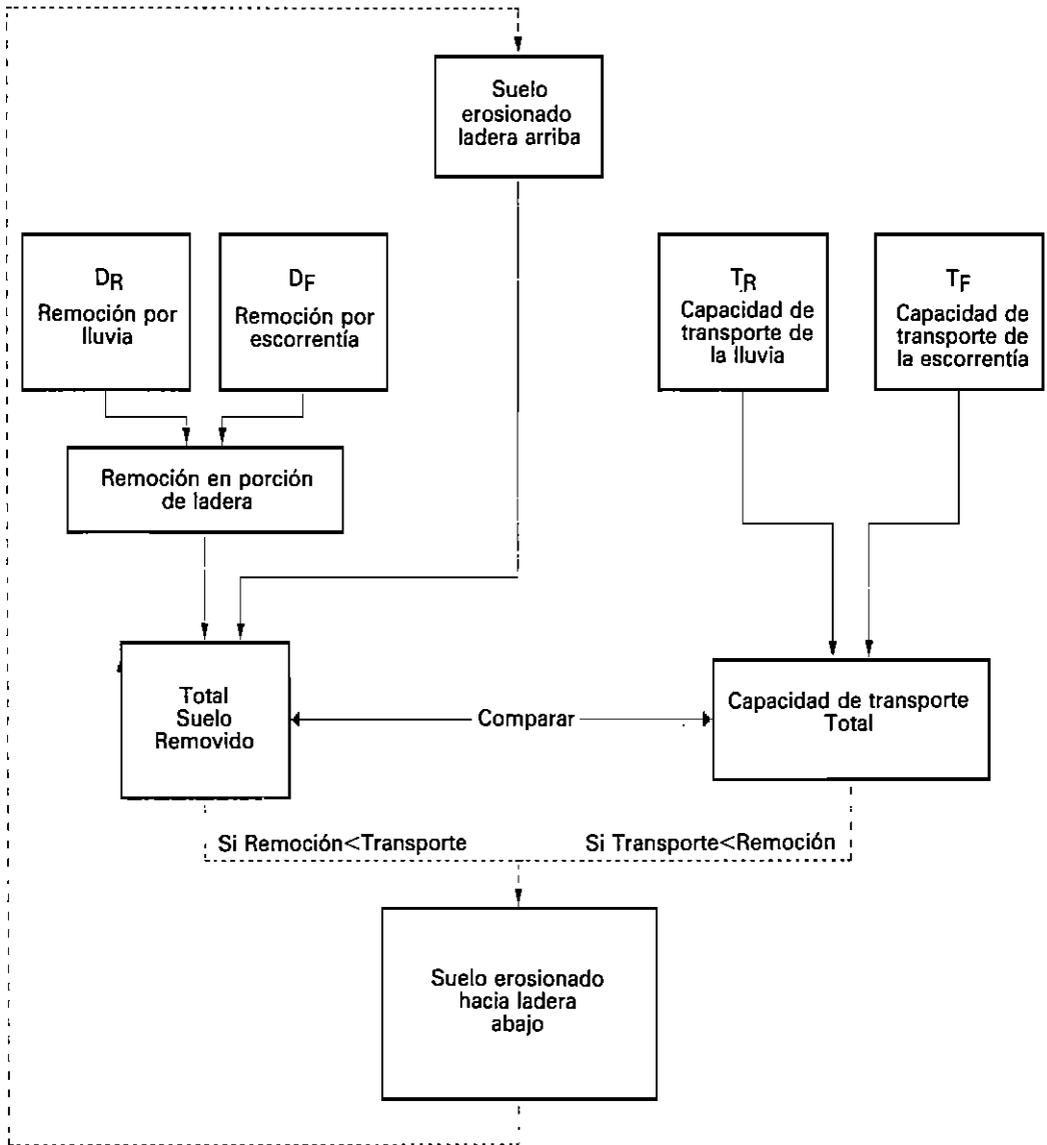


Fig. 18. Esquema de MEYER y WISCHMEIER (1969) para representar el fenómeno de la erosión del suelo por el agua.

rill erosion), y los debidos al agua encauzada en los regueros originando una erosión «en regueros» (*rill erosion*), que la USLE y muchos otros modelos agrupan bajo la denominación general de «erosión superficial».

de la onda cinemática al flujo unidimensional de la escorrentía sobre un plano (ladera):

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q}{\delta x} = i - f \tag{23}$$

La solución conjunta de la aplicación del concepto

donde $\delta h/\delta t$ representa la variación de la altura de la lámina de agua en el tiempo, en un determinado punto o sección de la ladera, $\delta q/\delta x$ representa la variación del caudal específico en ese punto o sección, $e(i-f)$ la lluvia efectiva, como diferencia entre la intensidad de lluvia i y la tasa de infiltración f ; y de la fórmula de Chezy como ecuación de resistencia al flujo del agua:

$$q = K h^{3/2} \quad (24)$$

siendo q el caudal por unidad de anchura ($m^2/seg.$), h la profundidad de la lámina de agua (m) y K el coeficiente de altura-caudal ($m^{3/2}/seg.$), proporciona valores de caudal $q(x, t)$ y calado $h(x, t)$ para cada punto del plano de la ladera, en cada momento del aguacero. Estas variables permiten calcular las restantes variables hidráulicas necesarias para el posterior cálculo de la erosión.

El coeficiente K de la expresión (24) puede escribirse como:

$$K = C \times S^{1/2} \quad (25)$$

donde C es el coeficiente de Chezy ($m^{1/2}/seg.$), o

$$K = (8gS/f)^{1/2} \quad (26)$$

siendo f el factor de fricción adimensional de Darcy-Weisbach. En este caso se considera un factor de fricción total f_{tot} , como suma de las resistencias parciales al paso del agua:

$$f_{tot} = f_{sol} + f_r + f_{cov} \quad (27)$$

debidas al factor de fricción característico del suelo desnudo sobre una ladera uniforme (f_{sol}), al factor de fricción debido a las irregularidades de la microtopografía (f_r) y al factor de fricción debido a la cubierta vegetal existente sobre la superficie del suelo (f_{cov}).

En este modelo WEPP la erosión entre regueros es estimada mediante la expresión:

$$E_i = C_i \times k_i \times i^2 \quad (28)$$

donde E_i es la tasa de erosión entre regueros ($kg, m^{-2} seg.^{-1}$), c_i es un coeficiente adimensional relativo a la cobertura existente entre los regueros; i es la intensidad de lluvia ($mm, seg.^{-1}$) y k_i es un parámetro de erosionabilidad del suelo entre regueros (kg, s, m^{-4}).

La intensidad de la lluvia se refiere a la de la llu-

via efectiva, puesto que cuando la capacidad de infiltración es superior a la intensidad de la lluvia, ésta no contribuye a la erosión entre regueros.

La erosión dentro de los regueros se modeliza como un proceso proporcional a la diferencia entre la capacidad del flujo para transportar el material del suelo removido, T_c , y la cantidad de sedimentos disponibles para ser transportados q_s . Si T_c es mayor que q_s , se produce una remoción y transporte del suelo, evaluado a través de la expresión:

$$E_r = D_c (1 - q_s/T_c) \quad (29)$$

donde E_r es la tasa de suelo removido ($kg, m^{-2} seg.^{-1}$) y D_c es la capacidad de remoción del flujo ($kg, m^{-2} seg.^{-1}$), T_c es la capacidad de transporte del fluido ($kg, m^{-1} seg.^{-1}$) y q_s es el caudal sólido ($kg, m^{-1} seg.^{-1}$).

D_c es a su vez calculada a partir de la expresión:

$$D_c = C_r K_r (\tau - \tau_c) \quad (30)$$

donde C_r es un parámetro adimensional de cobertura del reguero, D_c es la capacidad de remoción ($kg, m^{-2} seg.^{-1}$), K_r es el parámetro de erosionabilidad del suelo en los regueros ($seg., m^{-1}$); τ es la tensión de arrastre media en la sección del reguero (N, m^{-2}) y τ_c es la tensión crítica de arrastre para el inicio del movimiento (N, m^{-2}).

Cuando T_c es menor que q_s , se produce una sedimentación que se simula a partir de la expresión:

$$D_f = D_s (T_c - q_s) \quad (31)$$

donde D_f es la tasa de sedimentación ($kg, m^{-2} seg.^{-1}$) y D_s es un parámetro de tasa de sedimentación (m^{-1}), calculado según la expresión:

$$D_s = (B V_f/q) \quad (32)$$

donde B es un parámetro adimensional; V_f es la velocidad de caída de las partículas ($m, seg.^{-1}$) y q es el caudal específico ($m^2, seg.^{-1}$).

El tiempo de cálculo puede acortarse considerablemente utilizando la ecuación de transporte de sedimentos de Yalin adoptada por FOSTER y MEYER (1975) en la forma:

$$T_c = B \cdot \tau^{3/2} \quad (33)$$

donde B es un coeficiente.

La información detallada para el cálculo de algu-

nos de los coeficientes y parámetros mencionados fue preparada para el modelo CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Systems) (FOSTER *et al.*, 1981, 1985), el cual incluye no sólo rutinas para el cálculo de las escorrentías y las tasas de erosión y sedimentación, sino también el cálculo del balance de nutrientes entre su entrada (prácticas agrícolas, abonos, pesticidas, etcétera) y su salida a través de las escorrentías o de los sedimentos, con el fin de predecir en último término su efecto en la calidad físico-química de las aguas (KNISEL, 1980).

Por otra parte, se está llevando a cabo un amplio programa de investigación de campo para estimar algunos parámetros del modelo, como el coeficiente K de la expresión (24) y los factores de fricción de la ecuación (27); sobre la erosionabilidad del suelo entre regueros K_s de la expresión (28), erosionabilidad del suelo en regueros K_r y tensión crítica de arrastre c_c de la expresión (30); y el parámetro de tasa de sedimentación D_s en cultivos o pastizales, de la ecuación (31).

DISCUSION

Es indudable que se ha avanzado considerablemente en el conocimiento de los procesos erosivos desde que se formuló inicialmente la Ecuación Universal en 1965, a su vez fruto de numerosas investigaciones previas (ver RENARD *et al.*, 1989).

Dicha Ecuación ha representado una tecnología sencilla y fácil de utilizar, sirviendo de herramienta para la gestión y planificación de usos del suelo. Pero hoy día se considera muy limitada al no estar fundamentada en los procesos físicos que trata de simular, representando un modelo de «caja gris», que cuantifica correlaciones entre variables desde un punto de vista puramente empírico.

El mayor conocimiento sobre los mecanismos que entran en juego como agentes de erosión permite evolucionar desde los modelos empíricos, con rangos de aplicación según las zonas de donde se deducen las relaciones empíricas, hacia los modelos con base física, de aplicación mucho más generalizada.

Estos últimos, tratando de reflejar mejor el funcionamiento de los procesos naturales, presentan la desventaja de su complicación, necesitando en ge-

neral de una serie de datos sobre la zona de estudio que a veces no existe. Por otra parte, la supuesta mayor exactitud de los resultados no siempre es comprobable, dada también la escasez de datos observados de erosión para su contraste.

La aplicación de cualquier modelo basado en los procesos físicos necesita en último término la utilización de expresiones empíricas para calcular los parámetros que intervienen en el modelo (si se dispone de datos observados estos parámetros se pueden calibrar u optimizar por el propio modelo, pero en general esta información «de campo» no está disponible, y con más frecuencia el modelo se utiliza para «simular» el proceso, requiriendo el valor inicial de dichos parámetros).

El investigador que crea un modelo, o lo utiliza, en la mayoría de los casos trata de desarrollar con mucho detalle matemático y base física la parte o procesos sobre los que es especialista, englobando bajo expresiones más o menos sencillas y empíricas los procesos que corresponden a otra especialidad (ej. un hidrólogo quizá exprese con mucho rigor matemático el proceso de la infiltración, según la teoría del flujo en medios porosos saturados y no saturados, pero desconozca por completo los fenómenos fisiológicos de la evapotranspiración, la cual estime utilizando relaciones empíricas, circunstancia que sería inversa si el modelo lo plantease un fisiólogo vegetal). En estas expresiones empíricas puede radicar la debilidad de los modelos formulados con base física, cayendo a veces en aproximaciones o simplificaciones similares a las que constituyen la base de los modelos empíricos.

También existen problemas fundamentales en la aplicación de los modelos basados en las leyes físicas, derivados de las limitaciones de las ecuaciones que se utilizan para reflejar la heterogeneidad de la realidad (BEVEN, 1989). En general, dichos modelos proceden de investigaciones de laboratorio realizadas a muy pequeña escala, y están más enfocadas a la propia investigación de los procesos y de las relaciones entre variables que a su aplicación a cuencas vertientes reales, donde su propia dimensión obliga a discretizar la variabilidad espacial de los factores considerados, al menos por cuadrículas, y no es posible su representación mediante variaciones de tipo continuo.

En este sentido hay que considerar al Proyecto WEEP como un avance en el campo de la inves-

tigación teórica de la erosión, dando luz a la interpretación de los factores que determinan este proceso, pero considerando que quizá todavía tengamos por delante un largo camino que recorrer en la investigación básica sobre la erosión, y sobre todo una gran labor de contraste con datos observados y de validación y generalización de las formulaciones propuestas.

Por último, es necesario seguir reconociendo a las expresiones empíricas de la USLE y RUSLE un valor insustituible y mantenido en la era en que se imponen los modelos con base física, como herramientas prácticas y muy útiles para la gestión del control de la erosión. Hay que resaltar también sobre estos dos modelos empíricos la gran base de datos experimentales que han generado en su investigación, sobre los que puede y debe apoyarse la fase de validación de los modelos basados en los procesos físicos, formalmente más correctos y generalizables.

En España, el futuro de la investigación y aplicación de los modelos de erosión debe centrarse en la creación de series de datos «observados», en contraste con los «simulados», sin los cuales nunca será posible conocer el procedimiento o metodología más adecuados a nuestras condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y usos del suelo.

Es indudable que las condiciones de semiaridez que afectan en gran parte de nuestro territorio, unidas a un relieve muy acentuado y a unas prácticas agrícolas ancestrales, han determinado la formación de suelos que no existen en el resto de Europa, don-

de predominan unas condiciones en general mucho más húmedas y relieves notablemente menos acentuados, ni mucho menos en el continente americano donde la roturación de tierras agrícolas y ciertos usos del suelo son históricamente tan recientes.

La labor quizá hoy día más urgente en nuestro país, basada en proyectos de investigación a medio y largo plazo, debe ser pues crear parcelas y cuencas experimentales donde se midan las pérdidas de suelo en ladera y la llegada de sedimentos a los cauces, representativas de cada una de las condiciones más frecuentes de nuestra geografía. Dichos proyectos de investigación, debido a la necesidad de que se mantengan durante períodos superiores al menos a cinco años, deben de estar sólidamente apoyados por la propia Administración relacionada con el estudio y control de la erosión en España, como ha sido sugerido recientemente por SOTO (1990).

Ya en la fase de aplicación de los modelos, sobre todo por parte de los gestores del control de la erosión, ante estas posibilidades cada vez mayores de simulación de los procesos a través de formulaciones matemáticas, nunca se debe olvidar la necesidad del reconocimiento visual, de campo, de dichos procesos, diferentes y característicos en cada caso y región, sin el cual será difícil interpretar, e incluso simular, el comportamiento real de la Naturaleza, cuya componente «impredecible» sigue siendo un gran reto para el hombre y todas las ciencias que se dedican a su conocimiento.

SUMMARY

In this paper, a documented revision of the Universal Soil Loss Equation (USLE) of WISCHMEIER and SMITH (1978) is presented, dealing with its initial formulation, present revision (RUSLE) and the WEPP project prepared in U.S. to replace the USLE in the near future.

The different methodologies to evaluate the erosion factors considered in each formulation are studied, including a review of the main advantages and disadvantages according to the workscale, disponibilities and accuracy of the computed results.

Finally, a brief discussion on physically-based models vs. empirical models is presented, with a proposal for Spain related to the future focus of the research on the erosion processes and their control.

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLDUS, 1977: «Predicting Soil Losses due to sheet and rill erosion». En *Guidelines for watershed management*. FAO Conservation Guide, 1: 99-124. FAO, Roma.
- BEVEN, 1989: «Changing ideas in Hydrology. The case of physically-based models». *Journal of Hydrology*, 105: 157-172.
- BOYCE, R. C., 1975: «Sediment routing with sediment-delivery ratios». En: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. USDA, Agr. Res. Serv., ARS-S-40: 61-65.
- CARTER, C. E.; GREER, J. D.; BRAUD, H. J., y FLOYD, J. M., 1974: «Raindrop characteristics in South Central United States». *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, 17: 1033-1037.
- COLEMAN, D. J., y SCATENA, F. N., 1986: «Identification and evaluation of watershed sediment sources». En: *Drainage Sediment Delivery*. R. F. HARDLEY (ed.): 3-18. IAHS Publ., 159.
- DISSMEYER, G. E., y FOSTER, G. R., 1983: «Modifying the universal soil loss equation for forest land». En: *Soil Erosion and Conservation*. S. A. EL-SWAIFY, W. C. MOLDENHAUER y A. LO (eds.): 480-495. Soil Conservation Society of America Publ., Ankeny, Iowa.
- DISSMEYER, G. E., y FOSTER, G. R., 1984: *A Guide for Predicting Sheet and Rill Erosion on Forest Land*. USDA, Forest Service, TP R8-TP 6. Atlanta, Georgia.
- DUNNE, T., 1977: «Evaluation of erosion conditions and trends». En: *FAO Conservation Guide*, 1: 53-84. FAO, Roma.
- FASSBENDER, H. W., 1986: *Química de Suelos*. IICA, Serie de Libros y Materiales Educativos, 24. 5.ª ed. Costa Rica.
- FOSTER, G. R., y MEYER, L. D., 1975: «Mathematical simulation of upland erosion using fundamental erosion mechanics». En: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 190-207. USDA-ARS, ARS-S-40.
- FOSTER, G. R., y MEYER, L. D., y ONSTAD, C. A., 1977: «A Runoff Erosivity Factor for Variable Slope Length Exponents for Soil Loss Estimates». *Trans. American Society Agricultural Engineers*: 20 (4): 683-687.
- FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; NOWLIN, J. D.; LAFLEN, J. M., y YOUNG, R. A., 1981: «Estimating erosion and sediment yield of field-sized areas». *Trans. American Society of Agricultural Engineers* 24 (5): 1253-1262.
- FOSTER, G. R.; YOUNG, y NEIBLING, W. H., 1985: «Sediment composition for nonpoint source pollution analysis». *Trans. American Society of Agricultural Engineers* 28 (1): 133-139, 146.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M., REDONDO, R., 1989: «Evaluation of the topographic factor LS of the Universal Soil Loss Equation in the «Conca de Tremp» (Spain)». *Proc. 9th Annual AGU Front Range Branch Hydrology Days*, H. J. MORELL-SEYTOUX y J. C. LOFTIS (eds.): 169-180, Fort Collins, Colorado, USA.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M.; JULIEN, P., y REDONDO, J., 1990: «Influencia de la escala de trabajo en la estimación de la erosión mediante el modelo USLE». *I Reunión Nacional de Geomorfología*, M. GUTIÉRREZ, J. L. PEÑA, y M. V. LOZANO (eds.): 607-617. Teruel.
- HORTON, R. E., 1945: «Erosional development of streams and their drainage basins: A hydrological approach to quantitative morphology». *Bull. Geol. Soc. Am.*, 56: 275-370.
- HUDSON, N. W., 1963: «Raindrop size distribution in high intensity storms». *Rhod. J. Agric. Res.*, 1: 6-11.
- ICONA, 1988. *Agresividad de la lluvia en España*. Publ. ICONA, Mo. Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- JENNING, G. D., y JARRETT, A. R., 1985: «Laboratory evaluation of mulches in reducing erosion». *Trans. American Society of Agricultural Engineers* 28 (5): 1466-1470.

- KNISEL, W. G., 1980: «CREAMS. A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems». *USDA Conservation Research Report 26*, USDA-ARD, Washington, D. C.
- LANE, L. J.; SCHERTZ, D. L.; ALBERTS, E. E.; LAFLÉN, J. M., y LOPES, V. L., 1988: «The US National Project to develop improved erosion prediction technology to replace the USLE». En: *Sediment Budgets*, Procs. of the Proto Alegre Symp., IAHS Publ. 174: 473-481.
- MCCOOL, D. K.; WISCHMEIER, W. H., y JOHNSON, L. C., 1982: «Adapting the USLE to the Pacific Northwest». *Transactions of the ASAE*: 928-934.
- MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R., y WEESSIES, G. A., 1989: «Slope length and Steepness factors (LS)». En: *The Revised Universal Soil Loss Equation*, Chapter 4. USDA-ARS Tucson, Arizona (sin publicar).
- MEYER, L. D., FOSTER, G. R., y ROMKENS, M. J. M., 1975: «Source of soil eroded by water from upland slopes». En: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, USDA, Agr. Res. Serv. ARS-S-40: 177-189.
- MEYER, L. D., y WISCHMEIER, 1969: «Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water». *Trans. American Society of Agricultural Engineers* 12: 754-758, 762.
- MORGAN, R. P. C., 1986: *Soil Erosion and Conservation*. Longman Scientific and Technical.
- MUSGRAVE, G. W., 1947: «The quantitative evaluation of factors in water erosion. A first approximation». *J. Soil and Water Conserv.* 2: 133-138.
- PORTER, J. P.; LAFLÉN, J. M.; SIMANTON, F. R.; RENARD, K. G., y MCCOOL, D. K., 1989. «Cover-Management Factor (C)». En: *The Revised Universal Soil Loss Equation*, Chapter 5. USDA-ARS Tucson, Arizona (sin publicar).
- RENARD, K. G.; MEYER, L. D., y FOSTER, G. R., 1989: «Introduction and History». En: *The Revised Universal Soil Loss Equation*, Chapter 1. USDA-ARS Tucson, Arizona (sin publicar).
- ROEHL, J. W., 1962: «Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors». *International Association of Scientific Hydrology*, Publ. 59: 202-213.
- ROMKENS, M. J. M.; YOUNG, R. A.; POESSEN, J. W. A.; EL-SWAIFY, S. A., y BRADFORD, J. M., 1989: «The Usle Soil Erodibility Factor». En: *The Revised Universal Soil Loss Equation*, Chapter 3. USDA-ARS Tucson, Arizona (sin publicar).
- SIMANTON, J. R.; OSBORN, H. B., y RENARD, K. G., 1980: «Application of the USLE to Southwestern Rangelands». En: *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*, Vol. 10: 213-220.
- SMITH, D. D., 1958: «Factors affecting rainfall erosion and their evaluation». *Int. Assoc. Scient. Hydrol. Pub.*, 43: 97-107.
- SOTO, D., 1990: «Aproximación a la medida de la erosión y medios para reducir ésta en la España Peninsular». *Ecología*, Fuera de Serie 1: 169-196.
- WELTZ, M. A.; RENARD, K. G., y SIMANTON, J. R., 1987: «Revised Universal Soil Loss Equation for Western Rangelands». En: *Strategies for Classification and Management of Native Vegetation for Food Production in Arid Zones*. E. F. ALDON, C. F. GONZALES VICENTE y W. H. MOIR (coord.), USDA Forest Service, GTR RM-150: 104-111. Fort Collins, Colorado.
- WILLIAMS, J. R., y BERDNT, M. D., 1972: «Sediment yield computed with universal soil loss equation». *J. Hydr. Div. ASCE* 98 (HY 12): 2087-2098.
- WILLIAMS, J. R., y BERDNT, M. D., 1977: «Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds». En: *Soil Erosion Prediction and Control*. Procs. National Conference on Soil Erosion, Indiana: 217-225.
- WISCHMEIER, W. H., 1978: «Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation». *J. Soil and Water Conser.*, 31: 5-9.
- WISCHMEIER, W. H., y SMITH, D. D., 1962: «Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning». *Int. Assoc. Scient. Hydrol. Pub.*, 59: 148-159.

- WISCHMEIER, W. H., y SMITH, D. D., 1978: *Predicting rainfall erosion losses*. USDA Agr. Res. Serv. Handbook, 537.
- ZANCHI, C., y TORRI, D., 1980: «Evaluation of Rainfall Energy in Central Italy». En: *Assessment of Erosion*. M. DE BOODT, y D. GABRIELS (eds.): 133-142. John Wiley and Sons, Chichester.
- ZING, A. W., 1940: «Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff». *Aric. Engng.*, 21: 59-64.