Ingeniería hidráulica en México, vol. XXI, núm. 4, pp. 33-41, octubre-diciembre de 2006

Pérdida tolerable de suelo: modelo para su estimación en la ordenación de cuencas hidrográficas

Rosario Tejera-Gimeno
Fernando García-Robredo
Ricardo García-Díaz

Universidad Politécnica de Madrid, España

Se presenta un modelo para la estimación de la pérdida tolerable de suelo, criterio fundamental en la ordenación de cuencas hidrográficas. El modelo se basa en el axioma de que la máxima pérdida tolerable de suelo sea inferior a la cantidad de suelo formado por el sistema ecológico, y se establece la función matemática que lo describe. A partir de esta función matemática se han tabulado los valores máximos de pérdida tolerable, en función de la profundidad, para los suelos clímax españoles, y mediante su aplicación se ha obtenido la pérdida tolerable de los suelos de la cuenca del tramo medio del río Jarama.

Palabras clave: pérdida tolerable de suelo, erosión, ordenación de cuencas hidrográficas.

Introducción

La ordenación de cuencas hidrográficas tiene como objetivos permanentes la conservación de los recursos agua, suelo y vegetación. Sin embargo, el enfoque del desarrollo sostenible en sus tres aspectos (ambiental, económico y social) incorpora una visión holística del territorio de la cuenca (Tejera, 2001). Con ello, se pretende garantizar un uso adecuado de todos los recursos naturales que se integran en ella.

La conservación del suelo tiene, entre otros objetivos, la lucha contra la erosión hídrica y, en este sentido, el modelo USLE (Wischmeier y Smith, 1965), y sus posteriores actualizaciones RUSLE (Lane *et al*., 1988; Renord, 1997), constituyen las herramientas básicas para determinar lo idóneo de usos de un suelo de acuerdo con su tasa de erosión potencial.

El referido modelo USLE permite la evaluación de las pérdidas de suelo por erosión laminar y en regueros mediante la expresión paramétrica siguiente:

$$A = R.K.S.L.C.P$$

Donde A ($t.ha^{-1}$) es la pérdida de suelo por unidad de superficie que se obtiene por el producto de los siguientes factores:

R ($J.m^{-2}.cm.hora^{-1}$), factor lluvia o índice de erosión pluvial, que representa la potencia de un aguacero para erosionar superficialmente el suelo. Se define como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en treinta minutos: $E.I_{30}$. Siendo E la energía cinética del aguacero e I_{30}, la intensidad de la lluvia en lo treinta minutos.

$K\left(\frac{t.m^2 hora}{ha.J.cm}\right)$, factor erosionabilidad de suelo, valor de la erosión por unidad de índice de erosión pluvial para un suelo determinado en barbecho continuo con una pendiente del 9% y una longitud de declive de 22.1 metros

L (adimensional), factor longitud de declive, relación entre la pérdida de suelo para una longitud determinada y la pérdida para una longitud de 22.1 m del mismo tipo de suelo.

S (adimensional), factor pendiente, relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9% del mismo tipo de suelo.

C (adimensional), factor cultivo y ordenación, relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes para ese tipo de suelo en barbecho continuo.

P (adimensional), factor prácticas de conservación del suelo, relación entre las pérdidas de suelo con cultivo a nivel, en faja, y en terraza, y las pérdidas de suelo correspondientes a un cultivo en surcos según la pendiente.

Sin embargo, aunque hoy día las nuevas metodologías (Tejera, 2001) consideren otros recursos, además

del suelo en la ordenación de la cuenca, el modelo USLE y su posterior actualización, RUSLE, siguen siendo la guía para la selección de medidas o propuestas para la conservación de determinados terrenos. Para este tipo de aplicación es necesario el previo conocimiento del concepto de "tolerancia de pérdidas de suelo". Del contraste de este valor con las pérdidas potenciales de suelo calculadas con el modelo USLE para los distintos usos de suelo posibles en el terreno se obtienen los usos más adecuados para su conservación.

Concepto de pérdida tolerable de suelo

La pérdida tolerable de un suelo se define como la "cantidad de suelo en t/ha·año que un terreno puede perder sin que se vea afectada su productividad" (Mellerowica, 1994). Anteriormente se definió como "la máxima pérdida de suelo que puede aceptarse, alcanzando todavía el grado de conservación necesario para mantener una producción económica en un periodo futuro previsible" (López y Blanco, 1976).

La pérdida tolerable constituye el elemento básico para la aplicación del modelo USLE en la ordenación de cuencas hidrográficas y depende de factores como la profundidad del suelo, sus propiedades físicas, el desarrollo de los sistemas radicales de la vegetación, la reducción de la materia orgánica o la pérdida de nutrientes.

Cuando se aplica en la práctica este concepto, viene utilizándose el cuadro 1 (López *et al*., 1994), que establece la pérdida de suelo tolerable en función de la profundidad de los sistemas radicales.

Con carácter simplificador y como cuantificación aproximada, se estima que las pérdidas máximas admisibles en un suelo maduro y bien desarrollado, de textura media, permeabilidad moderada y con un subsuelo favorable a la vida de las plantas son, como media, de hasta 12.5 t/ha·año (Wischmeier, 1978). Sin embargo, para suelos arenosos profundos son admisibles pérdidas de 4-6 t/ha·año, y en los francos profundos y fértiles de 13 a 15 t/ha·año (Hudson, 1982).

En función de la máxima pérdida tolerable se confeccionó la "Clasificación provisional para la evaluación de la degradación de los suelos" (FAO, PNUMA, UNESCO, 1981), que propone el baremo que se observa en el cuadro 2.

Sin embargo, desde un punto de vista acorde con el enfoque de la sostenibilidad, la máxima pérdida de suelo tolerable debería ser, como máximo, igual a la cantidad de suelo que el sistema ecológico es capaz de generar, lo que, a su vez, dependerá de las características de cada suelo y de las condiciones del medio en que se encuentre.

Cuadro 1. Guía para la tolerancia de pérdidas de suelo para distintas profundidades de raíces.

Profundidad de raíces (cm)	Valores de tolerancia de pérdidas de suelo (t/ha·año)	
	a	b
0-25	2.2	2.2
25-50	4.5	2.2
50-100	6.7	4.5
100-150	9.0	6.7
> 150	11.2	11.2

a = suelos con sustrato favorable, que pueden ser renovados por labores, fertilizantes, adición de materia orgánica y otras prácticas de cultivo.
b = suelos con un sustrato desfavorable, como es el caso de rocas descompuestas, en las que no resulta económica su renovación artificial.
Fuente: López *et al*., 1994.

Cuadro 2. Clasificación provisional para la evaluación de la degradación de los suelos.

Pérdidas de suelo *A* (t/ha·año)	Grado de erosión hídrica
<10	Ninguna o ligera
10-50	Moderada
50-200	Alta
>200	Muy alta

Fuente: FAO, PNUMA, UNESCO, 1981.

Descripción del modelo

Planteamiento general

El modelo que se propone para estimar la pérdida tolerable de un suelo se fundamenta en que dicha pérdida tolerable tiene como límite superior la cantidad de suelo formado y en que la velocidad de formación de un suelo está directamente relacionada con la evolución de su profundidad a lo largo del tiempo.

Si se establecen analogías con otros procesos biológicos de evolución y crecimiento, el aumento de la profundidad de un suelo a lo largo del tiempo se puede expresar por una función de tipo sigmoidal. Al representarla gráficamente se obtiene una curva de pendiente creciente en su primer tramo, en el que la profundidad del suelo crece rápidamente durante la formación del horizonte A, hasta alcanzar un punto de inflexión a partir del cual el aumento de la profundidad se hace progresivamente más lento hasta estabilizarse en su estado clímax (Birkeland, 1984).

Con este planteamiento, a cada tipo de suelo le corresponde una función característica $z=f(t)$, donde z es la profundidad y t es el tiempo de formación.

La velocidad de formación del suelo, en cada momento para una profundidad *z*, vendrá dada por la derivada de la profundidad respecto al tiempo y adopta una expresión del tipo:

$$v = \frac{dz}{dt} = K \bullet z \bullet \frac{E - z}{E} \qquad (1)$$

siendo *E* el máximo espesor que puede alcanzar el suelo en su estado clímax.

En esta expresión se observa que la velocidad de formación del suelo crece con la profundidad *z*. Este fenómeno se justifica porque cuanto mayor sea la profundidad del suelo mayor será su capacidad de retención de agua, mayor la posibilidad de existencia de raíces y de otros seres vivos que faciliten un mayor grado de alteración química y, en definitiva, que favorezcan la intensidad de todos los procesos pedogénicos.

Por su parte, el término $\frac{E-z}{E}$ refleja el hecho de que la profundidad del suelo no crece indefinidamente; dadas unas condiciones ambientales, el suelo alcanza en su estado clímax un espesor máximo (*E*). Este espesor dependerá de las características climáticas, fisiográficas, litológicas y el tipo de vegetación que pueda asentarse en el mismo. Es decir, el factor *z* crece asintóticamente a *E*.

A su vez, de (1) se deduce que:

$$dz\left(\frac{1}{z} + \frac{1}{E - z}\right) = K \bullet dt \qquad (2)$$

Si se considera que a un tiempo cero le corresponde un espesor mínimo inicial ε (roca con un principio de alteración y/o una vegetación muy rudimentaria asentada sobre ella) y *T* es el momento en que el suelo ha alcanzado su equilibrio (clímax) con las condiciones ambientales (profundidad *E*-ε), se puede integrar la ecuación (2) entre 0 y *T*.

$$\int_{\varepsilon}^{E-\varepsilon} \left(\frac{1}{z} + \frac{1}{E - z}\right) dz = \int_{0}^{T} K dt$$

$$\left[\log_e(z) - \log_e(E - z)\right]_{\varepsilon}^{E-\varepsilon} = \left[K \bullet t\right]_0^T$$

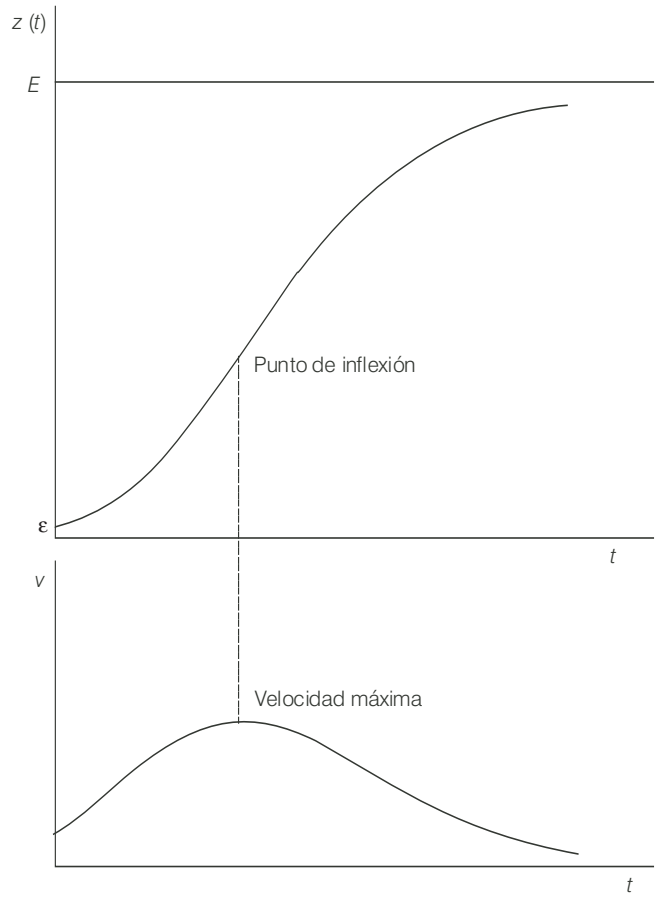
de donde se deduce que:

$$\log_e(E - \varepsilon) - \log_e(\varepsilon) - \log_e(\varepsilon) + \log_e(E - \varepsilon) = K \bullet T$$

y por lo tanto *K* tiene la expresión:

$$K = \frac{2\log_e(E - \varepsilon) - 2\log_e(\varepsilon)}{T} \cong \frac{2\log_e(E)}{T}$$

Ilustración 1. Curvas de evolución de la profundidad de un suelo y velocidad de formación del suelo.



Sustituyendo *K* en la ecuación (1) se obtiene la expresión de la velocidad en función del máximo espesor de suelo *E*, del tiempo *T* en que se alcanza este máximo y del espesor *z*, que es variable en función del tiempo *t*, es decir:

$$v = \frac{2\log_e(E)}{T} \bullet z \bullet \frac{E - z}{E} \qquad (3)$$

Si se expresan *E* y *z* en centímetros y *T* en años, la profundidad de suelo que se genera al año será de *v* centímetros cuando el espesor de suelo sea *z*. Para una densidad aparente de suelo de 1.25 g/cm^3, esta profundidad equivale a una cantidad de suelo formado, por hectárea y año, de:

$$v \bullet 1.25 \text{ g/cm}^3 = \frac{250\log_e(E)}{T} \bullet z \bullet \frac{E - z}{E} \text{ t/ha.año} \qquad (4)$$

que, de acuerdo con el fundamento del modelo, será la máxima cantidad de suelo que es permisible perder.

Edades y espesores de los suelos clímax españoles

La mayor parte de los suelos españoles responden esencialmente a cuatro procesos pedogénicos distintos:

a) Levigación con mayor o menor tendencia a la podsolización. Proceso típico de los climas templado-fríos y suficientemente húmedos cuando el terreno es llano o cuasillano. Este tipo de suelo se forma con bastante rapidez. Esto es, entre 550 años en arenas incoherentes (Sondheim *et al*., 1981) y de dos mil a tres mil años (Duchaufour, 1987) cuando la roca es coherente y/o cuando su naturaleza calcárea precisa una primera descarbonatación.

b) Braunificación o calcimorfización. Procesos característicos de los climas templado-fríos, en los que la menor pluviosidad y/o la pendiente y/o la abundancia de carbonato cálcico ralentizan la evolución del suelo, y de aquellos suelos mediterráneos asentados sobre caliza y donde la pendiente impide la descarbonatación. En estas circunstancias, la formación de suelo estable requiere un tiempo variable entre cinco mil (Wilke, 1975) y diez mil años (Birkeland, 1984).

c) Fersialitización restringida. Proceso característico de los climas templado-cálidos mediterráneos, semiáridos o subhúmedos, pero sin monosialitización y con un horizonte B_t arcilloso debido esencialmente al fenómeno de argillización *in situ*. Este es el tipo de suelos que algunos autores (Duchaufour, 1987) denominan "suelos de ciclo largo". Las cifras de formación de suelo completo y estable en estas circunstancias oscilan entre cincuenta mil y cien mil años (Bornand, 1978; Spaargaren, 1979).

d) Fersialitización total. Proceso que se observa cuando el clima es templado-cálido mediterráneo subhúmedo, en zonas llanas, formando suelos maduros a edades superiores a quinientos mil o un millón de años (Torrent *et al*., 1980; Porta *et al*., 1994).

Los espesores de los distintos suelos estables pueden ser muy variables, pero se adopta un valor máximo de 120 cm si la roca es coherente y de 200 cm sobre materiales incoherentes (Monturiol y Guerra, 1983).

Tablas de pérdida tolerable obtenidas

De acuerdo con el apartado anterior, se consideran seis edades posibles de suelos maduros españoles: 1,000, 5,000, 10,000, 100,000, 500,000 y 1,000,000 de años. Aplicando la ecuación (4) para un espesor máximo $E=120$ cm se obtienen los resultados del cuadro 3, y para un espesor máximo de suelo $E=200$ cm los resultados serían los recogidos en el cuadro 4. En ambos casos, los datos reflejan la pérdida tolerable, en toneladas por hectárea y año, según el espesor de suelo z y las distintas posibilidades de T y E.

Aplicación a la cuenca del tramo medio del río Jarama. Resultados obtenidos

Breve descripción de la cuenca

El modelo descrito se aplicó a la cuenca media del río Jarama (Tejera, 2001), cuya superficie comprende 23,627 ha distribuidas en doce términos municipales, todos ellos de la provincia de Guadalajara, próxima al noroeste de la Comunidad de Madrid, en España (ilustración 2). La cuenca se encuentra dentro del área de clima mediterráneo español, aunque presenta un ligero contraste de temperaturas entre las zonas altas (más frías) y las de llanura o campiña (más cálidas).

Cuadro 3. Pérdida admisible de suelo en (t/ha.año) para *E* = 120 cm, *T* en años.

Profundidad actual del suelo (cm)	T=1,000	T=5,000	T=10,000	T=100,000	T=1,000,000
10	10.97	2.19	1.10	0.11	0.02
20	19.95	3.99	1.99	0.20	0.04
30	26.93	5.39	2.69	0.27	0.05
40	31.92	6.38	3.19	0.32	0.06
50	34.91	6.98	3.49	0.35	0.07
60	35.90	7.18	3.59	0.36	0.07
70	34.91	6.98	3.49	0.35	0.07
80	31.92	6.38	3.19	0.32	0.06
90	26.93	5.39	2.69	0.27	0.05
100	19.95	3.99	1.99	0.20	0.04
110	10.97	2.19	1.10	0.11	0.02

Cuadro 4. Pérdida admisible de suelo en (t/ha.año) para *E*= 200 cm, *T* en años.

Profundidad actual del suelo (cm)	*T*=1,000	*T*=5,000	*T*=10,000	*T*=100,000	*T*=500,000
10	12.58	2.52	1.26	0.13	0.02
20	23.84	4.77	2.38	0.24	0.05
30	33.78	6.76	3.38	0.34	0.07
40	42.39	8.48	4.24	0.42	0.08
50	49.67	9.93	4.97	0.50	0.09
60	55.63	11.13	5.56	0.56	0.11
70	60.27	12.05	6.03	0.60	0.12
80	63.58	12.72	6.36	0.64	0.13
90	65.57	13.11	6.56	0.66	0.13
100	66.23	13.25	6.62	0.66	0.13
110	65.57	13.11	6.56	0.66	0.13
120	63.58	12.72	6.36	0.64	0.13
130	60.27	12.05	6.03	0.60	0.12
140	55.63	11.13	5.56	0.56	0.11
150	49.67	9.93	4.97	0.50	0.09
160	42.39	8.47	4.24	0.42	0.08
170	33.78	6.76	3.38	0.34	0.07
180	23.84	4.77	2.38	0.24	0.05
190	12.58	2.52	1.26	0.13	0.02

Ilustración 2. Localización del tramo medio del río Jarama.

Cuenca del tramo medio del río Jarama

Las mayores altitudes de la cuenca se encuentran en la zona norte, con 1,810 m en el pico de Centenera y 1,436 m en Cabeza de Almiruete, siendo la altitud mínima la de 730 m. La pendiente oscila entre el 40 y el 6%, siendo la media de 23.85%.

La cuenca está constituida por terrenos muy degradados y con un alto grado de erosión. Las causas más relevantes que condicionan esta situación son:

• El sustrato geológico, formado por conglomerados silíceos incoherentes, integrado por arenas y arcillas rojas de granulometría variada y cuarcitas en forma de cantos rodados; es muy erosionable, especialmente a lo largo de la margen izquierda del río Jarama.
• Las talas abusivas y sostenidas a lo largo del tiempo que hicieron desaparecer el bosque natural, favoreciendo el desarrollo de la vegetación arbustiva en terrenos con pendientes muy elevadas (superiores al 30%), que ofrecen menor grado de protección al suelo.
• Las labores agrícolas de cultivo realizadas en terrenos con pendientes superiores al 12%, sin prácticas de conservación de suelos.
• La reciente disminución de la carga ganadera que ha generado la invasión del matorral en los pastizales.

Debido a que el tramo medio del río Jarama tiene una extensión reducida, las influencias diferenciales del clima no son apreciables, estando condicionada la evolución de los suelos a factores litológicos y topográficos del terreno. Con base en esta premisa se han identificado los siguientes tipos de suelo (FAO/UNESCO, 1998):

1. Antrosoles plágicos y hórticos. Coinciden prácticamente con litologías del Cuaternario que se presentan en forma de mancha alargada, coincidiendo con el eje del río y en ambas orillas. Son suelos poco evolucionados con perfiles A, C, poco diferenciados, de excelentes características de textura, pedregosidad variable, buena permeabilidad y excelente aireación, lo que los hace muy aptos para el cultivo agrícola, uso al que están dedicados en esta cuenca.

2. Planosuelos dístricos y luvisoles oleicos. Se denominan así aquellos suelos que presentan un horizonte B de arcillas muy finas iluviadas, que generan una capa impenetrable a las raíces por falta de aireación que impide el drenaje, provocando fenómenos de hidromorfía. Están localizados al sur de la cuenca, sobre llanuras del Plioceno, sobre materiales detríticos incoherentes y heterogéneos que se denominan vulgarmente "rañas". Se dedican fundamentalmente a cultivos de secano, aunque a menudo presentan abarrancamientos que los hace inadecuados para la agricultura. Para frenar este proceso de erosión deberían reforestarse con especies arbóreas que actúan frenando el intenso lavado de arcillas. El perfil puede ser A, E, B_t, C o A, B_t, C.

3. Luvisoles dístricos y regosoles dístricos. Son suelos formados sobre sedimentos detríticos silíceos de origen miocénico. La vegetación que sustentan está constituida en su mayor parte por cultivos de cereal de secano, praderas, cultivos abandonados y matorral de cistáceas. Los materiales incoherentes de origen Mioceno de gran erosionabilidad inducen a que estos suelos sean los más degradados por la erosión física dentro de la cuenca. Son suelos de perfil A, B, C, en los que es frecuente que falte el horizonte superior por erosión, aflorando el horizonte textural. Son suelos ácidos (pH entre 6.5-4.5) y poco productivos.

4. Cambisoles dístricos y cambisoles oleicos. Son suelos de perfil A, B_w, C, de poca profundidad y desarrollo. En ocasiones pueden encontrarse horizontes A bastante profundos (más de 40 cm), lo que se debe a la presencia de una masa forestal arbórea. Son suelos de pH ácido (entre 6.5 y 5), el mull forestal es la forma más desarrollada de humus, pedregosos (pedregosidad global superior al 60%), horizontes superiores de textura franca-arenosa con transición a texturas francas bastante arcillosas en profundidad, contenido en materia orgánica próximo al 1.5% en horizontes superficiales de matorrales y superior al 3.5% en reforestaciones jóvenes de pinar.

5. Cambisoles éutricos y leptosoles réndzicos. Son suelos formados sobre calizas del cretácico. Su evolución se ve frenada por procesos erosivos y no por la abundancia de carbonato cálcico. Suelos con buena permeabilidad y estructura grumosa o granular bien desarrollada. Tienen gran actividad biológica de micro y macroorganismos, y su pH está próximo a la neutralidad (7-7.5). Los cambisoles éutricos presentan un perfil A, B_w, C, y los leptosoles réndzicos, perfil A, C. Son los suelos de mayor productividad forestal y sustentan las únicas masas arbóreas clímax de la cuenca, con especies como *Quercus faginea, Quercus ilex* y *Juniperus thurifera*.

Cuadro 5. Tiempo de formación de los distintos tipos de suelo de la cuenca del tramo medio del río Jarama.

Suelo	Tiempo de formación
Cambisoles éutricos y leptosoles réndzicos	*T*= 2,500 años
Antrosoles plágicos y hórticos	*T*=1,000 años
Planosuelos dístricos y luvisoles	*T*= 1,000 años
Luvisoles dístricos y regosoles dístricos	*T*= 2,500 años
Cambisoles dístricos y cambisoles gleicos	*T*= 2,500 años
Leptosoles dístricos y leptosoles éutricos	*T*= 5,000 años

6. Leptosoles dístricos y leptosoles éutricos. Se presentan ocupando prácticamente toda la margen derecha del río sobre pizarras y esquistos del Paleozoico. Sustentan una vegetación xerofítica formada por *Cistus sp*. Suelos con gran pedregosidad, con bajo contenido en humus en un horizonte (A) superficial y de escaso desarrollo (menos de 30 cm), bajo el que se manifiesta el horizonte C o roca madre. El pH es medianamente ácido o neutro (6-7), y su textura es limo-arenosa, con transición a limo-arcillosa.

Aplicación y resultados

Los análisis de suelo realizados (Tejera, 2001) indican una profundidad actual de suelo de 70-80 cm y si se considera un espesor máximo de suelo estable de 120 cm para rocas coherentes (Monturiol y Guerra, 1983), el tiempo de formación del suelo para los diferentes tipos de suelo de la cuenca del tramo medio del río Jarama se presenta en el cuadro 5.

Entrando con dichos valores de *T* en el cuadro 3, se obtiene la siguiente estimación de pérdida tolerable de suelo para cada uno de los tipos de la cuenca:

Leptosoles réndzicos	12.77 t/ha.año
Antrosoles plágicos	31.92 t/ha.año
Planosuelos dístricos y luvisoles	31.92 t/ha.año
Luvisoles dístricos y regosoles dístricos	12.77 t/ha.año
Cambisoles dístricos y cambisoles gléicos	12.77 t/ha.año
Leptosoles dístricos y leptosoles éutricos	6.38 t/ha.año

Conclusiones

• El modelo propuesto permite estimar la máxima pérdida tolerable por la erosión para cada tipo suelo, en función de su edafogénesis (tiempo de formación), de su profundidad máxima potencial y de la que realmente tiene. Los valores que aporta representan la capacidad máxima de regeneración del propio suelo y son el límite de las pérdidas por erosión que puede autocompensar.

Si la cantidad perdida no supera su capacidad de regeneración, el suelo mantiene su capacidad productiva.

• El conjunto de los valores de la máxima pérdida tolerable generados por el modelo permite una aplicación diferenciada a cada tipo específico de suelo y a su concreto estado de desarrollo o de conservación, según la relación entre su profundidad potencial y real. Se supera así el determinismo práctico (Wischmeier, 1978; Hudson, 1982) o los valores genéricos para todos los suelos, sólo establecidos en función de la profundidad de las raíces de la vegetación que soportan (López *et al*., 1994), que hasta ahora viene aplicándose en los estudios de planificación y ordenación de las cuencas hidrográficas.

• Para los suelos con una edafogénesis lenta ($T \geq 2{,}500$ años), los valores aportados por el modelo se mantienen en general por debajo de los que vienen aplicándose, y sólo se aproximan a ellos en los estados de mayor capacidad de regeneración, en los que se alcanzan las pérdidas tolerables más altas. En la aplicación a la cuenca madia del río Jarama se ha obtenido el valor 6.38 t/ha.año para los leptosoles dístricos y éutricos, cuya edafogénesis es más lenta ($T = 5{,}000$ años) y 12.77 t/ha.año para los leptosoles réndzicos, luvisoles dístricos, regosoles dístricos, cambisoles dístricos y cambisoles gléicos, cuya edafogénesis es más rápida ($T = 2{,}500$ años).

• Sin embargo, para los suelos con una edafogénesis rápida ($T \leq 1{,}000$ años), los valores obtenidos con el modelo son, en todos los casos, notablemente mayores que los que han venido aplicándose. Ello significa que, en principio, para esos suelos podrían admitirse pérdidas de suelo considerablemente mayores que las que hasta el presente vienen siendo admisibles, sin poner en riesgo su capacidad productiva. En la cuenca del tramo medio del río Jarama, la pérdida tolerable obtenida con el modelo para los antrosoles plágicos, planosuelos dístricos y luvisoles es de 31.92 t/ha.año.

• No obstante, en estos casos de suelos con edafogénesis rápida, los valores generados por el modelo deberían someterse a criterios más restrictivos, en relación con otros factores que deben tomarse en consideración, pero que no están integrados en el modelo. Entre esos factores no considerados podrían citarse el transporte y depósito de los materiales erosionados, la protección de espacios naturales valiosos, o la conservación de los aprovechamientos e infraestructuras hidráulicas existentes aguas abajo en la cuenca.

Agradecimientos

Al profesor Dr. J.M. Gandullo Gutiérrez por su valiosa aportación para la elaboración de este artículo, expresada en su nota: "La pérdida admisible por erosión: ideas sobre un nuevo planteamiento".

Recibido: 03/08/2005
Aprobado: 13/03/2006

Referencias

BIRKELAND, P. *Pedology weathering and geomorfological Research*. Londres: Oxford University Press. 1984, 285 pp.

BORNAND, M. *Alteration des materiaux fluvio-glaciares: genese et évolution des sols des terrases quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône*. Tesis doctoral. Montpellier: Universidad de Montpellier. 1978.

DUCHAUFOUR, P. y SOUCHIER, B. *Manual de edafología*. Barcelona: Masson. 1987, 461 pp.

FAO, UNESCO. *World reference base for soil resources.* World Soil Resources Reports no. 84. Roma: Publicaciones FAO. 1998, 88 pp.

FAO, PNUMA, UNESCO. *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos.* Roma: Publicaciones FAO, 1981.

HUDSON, N. *Conservación del suelo.* Barcelona: Editorial Reverté. 1982, 335 pp.

LÓPEZ, F. y BLANCO, M. *Hidrología forestal I*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 1976, 387 pp.

LÓPEZ, *et al*. *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión.* Madrid: Coedición Tragsa, Tragsatec y Ediciones Mundi Prensa. 1994, 902 pp.

MELLEROWICA, K. Soil Conservation Planning at the watershed Level Using the Universal Soil. *Journal of Soil and water Conservation*. Vol. 49, núm 2, 1994, pp. 194-200.

MONTURIOL, F. y GUERRA, A. XIII Reunión Nacional de Suelos. Santander. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 1983.

PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid: Mundi Prensa. 1994, 807 pp.

SONDHEIM, M.W. *et al.* Numerical analysis of a chronosequence including the development of a chronofunction. *Soil Sci. AMER*. Vol. 45, núm. 3, 1981, pp. 558-563.

SPAARGAREN, O.C. *Weathering and soil formation in a limestone area near Pastena (Italy).* Tesis doctoral. Amsterdam: Universidad de Amsterdam. 1979.

TEJERA, R. *et al. La ingeniería en los procesos de desertificación*. Madrid: Coedición Grupo Tragsa y Mundi Prensa. 2002, 1045 pp.

TEJERA, R. *Metodología para la ordenación de cuencas hidrográficas con criterios de sostenibilidad*. Tesis doctoral inédita. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2001, 180 pp.

TORRENT, J., SCHWERTMANN, U. y SCHULZE, D.G. Iron oxides mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*. Vol. 23, núm. 3. 1980, pp. 191-208.

WILKE, B.M. Pflanzenern. Bodenkunde, 1975, 2 pp.

WISCHMEIER, W.H. y SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountain. Guide for selection of practices for soil and water conservation.* Washington, D.C.: USDA A.R.S. 1965, 47 pp.

WISCHMEIER, W.H. y SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning.* Agriculture Handbook 537. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1978, 58 pp.

Abstract

TEJERA-GIMENO, R., GARCÍA-ROBREDO, F. & GARCÍA-DÍAZ, R. Tolerable soil loss model: application to watershed management. Hydraulic engineering in Mexico *(in Spanish). Vol. XXI, no. 4, October-December, 2006, pp. 33-41.*

A model to estimate tolerable soil loss is presented as a fundamental criterion on watershed management. The model is based upon the axiom that the maximum tolerable soil loss is lower than the soil quantity made up of the ecological system, which is described by its mathematical function. Taking this function as a starting point, maximum tolerable soil loss values have been tabulated, according to soil depth, for spanish climax soils. Through the application of this methodology, it has been obtained the tolerable soil loss of the ones located in the medium section of the Jarama River basin.

Keywords: *tolerable soil loss, erosion, watershed management.*

Dirección institucional de los autores:

Rosario Tejera-Gimeno

Dr. Ingeniero de Montes.
Profesora Asociada.
Departamento de Economía y Gestión Forestal,
Universidad Politécnica de Madrid,
E.T.S. de Ingenieros de Montes,
Ciudad Universitaria s/n,
28040 Madrid, España,
rosario.tejera@upm.es

Fernando García-Robredo

Dr. Ingeniero de Montes.
Profesor Titular de Universidad.
Departamento de Economía y Gestión Forestal,
Universidad Politécnica de Madrid,
E.T.S. de Ingenieros de Montes,
Ciudad Universitaria s/n,
28040 Madrid. España,
fernando.garcia.robredo@upm.es

Ricardo García-Díaz

Dr. Ingeniero de Montes.
Departamento de Ingeniería Forestal (Hidráulica e Hidrología),
Universidad Politécnica de Madrid,
E.T.S. de Ingenieros de Montes,
Ciudad Universitaria s/n,
28040 Madrid. España,
ricardo.garcia@upm.es