



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,
A.C.
México

Flores López, Hugo Ernesto; Martínez Menes, Mario; Oropeza Mota, J. Luis; Mejía Saens, Enrique;
Carrillo González, Rogelio

INTEGRACIÓN DE LA EUPS A UN SIG PARA ESTIMAR LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO EN
UNA CUENCA HIDROGRÁFICA DE TEPATITLÁN, JALISCO, MÉXICO

Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 2, abril-junio, 2003, pp. 233-244

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57315595010>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

INTEGRACIÓN DE LA EUPS A UN SIG PARA ESTIMAR LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA DE TEPATITLÁN, JALISCO, MÉXICO

Integration of the USLE to a GIS to Estimate the Soil Erosion by Water in a Watershed of Tepatitlán, Jalisco, Mexico

Hugo Ernesto Flores López^{1‡}, Mario Martínez Menes¹, J. Luis Oropeza Mota¹, Enrique Mejía Saens¹ y Rogelio Carrillo González¹

RESUMEN

La pérdida de suelo por erosión hídrica es uno de los problemas que puede afectar fuertemente la actividad agropecuaria a mediano y largo plazo, ya que las estimaciones más conservadoras proponen que 45% de los suelos tienen algún grado de erosión. La observación continua para identificar las áreas críticas a escala de cuenca, puede ayudar a la toma de decisiones en el control de este proceso, por lo que en este trabajo se evaluó una aproximación metodológica para ello. Se estimó la erosión hídrica actual, potencial y tolerante en la cuenca El Jihuete en Tepatitlán, Jalisco, México, por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) integrada a un sistema de información geográfica (SIG). La modelación de la pérdida de suelo con SIG requiere que los factores de EUPS sean funciones matemáticas o que puedan expresarse con valores en una imagen 'raster'. Es necesario incorporar algoritmos que permitan calcular el factor L de acuerdo con su concepción original para su aplicación en SIG, y el uso de modelos de elevación digital con alta resolución para disminuir el efecto de pendientes cóncavas. La percepción remota aplicada a la identificación de la distribución espacial de la vegetación permitirá determinar con mayor detalle el factor C. En general, se encontró baja disponibilidad de información local confiable para la aplicación de EUPS a escala de cuenca con SIG.

Palabras clave: Manejo de cuencas, EUPS, SIG, erosividad, erodabilidad.

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. [‡](floresh@colpos.colpos.mx)

Recibido: Octubre de 2001. Aceptado: Septiembre de 2002.
Publicado en Terra 21: 233-244.

SUMMARY

Water erosion is a concern, because soil losses can affect farming and livestock in the medium and long term. The most conservative assessments estimate that 45% of Mexican soils are eroded to some degree. Continuous monitoring to identify critical areas on the scale of an entire watershed could help decision-making in the control of soil erosion. This study evaluates a method for monitoring soil erosion. Current, potential, and tolerable erosion were estimated in the watershed El Jihuete, Tepatitlán, state of Jalisco, Mexico, using the universal soil loss equation (USLE) integrated to the geographical information system (GIS). Modeling soil losses with GIS requires USLE factors expressed as mathematical functions or values in a raster image. It is necessary to incorporate algorithms that allow calculating the L factor according to the original conception for its application in GIS, and the use of digital elevation models with high resolution would decrease the effect of concave gradients. The remote perception to identify spatial distribution of vegetation will allow determination the C factor with greater detail. In general, we found little reliable local information available to apply USLE to GIS.

Index words: Watershed management, USLE, GIS, erosivity.

INTRODUCCIÓN

En México, la pérdida de la capa arable de los suelos es uno de los principales problemas. La causa principal se debe al común denominador del mal manejo del suelo por el hombre, causando la erosión hídrica, con el consecuente empobrecimiento del suelo y la pérdida de su productividad. Por estas razones, la

erosión incrementa los costos de producción agrícola, por disminuir los beneficios al agricultor o por elevar los precios de los alimentos a los consumidores. El efecto ocurre en forma directa al causar bajos rendimientos de cultivos o forrajes, incremento en el requerimiento de fertilización, dificultad en la labranza y aumento de los gastos por mantenimiento de las unidades de producción (USDA-SCS, 1990).

El problema de la erosión del suelo en México es de gran magnitud, el cual se ha observado desde 45 hasta 98% de la superficie, la variación en la cantidad estimada es debida al enfoque de evaluación (Figueroa *et al.*, 1991). En Jalisco, Flores *et al.* (1996) observaron a partir de un muestreo sistemático de suelos en la cuenca hidrográfica El Jihuete, que 99.4% del área tiene algún grado de erosión.

La erosión del suelo es un fenómeno complejo gobernado por factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía del terreno, el uso del suelo y las medidas de conservación (Singh *et al.*, 1992). Para su evaluación, se han generado diversos métodos (SARH-CP, 1982), pero sin duda alguna, la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) ha sido el método más utilizado para diseñar planes de manejo acorde a las condiciones propias de cada lugar. Figueroa *et al.* (1991) adaptaron la EUPS a las condiciones de México, utilizando información accesible que ha permitido su aplicación a los paisajes del país. Además, diversos autores han hecho esfuerzos para obtener la información requerida en los parámetros de EUPS (Ríos y Martínez, 1990; Osuna y Esquivel, 1996), con el fin de apoyar el diseño de estrategias de manejo para el control de la erosión del suelo a escala de predio. En la actualidad, la simplicidad de EUPS ha permitido su integración a herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG), con resultados satisfactorios para la elaboración de planes de manejo y conservación de suelo (FAO, 1993; Bhan *et al.*, 2000; Eiumnoh, 2000; Mati *et al.*, 2000). Sin embargo, este enfoque requiere que los factores de EUPS se expresen de manera matemática o en mapa 'raster' para poder hacer modelos en un SIG, como el factor K que en el presente caso utiliza la distribución espacial del tipo de textura del suelo y considerando cada píxel como un predio agrícola con dimensiones indicadas por la distancia entre píxeles. El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento para integrar los factores de la EUPS a un SIG para estimar mediante modelos las pérdidas potenciales, actuales y toleradas del suelo, dentro de la cuenca El Jihuete, en Jalisco, México.

REVISIÓN DE LITERATURA

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

La ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) se diseñó para calcular la erosión laminar y en surcos de terrenos (Wischmeier, 1976); consiste en un modelo matemático multifactorial que integra seis procesos que intervienen en la erosión hídrica, como los que indica la expresión:

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

Donde: A es el promedio anual de pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$), R es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ\ mm\ (ha\ h)^{-1}$), K es el factor de erosionabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ (MJ\ mm\ ha)^{-1}$), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor del grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo del cultivo (adimensional), P es el factor de prácticas mecánicas para el control de la erosión (adimensional).

Descripción de los Factores de la EUPS

Factor R. El factor de erosividad de la lluvia R es la suma de valores de erosividad de tormentas individuales, expresado como:

$$R = \sum_{i=1}^n (EI_{30})_i$$

Donde: E es la energía cinética de la lluvia en $kg\ m\ (m^2\ mm)^{-1}$, I30 es la intensidad de la lluvia en 30 min en $mm\ h^{-1}$ y n es el número de tormentas en el año (Figueroa *et al.*, 1991).

Uno de los problemas en muchos países, entre ellos México, es la falta de instrumentación que mida la intensidad de la lluvia y, en consecuencia, la carencia de datos, por lo que se han desarrollado diversos modelos que estimen el índice de erosividad R con elementos del clima como la lluvia anual (Ulsaker y Onstad, 1984), la lluvia máxima diaria en un periodo de retorno de dos años, el promedio anual de la lluvia del mes más lluvioso de cada año y factores de zonificación (TRAGSA, 1994), el uso del modelo logístico que involucra el tiempo y los parámetros empíricos que describen las características: variación anual de la erosión, duración del periodo de tiempo de mayor erosión del año e intensidad de la erosión en ese lapso de tiempo (Hu *et al.*, 2000).

Factor K. El factor de erodabilidad del suelo (K), indica la susceptibilidad de los suelos a erosionarse. Para un suelo particular, K se define como la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad cuando es medido en una parcela estándar. La parcela estándar es la parcela de 22.1 m de longitud, con una pendiente uniforme de 9%, de labranza continua y a lo largo de la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978).

Los resultados de estudios conducidos con simuladores de lluvia se utilizaron para producir un nomograma de erodabilidad de suelo basado en textura y estructura del suelo (Brooks *et al.*, 1993). Cuando no se disponga de información para hacer uso del nomograma, Figueroa *et al.* (1991) sugirieron al método propuesto por FAO (1980) para determinar el valor de K, el cual sólo requiere conocer la unidad de suelo y su textura. Otra opción es aplicar la función utilizada en el modelo EPIC, la cual demanda los porcentajes de carbón orgánico, de arena, limo y arcilla, de la capa superficial del suelo (Williams *et al.*, 1990).

Factor LS. Este factor representa el efecto de la topografía sobre la erosión del suelo. La erosión aumenta conforme se incrementa la longitud del terreno (L) en el sentido de la pendiente y la inclinación de la superficie (S) se hace mayor (Figueroa *et al.*, 1991). Los dos efectos se evalúan en campo por separado y son considerados en la EUPS también en forma separada como L y S, aunque se recomienda considerarla como un solo factor LS. El factor L es definido como la distancia del punto de origen del flujo superficial al punto donde la pendiente decrece hasta que ocurre sedimentación o el escurrimiento entra a una red de drenaje o a un canal construido. El factor S indica el grado de inclinación de la pendiente. La pérdida de suelo se aumenta más rápidamente con la inclinación de la pendiente que con la longitud (Wischmeier y Smith, 1978).

Cuando se utilizan los SIG's para evaluar la erosión de los suelos a escala de cuenca, se ha tenido dificultades para obtener el valor del factor topográfico LS, en particular al atender la definición del factor L, por lo que han hecho esfuerzos para calcularlo con algoritmos de programación y el uso de modelos de elevación digital (MED) (Hickey, 2000; Van Remortel *et al.*, 2001), aunque en la mayoría de los casos se ha optado por la aplicación directa de las funciones antes mencionadas para el cálculo de LS en MED manejado en un SIG (Mati *et al.*, 2000).

Factor C. El factor C de manejo de cultivo y cobertura del suelo, es la relación de pérdidas de un terreno cultivado en condiciones específicas, con respecto a las

pérdidas de un suelo desnudo y con barbecho continuo en las mismas condiciones de suelo, pendiente y lluvia (Wischmeier y Smith, 1978). Figueroa *et al.* (1991) presentaron un procedimiento para el cálculo del factor C a partir de la integración de factores que afectan la erosión como las etapas de crecimiento vegetal, los efectos de cultivos y manejo, las pérdidas relativas de suelo y el índice de erosividad de la lluvia.

Brooks *et al.* (1993) mencionaron que en los lugares donde no se dispone de guías para el establecimiento de valores de C en cultivos de campo, es más fácil correlacionar las tasas de pérdida de suelo con las cantidades de materia orgánica seca por unidad de área y el porcentaje de cobertura de suelo. También existe en la literatura una amplia variedad de valores del factor C que pueden seleccionarse de acuerdo con las condiciones particulares del sitio (Wischmeier y Smith, 1978; Mitchell y Bubenzer, 1980; Figueroa *et al.*, 1991; TRAGSA, 1994; Morgan, 1997).

Factor P. Este factor indica la proporción del suelo perdido en las prácticas mecánicas de manejo del suelo específicas con relación a las pérdidas de suelo en cultivos a lo largo de la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978). Las prácticas más importantes para reducir el escurrimiento de agua y, por consecuencia, la erosión del suelo son: el surcado en contorno, el cultivo en fajas en contorno y las terrazas. Figueroa *et al.* (1991) presentaron cuadros con el valor de P para cada una de estas prácticas de acuerdo con su combinación con las condiciones de pendiente, longitud máxima del surcado, rotación de cultivo, sistema de labranza, número de fajas, ancho de fajas y su longitud máxima, intervalo horizontal de las terrazas. Este tipo de valores son utilizados en el modelo EPIC para el cálculo de erosión del suelo (Williams *et al.*, 1990).

Erosión potencial. La erosión hídrica potencial se estima de EUPS, al utilizar únicamente los factores RKLS (Wischmeier y Smith, 1978), expresada como $A = RKLS$. La razón es que los factores CP de la EUPS representan las actividades atenuantes del proceso erosivo y en la medida que se diseñen prácticas agronómicas y mecánicas, la erosión potencial podrá reducirse a valores tolerables.

Erosión tolerable. La erosión tolerable se refiere a la proporción máxima de pérdida de suelo que pueda ocurrir y aún permita que la productividad del cultivo sea económicamente sostenida (Renard *et al.*, 1996). Estos autores indicaron que este concepto considera la pérdida de productividad causada por la erosión, pero también incluye la tasa de formación del suelo del material parental, la formación de suelo en la parte

superficial, la pérdida de nutrientes y el costo de reemplazarlos, la tasa a la que la erosión por cárcavas podría esperarse comience y las prácticas para el control de la erosión que los agricultores podrían implementar. La evaluación de tolerancias de pérdida de suelo en un terreno es un aspecto básico para determinar el uso y manejo más adecuado de éste. Wischmeier y Smith (1978) mencionaron que la tolerancia para la pérdida de suelo para los Estados Unidos varía de 2.50 a 12.36 t (ha año⁻¹), aunque suelos profundos que favorecen el desarrollo radical de los cultivos podrían exceder 12.36 t de tolerancia en la pérdida de suelo. Con este criterio se han propuesto valores de tolerancia a la pérdida de suelo, como el enfoque indicado por Heimlich y Bills (1984), quienes, al despejar el factor CP de EUPS, buscaron encontrar la erosión potencial en sistemas de producción intensivos donde sin prácticas de manejo y conservación del suelo no se rebasará la erosión tolerable de 12.36 t (ha año⁻¹), así como en sistemas de cultivo intensivos que sí lo requirieran; los valores de CP asignados fueron 0.7 y 0.1, respectivamente, rango observado en un alto porcentaje de los terrenos agrícolas de la faja maicera de los Estados Unidos. El resultado fue una clasificación de la erosión del suelo indicada en el Cuadro 1.

Sistemas de Información Geográfica e Integración de la EUPS

Un sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta poderosa para coleccionar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real a propósitos particulares (Burrough y McDonnell, 1998), con la finalidad de

contribuir con información para la toma de decisiones y considerarse como una fuente para los sistemas expertos (Bocco *et al.*, 1991). La integración de EUPS a un SIG ha empezado a tomar importancia, pues esta interrelación permite cuantificar la pérdida de suelo de manera rápida a escala de cuenca, con un mínimo de trabajo de campo y con la complejidad de las escalas grandes (FAO, 1996; Mati *et al.*, 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La cuenca EL Jihuite se localiza en el municipio de Tepatitlán, al noreste del estado de Jalisco, entre los paralelos 20° 50' 57" y 20° 55' 50" N, los meridianos 102° 36' 50" a 102° 43' O y una altitud de 1900 a 2280 m (Figura 1).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), el clima se define como (A)C(w₁)(w)(e)g, templado subhúmedo con temperatura media del mes más caliente superior a 22 °C y temperatura media anual menor que 18 °C, con menos de 5% de lluvia invernal con relación al promedio anual.

La precipitación promedio anual es de 822.1 mm con 88 días de lluvia apreciable; la estación de crecimiento con 70% de probabilidad de excedencia de lluvia es de 135 días del 16 de junio al 28 de octubre. El promedio anual de temperaturas máxima, mínima y media es de 25.6, 7.6 y 16.6 °C, respectivamente; para la estación de crecimiento, la media de temperaturas máxima, mínima y media es de 25.1, 10.5 y 17.8 °C, respectivamente (Flores *et al.*, 1996).

Cuadro 1. Clases de pérdidas de suelo de acuerdo con dos enfoques de clasificación (Heimlich y Bills, 1984).

Clases de erosión	Enfoque de clasificación		Significado
	Erosión potencial	Erosión actual	
	----- t(ha·año) ⁻¹ -----		
No erosivo	< 17.30	Erosión debajo de todos los niveles con factores CP.	
Moderadamente erosivo:			
Manejo debajo de la tolerancia	> 17.30	< 12.36	Erosión debajo de la tolerancia para bajo CP [†]
Manejo arriba de la tolerancia.	17.30 < RKLS < 123.55	> 12.36	Erosión arriba de la tolerancia para bajo CP
Altamente erosivo	> 123.55	> 12.36	Erosión arriba de la tolerancia para todos los niveles de CP

[†] Factores de cobertura del suelo (C) y prácticas de manejo (P) de EUPS (Ecuación universal de pérdida de suelo).

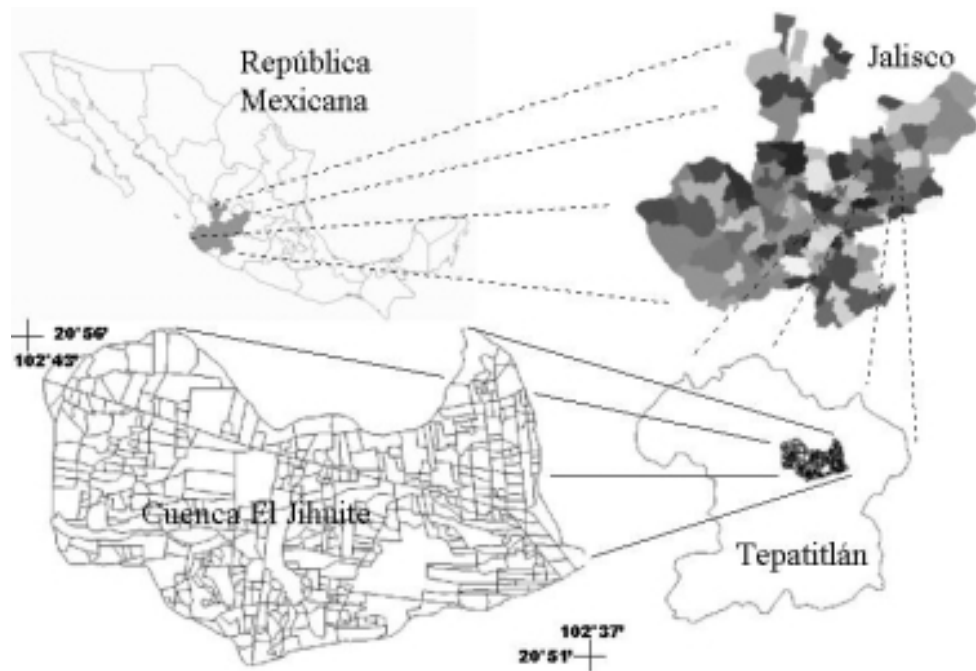


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca hidrográfica El Jihuite.

La topografía de la cuenca es lomerío con pendientes de 1 a 58%. De acuerdo con la cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el suelo en gran parte de la cuenca es Luvisol férrico, de textura arcillosa o migajón arcilloso, con profundidad de hasta 1 m. Otro tipo de suelo que se presenta en la parte norte es el Planosol eútrico, de textura arcillosa con profundidad de 40 cm o menos.

Según los estudios realizados por la Comisión Técnica Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana (COTECOCA), la vegetación en la superficie de la cuenca corresponde a los tipos: Bosque Esclerófilo Caducifolio y Selva Baja Caducifolia. El uso del suelo indica que cerca de 30% de la superficie está dedicada a cultivos anuales, 10% es de praderas de temporal, 55% es de agostadero con especies nativas y 5% se utiliza con caminos, construcciones y otros usos. La totalidad de los predios que conforman la superficie de la cuenca El Jihuite están bajo el régimen de pequeña propiedad, con tamaño promedio estimado de 20 hectáreas.

Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Los factores que componen la EUPS se estimaron como sigue: El factor de erosividad de la lluvia R se evaluó utilizando la ecuación que presentaron Figueroa *et al.* (1991), que corresponde a la región VII de la república mexicana, en la cual se localiza la cuenca El Jihuite. El modelo aplicado fue:

$$Y = -0.0334X + 0.006661X^2, \text{ con } R^2 = 0.98$$

Donde: Y es el valor de EI_{30} anual en $MJ \cdot mm (ha \cdot hr)^{-1}$ y X es la lluvia anual en mm.

El factor de erosionabilidad del suelo (K) se estimó utilizando la función indicada por Williams *et al.* (1990):

$$K = \left[\frac{-0.0256 \cdot SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right)}{0.2 + 0.3 \cdot e} \right] \cdot \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \cdot \left(1 - \frac{0.25 \cdot C}{C + e} \right) \cdot \left(1 - \frac{0.7 \cdot SN1}{SN1 + e} \right)$$

Donde: SAN es el porcentaje de arena, SIL es el porcentaje de limo, CLA es el porcentaje de arcilla, C es el porcentaje de carbón orgánico, SN1 se calcula a partir del porcentaje de arena con la relación siguiente:

$$SN1 = 1 - \frac{SAN}{100}$$

Para calcular el factor de longitud de la pendiente (L) se utilizó la función:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

Donde: λ es la longitud de la pendiente en m, m es un exponente con la modificación hecha por Foster *et al.* (1977):

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \text{ y } \beta = \left[\frac{\left(\frac{\text{sen} \theta}{0.0896} \right)}{3.0(\text{sen} \theta)^{0.8} + 0.56} \right]$$

Donde: θ es el ángulo de la pendiente. El valor de λ se obtuvo utilizando el modelo de elevación digital (MED) de INEGI (1999); con una distancia entre píxeles de 90 m. La longitud de la pendiente se calculó con la relación siguiente:

$$\lambda = \frac{90}{\cos \theta}$$

El factor inclinación de la pendiente (S), se calculó con las ecuaciones siguientes:

$$S = 10.8 \text{ sen } \theta + 0.03, \text{ si } s < 9\% \text{ y}$$

$$S = 16.8 \text{ sen } \theta - 0.50 \text{ si } s \geq 9\%.$$

El factor de cobertura y manejo del cultivo (C) se determinó para terrenos con uso agrícola y pecuario; en el uso agrícola, el maíz y agave son los cultivos principales en la cuenca; las áreas de uso pecuario incluye los terrenos con agostadero principalmente (Alemán *et al.*, 1996). Mediante fotografía aérea escala 1:75 000 (vuelo de INEGI de 1993) se delimitaron estos usos y con imagen de satélite LANDSAT ETM+ se determinó la cobertura del suelo. Estas condiciones de cobertura del suelo y algunas características de los cultivos se utilizaron

para determinar el factor C de acuerdo con la metodología propuesta por Figueroa *et al.* (1991).

Flores *et al.* (2000) indicaron que el maíz es de producción continua, donde la preparación de la cama de siembra se realiza con arado de discos y un rastreo posterior; la cosecha se hace en el mes de diciembre, por lo que el valor del factor C para este cultivo que resultó fue de 0.596. En el cultivo de agave no se encontraron valores del factor C, por lo que se consideró como parte del área de agostadero con 33 a 66% de cobertura. Para los terrenos con agostadero, Alemán *et al.* (1996) indicaron características como el sobrepastoreo, excesiva carga animal sin rotación de potreros, consumo total de forraje, poca superficie de pasto mejorado y presencia de arbustos y árboles. Con esta base, los valores de C seleccionados para suelos con agostadero fueron 0.17, 0.06, 0.013 y 0.003, que corresponden a coberturas de 0 a 33%, 33 a 66%, 66 a menos de 100% y 100% de la imagen "LANDSAT", respectivamente.

El factor prácticas mecánicas (P) para el control de la erosión en terrenos agrícolas de la cuenca se presenta en el Cuadro 2, como una relación entre el porcentaje de la pendiente, los valores P y la longitud máxima de los surcos trazados en contorno. En terrenos de uso ganadero, el valor de P se consideró igual a 1, pues en estos terrenos no se desarrollan prácticas mecánicas.

Datos Utilizados

La información de lluvia anual para el cálculo del factor R procedió de los registros de la estación agrometeorológica del Campo Experimental Altos de Jalisco de INIFAP, ubicada dentro de la cuenca, en el periodo de 1983 a 2000.

Las fracciones de textura y la materia orgánica (MO) del suelo utilizadas se obtuvieron de un muestreo

Cuadro 2. Valores del factor P de acuerdo con el porcentaje de la pendiente y límites de longitud máxima de los surcos en contorno (Williams *et al.*, 1990).

Pendiente del terreno	Valores de P	Longitud máxima
%		pies
1 a 2	0.60	400
3 a 5	0.50	300
6 a 8	0.50	200
9 a 12	0.60	120
13 a 16	0.70	80
17 a 20	0.80	60
21 a 25	0.90	50

sistemático de suelos dentro de la cuenca en una malla con puntos equidistantes cada 500 m y se localizaron geográficamente con un sistema de posicionamiento global (GPS por siglas en inglés); la muestra se tomó a una profundidad de 30 cm. A partir de este muestreo se generaron mapas tipo ‘raster’ con resolución de píxeles cada 90 m, en programas de interpolación en TURBO C. El porcentaje de carbón orgánico (C) se obtuvo a partir de la disponibilidad espacial de MO en el área en estudio y las fórmulas para el cálculo del porcentaje de MO y C, indicadas por León y Aguilar (1987), de las que se obtuvo la expresión:

$$C = \frac{MO}{1.72}$$

(Porta *et al.*, 1999). La información espacial de MO, arena, limo y arcilla en la cuenca El Jihuete, se obtuvo de la base de datos de la cuenca generados por Flores *et al.* (1996).

Sistema de Información Geográfica

Los mapas ‘raster’ obtenidos se manejaron con el sistema de información geográfica IDRISI 32 y la presentación final se preparó con ARCVIEW3.2 y COREL DRAW 8.0. Para la determinación de la cobertura del suelo se utilizaron imágenes LANDSAT ETM+ del 4 de abril de 2000.

Tolerancia a la Pérdida de Suelo

En la evaluación de la erosión tolerable, se utilizó la profundidad de los sistemas radicales y tipo de sustrato de suelo que se señalan en el Cuadro 3. En el presente trabajo se consideró un sustrato de suelo tipo **a**, de acuerdo con las características de profundidad, pedregosidad, pendiente, pH y contenido de MO del suelo, obtenidas en el muestreo sistemático que realizaron Flores *et al.* (1996).

Para evaluar el riesgo por erosión de los suelos, se utilizaron los valores indicados en el Cuadro 1 propuestos por Heimlich y Bills (1984). Estos reflejan el efecto de los factores cobertura del suelo (C) y prácticas de manejo (P) de EUPS, con valores de CP en el rango de 0.1 a 0.7, que cubren casi todas las condiciones encontradas en el área de estudio y de muchas zonas de México.

Cuadro 3. Guía de valores de tolerancia de pérdidas de suelo para distintas profundidades de raíces y sustratos (TRAGSA, 1994).

Profundidad de raíces	Valores de tolerancia de pérdida de suelo según sustrato	
	a	b
cm	- - - - t (ha/año) ⁻¹ - - - -	
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 = suelo con sustrato favorable que puede ser renovado por labores, fertilizantes, adición de materia orgánica y otras prácticas de cultivo.

b = suelos con sustrato desfavorable como el caso de rocas descompuestas en las que no resulta económica su renovación artificial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)

Los factores K, LS, C y P, que integran la EUPS y que se obtuvieron para la cuenca El Jihuete, se presentan en las Figuras 2, 3, 4 y 5.

La importancia de estos datos radica en que la calidad de los resultados es función directa de ellos. Wischmeier (1976) mencionó que la fuente potencial más grande de error en la predicción de EUPS es la superficialidad en la selección de los valores de los factores que la componen, por lo que sugiere precisar las condiciones a ser evaluadas y que estén de acuerdo con las características de la cuenca, ya que de no precisarlos, los errores se acentúan más al aplicarlos en un SIG, como se indica en el análisis de cada uno de los factores de EUPS.



Figura 2. Distribución espacial del factor K de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuete.



Figura 3. Distribución espacial del factor LS de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuete.

Con respecto al factor R, el valor de $4475 \text{ (MJ}\cdot\text{mm)}\cdot\text{(ha}\cdot\text{h)}^{-1}$ que resultó, guarda concordancia con las mostradas en el mapa de isoerosividad (líneas de igual erosividad) indicado por Figueroa *et al.* (1991). En este factor se tiene la seguridad que los datos de lluvia utilizados corresponden a una estación meteorológica localizada dentro de la cuenca, condición de importancia para lograr resultados coherentes con la realidad (Wanielista *et al.*, 1997). Sin embargo, no deja de ser una estimación del factor R, por lo que es necesario obtenerlo con el uso de pluviogramas (Wischmeier y Smith, 1978) o algún factor dependiente de la intensidad de lluvia, como datos horarios de lluvia (Colotti, 1998), lluvia acumulada en 5 min (Chow *et al.*, 1994) y el uso de una red pluviométrica para incluir el efecto topográfico (Wanielista *et al.*, 1997), que mejoraría la distribución en tiempo y espacio de R.

El valor de factor K en la cuenca varió de 0.025 a $0.035 \text{ t ha h (ha MJ mm)}^{-1}$, con una marcada susceptibilidad de los suelos de la parte norte de la cuenca, lugar donde se localizan las unidades de suelo



Figura 4. Distribución espacial del factor C de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuete.



Figura 5. Distribución espacial del factor P de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuete.

Planosol eútrico. Figueroa *et al.* (1991) mencionaron que los Planosoles de textura fina tienen el valor de K del orden de 0.026, mientras que en los Luvisoles férricos de textura media y fina es de 0.020 y 0.007, respectivamente. Los valores anteriores guardan una estrecha relación con los presentados en la Figura 3; no obstante, se requiere evaluar K con enfoques donde interactúen otros factores como la erosividad de la lluvia, el factor topográfico o la humedad del suelo, como el usado en el modelo RUSLE (Römkens *et al.*, 1996).

En la Figura 4, se muestra la distribución espacial del factor LS. Esta figura indica que en la mayor parte de la cuenca el factor LS es menor que la unidad, excepto en las laderas de los cerros donde es mayor. Aún con lo pequeño de estos valores, es probable que se tenga alguna sobreestimación de este factor debido a que el componente longitud de la pendiente (L) se consideró uniforme a lo largo de cada píxel. De acuerdo con el concepto de L, debería identificarse el punto en que la pendiente decrece hasta que ocurre sedimentación o el escurrimiento entra a una red de drenaje, condición requerida para que la EUPS pueda mejorar la precisión del factor LS en el SIG (Dunn y Hickey, 1998; Hickey, 2000). Estos autores mencionaron también la importancia que tiene la distancia entre píxeles del modelo de elevación digital, recomendándose resoluciones altas, es decir, distancia entre píxeles cortas, en particular cuando se tiene pendientes cóncavas, pues las depresiones inducen grandes errores, además del error generado por el cambio de escala y el ajuste del área mínima cartografiable.

Los valores de los factores C y P, que se presentan en las Figuras 4 y 5, hacen referencia a condiciones puntuales de cobertura y manejo del suelo, así como a las prácticas de soporte, situación que se considera una

fuelle de error potencial para el cálculo de la pérdida de suelo (Wischmeier, 1976). En el presente trabajo, no obstante que el porcentaje de cobertura del suelo (factor C) se obtuvo con el uso de imagen de satélite, se requiere un trabajo más detallado con esta herramienta para identificar con mayor precisión la distribución espacial de la cobertura y manejo del suelo, condición indispensable que se ha observado mejora la predicción de la erosión hídrica (Eiumnoh, 2000; Mati *et al.*, 2000), pues la agregación de píxeles en imágenes de satélite y modelos de elevación digital hacen que se pierda información respecto a la cantidad del objeto que representan; buscando además, mantener la misma resolución de las diferentes capas de información que se procesan en el SIG para disminuir el error de la imagen resultante (Zhang *et al.*, 2000).

Erosión Potencial

La erosión potencial del suelo constituida por los factores RKLS, se encuentra distribuida como se muestra en la Figura 6; el Cuadro 4 presenta el grado y la superficie con erosión.

La mayor superficie de la cuenca tiene una susceptibilidad moderada a la erosión (77.2%), 13.1% tiene alto potencial erosivo y sólo 9.6% de la superficie es menor que la erosión tolerable. Es notorio el efecto que tiene el factor LS mostrado en la Figura 3, con las áreas de alto potencial de erosión, por la semejanza que guardan las áreas de mayor LS. La erosión potencial es de suma importancia para encontrar los factores C y P, que pueden reducir la erosión a niveles tolerables (Wischmeier, 1976). También es un indicador de las áreas donde los factores RKLS promueven con mayor intensidad la pérdida de suelo.



Figura 6. Distribución espacial de la erosión potencial (RKLS) de la cuenca El Jihuete.

Cuadro 4. Pérdida de suelo, superficie con erosión hídrica potencial (RKLS) y grado de erosión en la cuenca El Jihuete.

Pérdida de suelo	Superficie	Grado de erosión hídrica
t (ha año) ⁻¹	ha (%)	
< 17.3	564 (9.63%)	No erosiva
17.3 – 123.5	4520 (77.23%)	Moderado potencial erosivo
> 123.5	769 (13.14%)	Alto potencial erosivo

Erosión Actual del Suelo

La distribución espacial de la erosión actual del suelo (RKLSCP) se muestra en la Figura 7 y la pérdida de suelo, superficie afectada y grado de erosión se muestran en el Cuadro 5.

En los terrenos donde la erosión actual calculada con EUPS no supera la erosión tolerable, se considera sin deterioro de este recurso. Para el presente caso, sólo 40.4% de la superficie tiene una condición libre de erosión, 42% del área tiene erosión moderada y más de 17.5% tiene alta erosión. Este tipo de resultados dan la oportunidad a quienes desarrollan planes para el manejo de recursos naturales, de proyectar los cambios e inclusive modelarlos y evaluar su impacto antes de implementarlos, como en el manejo y desarrollo agrícola sostenible (Bhan *et al.*, 2000), y la evaluación del riesgo de erosión para el manejo de cuencas (Singh *et al.*, 1992; Eiumnoh, 2000; Mati *et al.*, 2000). Para identificar la cobertura y práctica de manejo de suelo a implementarse con el objeto de disminuir la erosión actual a valores tolerables, Wischmeier y Smith (1978) sugirieron obtener el valor del factor C y/o P, considerando la proporción entre la erosión tolerable



Figura 7. Distribución espacial de la erosión actual (RKLSCP) en la cuenca El Jihuete.

Cuadro 5. Pérdida de suelo, superficie con erosión hídrica ACTUAL (RKLSCP) y grado de erosión en la cuenca El Jihuíte.

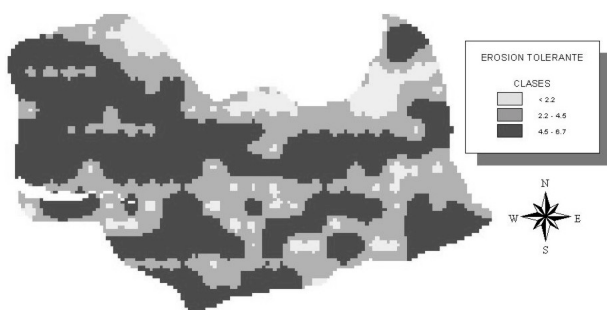
Pérdida de suelo	Superficie	Grado de erosión hídrica
t (ha año) ⁻¹	ha (%)	
Menor a tolerante	2367 (40.43)	No erosiva
Menor a tolerante hasta 12.36	2459 (42.02)	Moderado potencial erosivo
> 12.36	1027 (17.55)	Alto potencial erosivo

y la erosión potencial. Mediante la modelación de cambios en los factores C y/o P, pueden identificarse los cambios de coberturas y prácticas de manejo o prácticas mecánicas pertinentes, que produzcan erosión debajo de la tolerable.

Erosión Tolerante del Suelo

La distribución espacial de la erosión hídrica tolerable del suelo se muestra en la Figura 8 y en el Cuadro 6 se presenta la superficie que ocupa en la cuenca el Jihuíte.

El 8.54% de la superficie tiene menos de 2.2 t (ha año)⁻¹ de erosión tolerable, 37.76% permite una erosión de 2.2 a 4.5 t (ha año)⁻¹ y 53.69% del área tolera de 4.5 a 6.7 t (ha año)⁻¹. En el presente caso, la erosión tolerable es un reflejo de la profundidad del suelo, aspecto puramente físico y biológico de las tierras, pero que debería involucrar otros elementos de tipo social o económico. Al respecto, FAO (1993) propuso una metodología para la evaluación de la producción de cultivos en zonas agroecológicas, donde incluye a la erosión tolerable como un factor que reduce el rendimiento, considerando dicha reducción económicamente aceptable como una función de la

**Figura 8. Distribución espacial de la erosión tolerable en la cuenca El Jihuíte.****Cuadro 6. Superficie con erosión hídrica tolerable de acuerdo con la profundidad de las raíces en la cuenca El Jihuíte.**

Pérdida de suelo	Superficie
t (ha año) ⁻¹	ha (%)
< 2.2	500 (8.54)
2.2 - 4.5	2210 (37.77)
4.5 - 6.7	3142 (53.69)

pérdida total de la capa de suelo, la densidad aparente del suelo y el tiempo (en años) sobre el cual toma lugar la reducción.

En general, el procedimiento presentado demostró que es posible integrar modelos simples y puntuales como la EUPS a los SIG's, en particular cuando las variables del modelo pueden expresarse con funciones matemáticas o información a la que pueda darse una expresión espacial, donde la calidad del producto dependerá de la precisión de los datos utilizados. En el caso de la cuenca El Jihuíte, la información requerida por la EUPS se tomó de parámetros medidos en ellas, muchos disponibles con expresión espacial, por lo que la estimación de la distribución de la erosión del suelo puede considerarse adecuada. Sin embargo, a escala nacional, regional o estatal, mucha de la información con las características antes mencionadas no está disponibles, con el consecuente demérito de la calidad del producto o limitada integración de la EUPS a un SIG.

En todo momento, debe considerarse que el modelo EUPS se concibió para estudios de erosión puntuales (escala de predio) y no debe cambiarse tal percepción, aún en un cambio de escala como es el de cuenca. En este caso, se mantuvo la concepción original al considerar cada píxel como un predio al que aplicó EUPS; sin embargo, faltan aspectos por mejorar en el cálculo de factores, pero lo importante es que se validó que EUPS es factible integrarla a un SIG con las ventajas de su simplicidad de aplicación y consecución de información fácilmente accesible e inclusive la posibilidad de calcular factores como K con la aplicación de modelos, cuando se dispone de la información pertinente.

CONCLUSIONES

- El procedimiento de integración de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) con factores expresados en imágenes tipo 'raster' y procesadas en un sistema de información geográfica, permitió la

estimación de pérdida de suelo a escala de cuenca hidrográfica.

- Es factible la modelación de la pérdida de suelo cuando los factores de EUPS sean funciones matemáticas o que puedan expresarse con valores en una imagen 'raster'.

- Se requiere mejorar el cálculo de factores como L de acuerdo con su concepción original para su aplicación en SIG, pues de otra manera es posible que sobreestime la erosión al considerar ésta con un valor mayor que el real, y al considerar procesos continuos cuando en realidad son puntuales.

- Aunque es factible la aplicación de EUPS en el SIG con resultados satisfactorios en pequeñas áreas como la cuenca El Jihuít, en muchas zonas de México puede ser limitada a causa de la poca disponibilidad de información; entre ellos están los datos de cantidad e intensidad de lluvia, la distribución de parámetros edáficos como la presentada en este trabajo, información local para factores como la erosionabilidad del suelo, cobertura del suelo y prácticas de manejo, que de contarse con registros y base de datos con esta información se mejoraría su desempeño de esta herramienta.

LITERATURA CITADA

- Alemán M., V., J.A. Martínez S., H.E. Flores L., P. Díaz M., H. Ramírez V. y K.F. Byerly M. 1996. Estudio socioeconómico de la cuenca El Jihuít. pp. 18-24. *In*: Manejo integral de la cuenca agropecuaria y forestal El Jihuít. Publicación Especial 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro-Campo Experimental Altos de Jalisco. Tepatlán, Jalisco, México.
- Bhan, S.K., S.K. Saha, L.M. Pande y J. Prasad. 2000. Use of remote sensing and GIS technology in sustainable agriculture management and development. Indian Institute of Remote Sensing, NRSA. DEHRADUN, India. 10 pags. <http://www.itc.nl/suslup/thema5/617/617.pdf> (fecha de acceso: 23/03/02)
- Bocco V., G., J.L. Palacio P. y C.R. Valenzuela. 1991. Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica. *Ciencia y Desarrollo* 17-97: 79-88.
- Brooks, K.N., P.F. Ffolliott, H.M. Gregersen y J.L. Thames. 1993. Hydrology and the management of watersheds. Cuarta reimpresión. Iowa State University Press. Ames, Iowa.
- Burrough, P.A. y R.A. McDonnell. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. Nueva York.
- Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia.
- Colotti B., E. 1998. Determinación de la energía cinética de la lluvia con datos horarios. Universidad Central de Venezuela. *Revista Terra*, 16(23): 55-72.
- Dunn, M. y R. Hickey. 1998. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. *Cartography* 27: 9-15.
- Eiumnoh, A. 2000. Integration of geographic information systems (GIS) and satellite remote sensing (SRS) for watershed management. Asian Institute of Technology. Pathumthani, Thailand. <http://www.agnet.org/library/abstract/tb150.html> (fecha de acceso: 11/03/02)
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- FAO. 1993. Zonación agroecológico: Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. Roma, Italia.
- FAO. 1996. Agroecological assessment for national planning: The example of Kenya. FAO Soils bulletin 67. Roma, Italia.
- Figueroa S., B., A. Amante O., H.G. Cortés T., J. Pimentel L., E.S. Osuna C., J.M. Rodríguez O. y F.J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Posgraduados. Salinas, San Luis Potosí, México.
- Flores L., H.E., J.A. Martínez S., H. Ramírez V., V. Alemán M., P. Díaz M., J.A. Ruiz C. y K.F. Byerly M. 1996. Diagnóstico agroclimático y edafológico de la cuenca El Jihuít. pp. 6-10. *In*: Manejo integral de la cuenca agropecuaria y forestal El Jihuít. Publicación Especial 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro-Campo Experimental Altos de Jalisco. Tepatlán, Jalisco, México.
- Flores L., H.E., H. Ramírez V. y F.K. Byerly M. 2000. Diagnóstico del sistema de producción de maíz de temporal en la cuenca El Jihuít, México. *Bitácora Pecuaria* 2(2): 33-45.
- Foster, G.R., D.K. Meyer y C.A. Onstad, 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Trans ASAE* 20(4): 683-687.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4a edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Heimlich, R.E. y N.L. Bills. 1984. An improved soil erosion classification for conservation policy. *J. Soil Water Conserv.* 39: 261-266.
- Hickey, R. 2000. Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography* 29: 1-8.
- Hu, Q., C.J. Gantzer, P.K. Junk y B.L. Lee. 2000. Rainfall erosivity in the republic of Korea. *J. Soil Water Conserv.* 55: 115-120.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. Modelo de elevación de digital, escala 1:50 000. Cartas fl3d57 y fl3d58. CD- Rom. México, D.F.
- León A., R. y A. Aguilar S. 1987. Materia orgánica. pp. 85-91. *In*: Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Mati, B.M., R.P.C. Morgan, F.N. Gichuki, J.N. Quinton, T.R. Brewer y H.P. Liniger. 2000. Assessment of erosion hazard with USLE and GIS: A case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. *JAG* 2(1): 1-9. <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/documents/mati.pdf> (fecha de acceso: 23/03/02)
- Mitchell, J.K. y G.D. Bubenzer. 1980. Estimación de la pérdida de suelo. pp. 35-88. *In*: Kirkby, M.J. y R.P.C. Morgan (eds.). Erosión de suelos. Limusa. México, D.F.
- Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. 2a edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.

- Osuna C., E.S. y F. Esquivel V. 1996. Cobertura vegetal y erosión del suelo en Aguascalientes. *Agricultura Técnica en México* 22(2): 127-144.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2a edición. Mundi-Prensa. Bilbao, España.
- Renard, K.G., L.D. Meyer y G.R. Foster. 1996. Chapter 1. Introduction and history. pp. 1-18. *In*: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- Ríos B., J.D. y M.R. Martínez M. 1990. Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. *Agrociencia, serie Agua-Suelo-Planta* 1: 61-73.
- Römkens, M.S.M., R.A. Young, R.A. Poesen, J.W.A. McCool, S.A. El-Swaify y J.M. Bradford. 1996. Chapter 3. Soil erodability factor (K). pp. 67-99. *In*: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- SARH-CP. Secretaría de Agricultura y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados. 1982. *Manual de Conservación del Suelo y del Agua*. 2a edición. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. Colegio de Postgraduados. México, D.F.
- Singh, G.R., R. Babu, P. Narain, L.S. Bhushan e I.P. Abrol. 1992. Soil erosion rates in India. *J. Soil Water Conserv.* 41: 97-99.
- TRAGSA. 1994. *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Ulsaker, L.G. y C.A. Onstad. 1984. Relating rainfall erosivity factors to soil loss in Kenya. *Soil Sci. Soc. Am.* 48: 891-896.
- USDA-SCS. 1990. Soil erosion by water. Agriculture information bulletin 513. US Department of Agriculture-Soil Conservation Service. Washington, DC.
- Van Remortel, R., M. Hamilton y R. Hickey. 2001. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography* 30: 27-35.
- Wanielista, M., R. Kersten y R. Eaglin. 1997. *Hydrology: Water quantity and quality control*. 2a edición. John Wiley. New York.
- Williams, J.R., P.T. Dyke, W.W. Fuchs, V.W. Benson, O.W. Rice y E.D. Taylor. 1990. EPIC-- Erosion/Productivity Impact Calculator: 2 User manual. Sharpley, A.N. y J.R. Williams (eds). Technical Bulletin 1768. US Department of Agriculture. Temple, TX.
- Wischmeier, W.H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 31: 5-9.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Yoder, D.C., J.P. Porter, J.M. Laflen, J.R. Simanton, K.G. Renard, D.K. McCool y G.R. Foster. 1996. Chapter 5. Cover - management factor (C). pp. 145-182. *In*: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- Zhang, X., N.A. Drake y J. Wainwright. 2000. Scaling issues in environmental modelling. pp. 1-28. *In*: Wainwright, J. y M. Mulligan (eds.). *Environmental modeling: Finding simplicity in complexity*. John Wiley. Chichester, UK.