

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL FACTOR LS (RUSLE) USANDO PROCEDIMIENTOS SIG COMPATIBLES CON IDRISI APLICACIÓN EN UNA MICROCUENCA ANDINA

Alex G. Barrios R.

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP), Mérida-Venezuela. E-Mail: abarrios@forest.ula.ve

RESUMEN

Se aplican dos métodos SIG para el cálculo del factor LS de RUSLE a escala de cuencas hidrográficas, los cuales consideran la distribución espacial tanto de la longitud (λ), como de la pendiente (p) del terreno. Con el primero, se determina el valor de l a partir del área acumulada de drenaje hasta cada pixel de una cobertura raster (Bolton et al., 1995), aplicándose luego las expresiones usadas en RUSLE para el cálculo de los subfactores longitud (L) y pendiente (S); con el segundo (Biesemas, 1997), se calcula directamente LS sobre líneas de flujo y dividiendo el terreno en segmentos uniformes. Se comparan los resultados de estos métodos con dos procedimientos alternos, más simples, que solo consideran la distribución espacial de la pendiente (p): λ constante (50 y 100 m), y λ en función de la pendiente (Mintegui, 1988). Los resultados indican que los métodos que determinan la distribución espacial de λ producen valores del factor LS más pequeños, pudiéndose estar sobrestimando el valor de LS cuando se recurre a enfoques más simples, como asumir $\lambda=100$ m o calcular LS a partir de sólo la pendiente.

Palabras clave: Erosión, factor topográfico (LS), USLE, RUSLE.

ABSTRACT

Two methods were applied to calculate the RUSLE LS factor in a watershed, both taking into account the slope length (λ) and slope gradient (p) spatial distributions. In the first method, λ was derived from accumulated drainage area of each pixel of a raster image (Bolton et al., 1995); then RUSLE equations for length (L) and gradient (S) factors were applied. In the second method, LS was directly calculated along flow lines on uniform segments (Biesemas, 1997). Results were compared with two more simple alternatives approaches which take into account only the slope gradient (p) spatial distribution: constant values of λ (50 and 100 m) and λ as a function of the slope gradient (Mintegui, 1988). Results indicate that methods based in λ spatial distribution produced smaller LS values. Alternative simpler methods, like assuming $\lambda=100$ or obtaining LS based upon slope gradient might over estimate LS values.

Key words: Erosion, topographic factor (LS), USLE, RUSLE.

INTRODUCCIÓN

Cuando se evalúa la erosión del suelo a escala de cuencas hidrográficas, usando las tecnologías USLE (Wischmeier y Smith, 1978) o RUSLE (Renard et al., 1997), el mayor inconveniente se presenta en el cálculo del factor topográfico: LS. Esto se debe a su concepto original basado en parcelas experimentales de erosión, con terrenos uniformes tanto en pendiente como en longitud del flujo superficial. Cuando se extiende la USLE/RUSLE a cuencas hidrográficas, surgen inconvenientes para estimar la longitud del terreno (λ) que se debe utilizar en las expresiones matemáticas de LS.

Algunos trabajos a escala de cuencas plantean soluciones para estimar un valor medio de λ y LS representativo de toda la cuenca (Williams y Berndt, 1972, 1976), o para estimar, a partir de perfiles longitudinales del relieve, el valor medio de LS en laderas componentes de la cuenca (Wilson, 1986). Estas relaciones, insuficientes cuando se evalúa la distribución espacial del factor a escala de cuencas, ha llevado a que en algunos estudios se asuma un valor de referencia para λ , de manera que la variación espacial de LS dependa sólo de la pendiente del terreno; en estos casos se asume un único valor de l ,

50 o 100 m por ejemplo, para toda la superficie de la cuenca, o se asumen diferentes valores subjetivos en función de la magnitud de la pendiente.

Mintegui (1988) deriva una relación hidráulica entre λ y la pendiente del terreno, simplificando el cálculo de LS a partir de la pendiente y el tipo de suelo. Esta simplificación, poco referenciada, facilitaría el análisis espacial de LS a escala de cuencas. Otros autores, Hickey et al. (1994), Bolton et al. (1995), Desmet y Govers (1996), Biesemans et al. (1999), han aplicado algoritmos de flujo, a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE), para determinar la longitud acumulada del flujo superficial y, a partir de allí, el factor topográfico LS. En la actualidad, la tendencia es hacia el empleo de uno de estos algoritmos, en combinación con un sistema de información geográfica (SIG), como base para el cálculo del factor LS mediante aproximaciones bidimensionales al enfoque de Foster y Wischmeier (1974) para terrenos irregulares y otros procedimientos similares.

El objetivo del presente trabajo es calcular el factor LS, según RUSLE, a partir de un MDE derivado con un SIG y aplicando un algoritmo de flujo para la determinación de λ , comparándose los resultados con dos esquemas de cálculo alternativos de mayor simplicidad: LS asumiendo λ constante en toda la cuenca y LS en función de la pendiente.

Se trata de procedimientos válidos a escala de cuencas, orientados al estudio de la distribución espacial del riesgo erosivo, la estimación preliminar de la producción de sedimentos, y en aquellos casos donde no se requiera de resultados precisos sobre la tasa de erosión; ya que no se está considerando la modificación del sistema de drenaje natural debido a las redes de drenaje y de divisorias artificiales introducidas por el parcelamiento agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionó la microcuenca de la Qda. El Molino, de unos 15 Km² de superficie, pequeño afluente del río Burbusay, que a su vez drena al río Carache, subcuenca del sistema hidrográfico del río Motatán, en el Estado Trujillo. Se trata de una típica cuenca de montaña de paisaje semiárido, relieve abrupto y

escasa cobertura vegetal; sobre la cual se tiene suficiente información básica (SHT, 1999), incluyendo el mapa topográfico digitalizado.

Métodos

El factor LS se calculó de manera distribuida en el espacio a través del SIG Idrisi, aplicando RUSLE (Renard et al., 1997) a cada celda raster de un MDE. El cual se elaboró directamente mediante digitalización de las curvas de nivel, a intervalos de 100 m, derivadas de un mapa topográfico escala 1:25.000, y su posterior rasterización e interpolación en Idrisi.

El cálculo de LS se basa en las expresiones de Foster et al. (1977) y McCool et al. (1987 y 1989) utilizadas en RUSLE:

$$L = (\lambda / 22.13)^m \quad (1)$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (2)$$

$$\beta = \{(\text{sen } \theta / 0.0896) / [3.0 (\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56]\} * r \quad (3)$$

$$S = 10.8 \text{ sen } \theta + 0.03; \text{ para } p < 9\% \quad (4a)$$

$$S = 16.8 \text{ sen } \theta - 0.50; \text{ para } p \geq 9\% \quad (4b)$$

donde:

L subfactor longitud del terreno (adimensional)

S subfactor pendiente del terreno (adimensional)

λ longitud del terreno (m)

m exponente variable según β

β relación erosión en surco a erosión en entresurco

θ ángulo de inclinación del terreno

p pendiente del terreno (%)

r coeficiente igual a: 0.5, en tierras forestales o pastizales; 1.0, en terrenos agrícolas; y 2.0, en sitios de construcción

El procedimiento general considera que el factor LS es el producto de los subfactores longitud (L) y pendiente (S) del terreno, y su magnitud y distribución espacial dependerá de la que tengan estos subfactores. La distribución espacial de S se obtuvo directamente aplicando la ec. (4) a una cobertura SIG sobre pendiente del terreno; esta última fue derivada del MDE usando Idrisi. La distribución espacial de L, por su parte, depende de las distribuciones espaciales tanto de λ como del exponente m. La distribución espacial de m se determinó aplicando en forma combinada las ecs. (3) y (2) a las coberturas SIG sobre pendiente del terreno y uso de la tierra. Para λ , se aplicaron diferentes

procedimientos alternativos, que condujeron a los siguientes esquemas de cálculo del factor LS:

1. *LS asumiendo λ constante*

Se asumieron dos valores para la longitud del terreno: a) $\lambda=100$ m y b) $\lambda=50$ m. Se aplica el procedimiento general, descrito anteriormente, sin considerar la distribución espacial de λ .

2. *LS asociando un valor de l según clase de pendiente (Mintegui, 1988)*

En este caso LS se calcula directamente a partir del mapa digital de pendientes. Se aplicó con tal fin la siguiente relación (Edeso *et al.*, s/f) basada en el trabajo de Mintegui (1988):

Pendiente %:

0-3	3-12	12-18	18-24	24-30	30-60	60-70	70-100	>100
LS: 0.3	1.5	3.4	5.6	8.7	14.6	20.2	25.2	28.5

La relación anterior fue convertida a expresiones algebraicas, mediante regresión lineal, con el propósito de disponer de una función continua aplicable a cada pixel de la cobertura raster sobre la pendiente del terreno: $LS = 0.009 (p)^2 + 0.0798 (p)$, para pendientes (p) menores o iguales a 30%, y $LS = 0.2558 (p) + 3.248$, para pendientes mayores; ecuaciones obtenidas con coeficientes R^2 de 0.997 y 0.996 respectivamente.

3. *LS calculando λ según enfoque CALSITE (Bolton et al. 1995)*

Se aplica el procedimiento general, considerando, además, la distribución espacial de λ dentro de la cuenca, determinándose esta última mediante la aproximación usada en el modelo CALSITE (Bolton *et al.*, 1995):

$$\lambda = (\text{área acumulada de drenaje} / 3.1416) ^{0.5} \quad (5)$$

El área acumulada de drenaje se calculó mediante un algoritmo de flujo desarrollado por Biesemans (1997), programa «wtrshed» en lenguaje C, cuya estructura se muestra en la Figura 1(a). El algoritmo, partiendo de un MDE, determina el área acumulada de drenaje hasta cada celda; su base son los trabajos previos de Jenson y Domingue (1988) y Fairfield y Leymarie (1991). Para la determinación de las direcciones del flujo se utilizó la opción del método determinístico de los ocho puntos vecinos (D8).

Finalmente, la cobertura resultante de aplicar la ec. (5) se actualizó para considerar $l=0$ en los pixeles que corresponden a la red hidrográfica de la cuenca. Esta última se obtuvo directamente del algoritmo de flujo wtrshed.c seleccionando un umbral de drenaje: valor del área acumulada de drenaje a partir del cual se considera que un pixel pertenece a la red de cauces o canales de flujo concentrado.

En la Figura 2 se ilustra, mediante un esquema, el proceso de modelaje cartográfico desarrollado para producir la cobertura espacial del factor LS según los procedimientos anteriores.

4. *LS por segmentos siguiendo líneas de flujo (Biesemans, 1997)*

Se aplica el programa «rusle_flowline_ls» en lenguaje C (Biesemans, 1997), el cual aplica un algoritmo para resolver una aproximación bidimensional del método de Foster y Wischmeier (1974) para terrenos irregulares. El algoritmo divide cada línea de flujo en segmentos uniformes (celdas), calculándose el factor LS en cada uno según:

$$LS_i = \left[\frac{\left(\begin{matrix} m_i + 1 & m_i + 1 \\ \lambda_i & \lambda_{i-1} \end{matrix} \right) \cdot S_i}{\left(\lambda_i - \lambda_{i-1} \right) \cdot 22.13^{m_i}} \right] \quad (6)$$

Los términos m y S de la ec. (6) son los mismos señalados anteriormente, pero referidos a un segmento i , y se calculan con las ecs. (2) a (4). λ_i y λ_{i-1} son las distancias desde el inicio de la ladera hasta la base y tope del segmento i , respectivamente. En la Figura 1(b) se ilustra el algoritmo utilizado por «rusle_flowline_ls» para el cálculo del factor LS en cada celda de la línea de flujo.

Materiales

Mapa topográfico digitalizado, a escala 1:25.000, con curvas de nivel a intervalos de 100 m, referenciado espacialmente por las siguientes coordenadas UTM, en metros: E 360.500 a E 368.00 y N 1.040.000 a 1.045.000.

Software básico: Idrisi para Windows 2.0; Surfer 6.0; wtrshed.c y rusle_flowline_ls.c (Bieseman, 1997)

Hardware utilizado: PC Pentium Intel de 200 MHz, con 64 Mb en RAM y 3.0 Gb en disco duro.

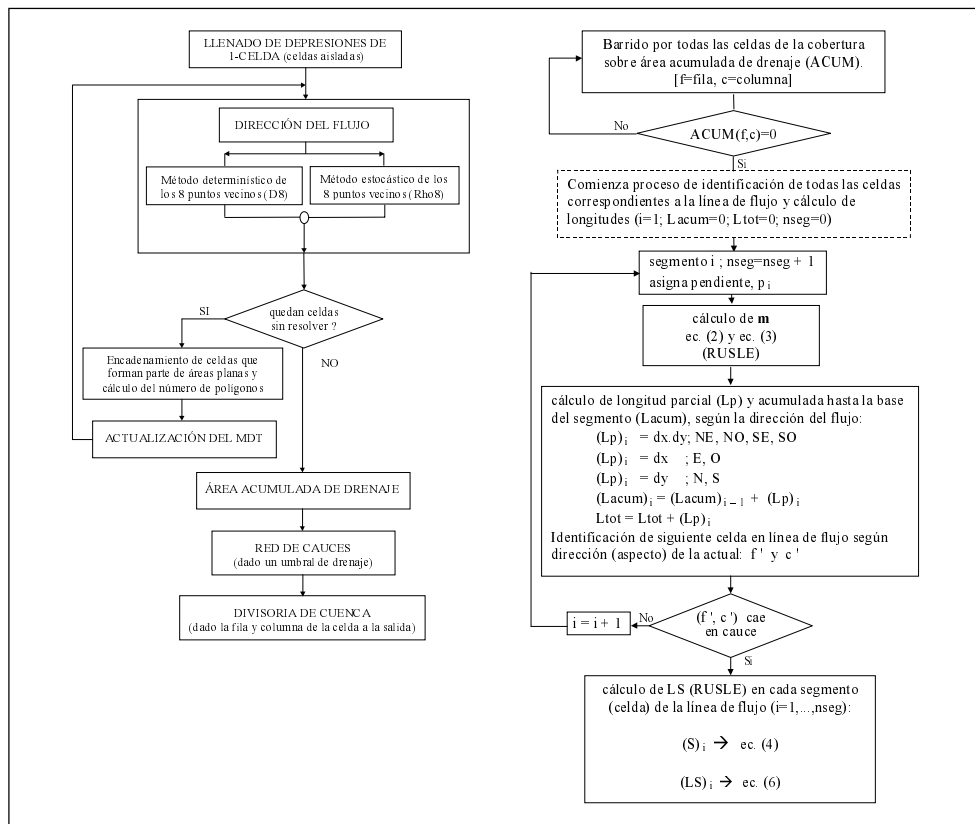


Figura 1. Estructura de los algoritmos de Biesemans (1997): (a) Programa «wtrshed.c». (b) Cálculo de LS dentro del programa «rusle_flowline_ls.c»

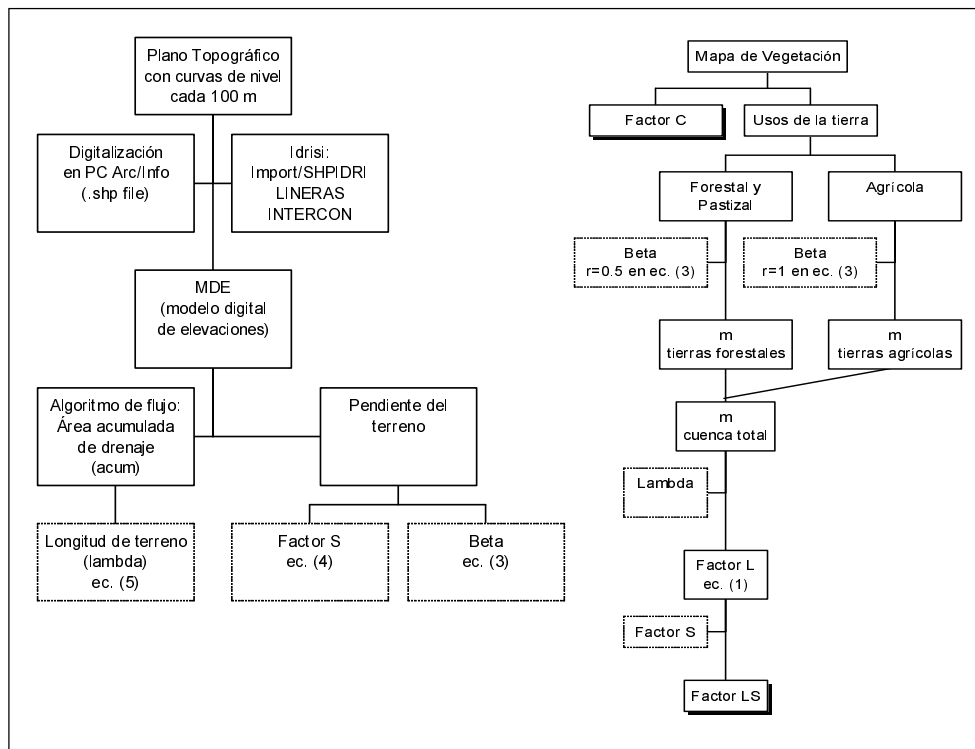


Figura 2. Modelaje cartográfico general para el cálculo del factor LS

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3(a) se muestra el MDE obtenido con Idrisi (orden Intercon), utilizando coberturas de 250 filas por 375 columnas y píxeles de 20 m x 20 m. La cobertura de pendientes, utilizada en los tres primeros procedimientos, derivada del MDE usando el análisis de superficies de Idrisi, se presenta en la Figura 3(b); mientras que la distribución espacial de λ , obtenida aplicando la ec. (5), se muestra en la Figura 3(c). Un filtro a ésta última cobertura, para valores de lambda mayores a 180 m, Figura 3(d), produjo una cobertura idéntica a la cobertura de cauces, Figura 3(e), obtenida a través del algoritmo de flujo (wtrshed.c) cuando se aplicó un umbral de drenaje igual a 250 píxeles (10 ha).

Debido a que el algoritmo de Biesemans (1997) modifica iterativamente el MDE original, hasta obtener un flujo continuo de escurrimiento, sin acumulaciones en depresiones, en la Figura 3(f) se presenta el resultado de comparar los dos modelos digitales de elevaciones: MDE modificado menos MDE original; observándose que en menos del 1% de los píxeles se produjeron cambios mayores a 1.0 m en la altitud del terreno, localizándose estos principalmente en un sector muy pequeño ubicado al suroeste de la divisoria de la cuenca.

Las coberturas con los valores finales del factor LS, según cada método evaluado, se presentan en la Figura 4. Se observa que con los procedimientos (a) y (c), $\lambda=100$ y LS en función de la pendiente, respectivamente, se obtienen resultados similares,

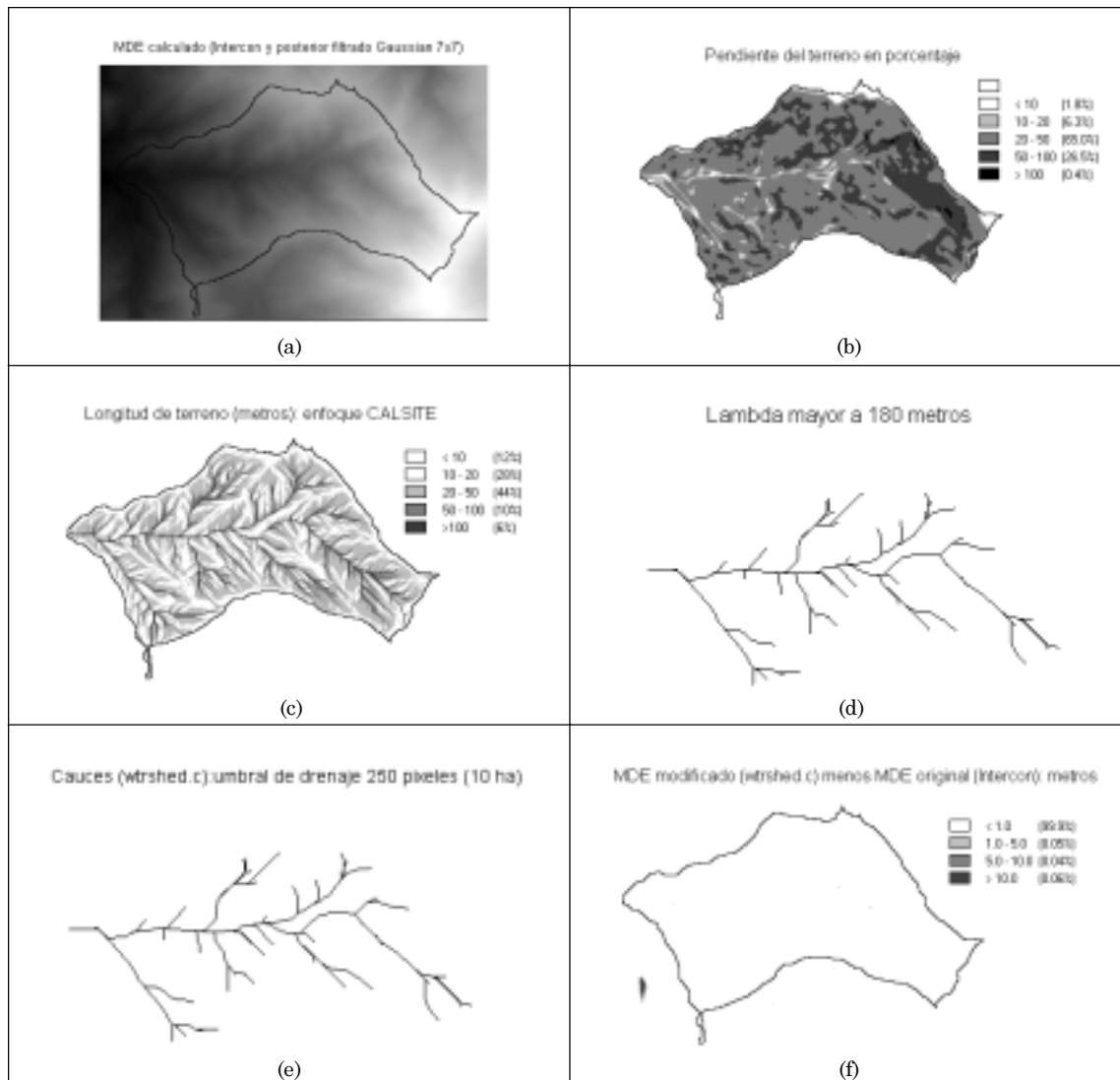


Figura 3. Coberturas intermedias: MDE, pendiente y longitud del terreno, cauces.

aunque mayores a los del resto de procedimientos: 13.8 y 13.2 son los valores del LS medio, y las distribuciones de frecuencia muestran diferencias poco significativas. Con el procedimiento (c), $\lambda=50$, se obtiene un valor medio de LS igual a 9.2, valor intermedio, mientras que con los procedimientos (d) y (e), donde se toman en cuenta la distribución espacial de λ , se obtienen valores de LS más bajos. El cálculo de λ , a partir del área acumulada de drenaje, mediante el enfoque CALSITE (ec. 5),

produjo un LS medio igual a 6.2, mientras que con el algoritmo de Biesemans (1997), para líneas de flujo, el LS medio fue 5.5; encontrándose, además, mediante comparación de las coberturas, que en un 60% de los pixeles el LS calculado fue menor con el último de los enfoques.

Tomando en cuenta los resultados, se concluye que existe un elevado riesgo de sobrestimar el factor LS, a escala de cuencas, cuando no se considera la distribución espacial del factor λ dentro de ella y, en

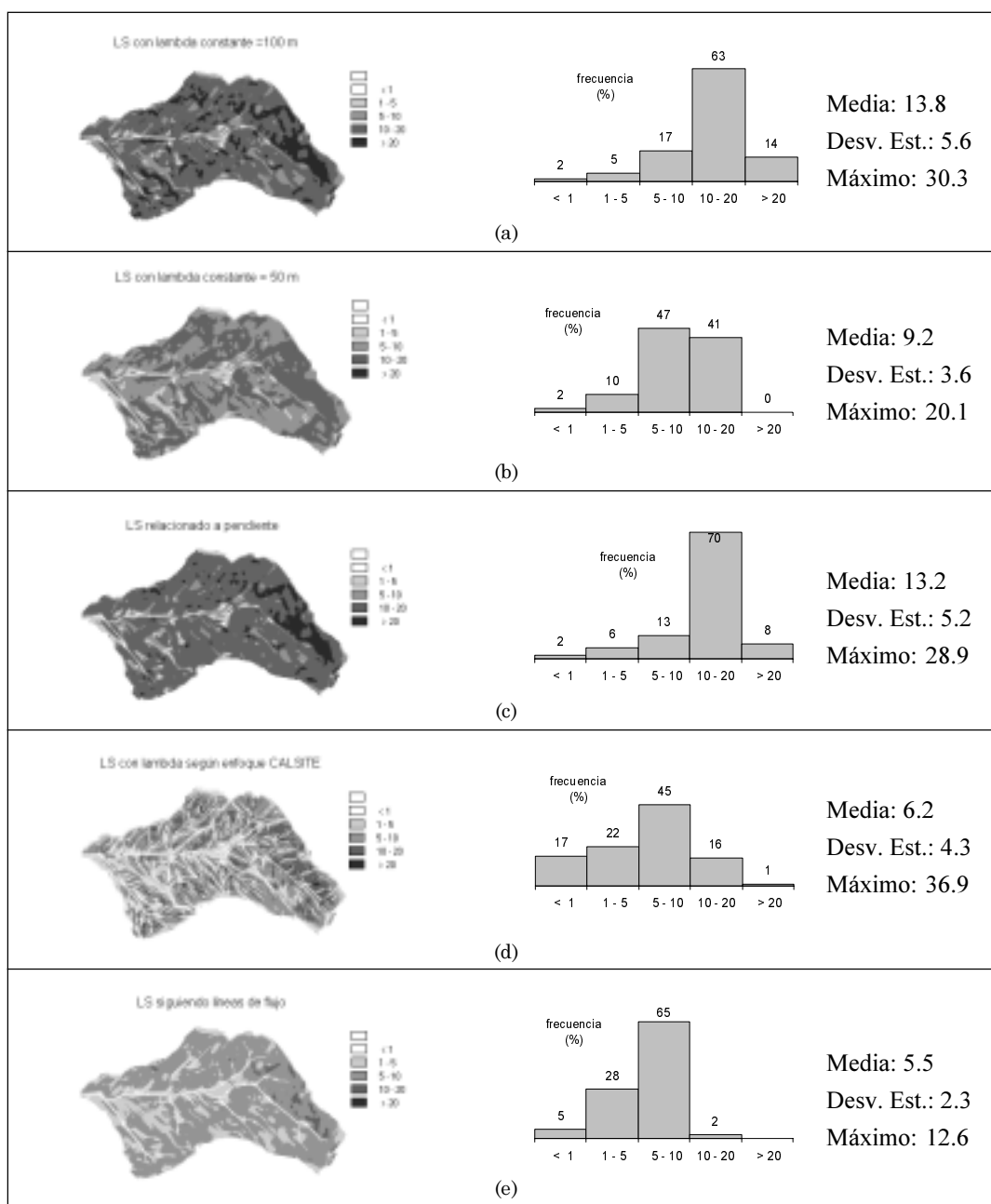


Figura 4. Factor LS según diferentes métodos: (a) $l = 100$ m; (b) $l = 50$ m; (c) LS en función de sólo la pendiente (Mintegui, 1988); (d) LS usando enfoque CALSITE para l ; y (e) LS por segmentos siguiendo líneas de flujo (Biesemans, 1997)

su lugar, se recurre a procedimientos más simples tales como asumir λ constante e igual a 100 o utilizar una relación general entre LS y pendiente. Los dos procedimientos SIG utilizados para tomar en cuenta la distribución espacial de λ , resultaron apropiados y fáciles de implementar. Por su naturaleza, estos métodos, tanto el enfoque CALSITE como `rusle_flowline_ls`, son adecuados para evaluar el riesgo erosivo a escala de cuencas y para estimaciones preliminares del aporte de sedimentos aguas abajo. Para cálculos de mayor precisión, el método basado en segmentos a lo largo de la línea de flujo sería el más apropiado, pero aplicado a parcelas o pequeñas unidades de tierra donde se tome en cuenta el verdadero sistema de drenaje impuesto por los desarrollos agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema Hidráulico Trujillano, SHT, por permitir el uso de la información básica sobre la cuenca; al Dr. Jan Biesemans, de la Universidad de Gent, Bélgica, quien facilitó sus algoritmos `wtrshed.c` y `rusle_flowline_ls.c`; al CIDIAT por permitir el uso de sus licencias sobre Idrisi for Windows y Surfer.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIESEMANS J., M. VAN MEIRVENNE y D. GABRIELS. 1999. Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict longtime average off-site sediment accumulation. *Journal of Soil and Water Conservation* (en prensa)
- BIESEMANS J. 1997. WTRSHED y RUSLE_FLOWLINE_LS C source programs. Program. Dept. Soil Management, University Gent.
- BOLTON P., P.A. BRADBURY, P. LAWRENCE, y E. ATKINSON. 1995. CALSITE Versión 3.1. Calibrated Simulation of Transported Erosion. User manual. HR Wallingford Ltd. Wallingford, U.K.
- DESMET P. J. y G. GOVERS. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51(5): 427-433.
- EDESOS J. M., P. MARAURI y A. MERINO. WWW. Aplicaciones de los sistemas de información geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: el mapa sintético de riesgos potenciales y el mapa de erosión. <http://www.arrakis.es/~pedromm/articulo1.htm>
- FAIRFIELD J. y P. LEYMARIE. 1991. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research* 27(5): 709-717.
- FOSTER, G.R., L.D. MEYER, y C.A. ONSTAND. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Transaction of ASAE* 20:683-687.
- FOSTER G. R. y W. H. WISCHMEIER. 1974. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *TRANSACTIONS of the ASAE* 17:305-309
- HICKEY R., A. SMITH y P. JANKOWSKI. 1994. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID. *Computers, Environment and Urban Systems*, 18(5):365-380.
- JENSON S.K. y J.O. DOMINGUE. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-1600.
- MCCOOL, D.K., L.C. BROWN, G.R. FOSTER, C.K. MUTCHLER y L.D. MEYER. 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *TRANSACTIONS of ASAE* 30(5): 1387-1396.
- MCCOOL, D.K., G.R. FOSTER, C.K. MUTCHLER y L.D. MEYER. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *TRANSACTIONS of ASAE* 32: 1571-1576.
- MINTEGUI J. A. 1988. Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. «Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la longitud del declive en un terreno». V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. pp: 2229-2245. Madrid
- RENARD, K.G., G.R. FOSTER, G.A. WEESIES, D.K. MCCOLL, y D.C. YOSER. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: «A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)». USDA, Agricultural Research Service, Agricultural Handbook Number 703.
- SHT. 1999. Proyecto recuperación ambiental de áreas críticas en las microcuencas de Burbusay y Miquía, subcuenca del río Carache, cuenca del río Motatán, Estado Trujillo. Proyecto desarrollado por UFORGA-CIDIAT, Universidad de Los Andes, para el Sistema Hidráulico Trujillano. Mérida.
- WILLIAMS J. R., y H. D. BERNDT. 1972. Sediment yield computed with universal equation. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 98(HY12):2087-2098.

- WILLIAMS J. R., y H. D. BERNDT. 1976. Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds. Proceedings of the National Soil Erosion Conference.
- WILSON J. P. 1986. Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 41(3):179-184.
- WISCHMEIER, W. H. y D.D. SMITH. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook 537*. USDA-SCS. 58 p.