DETERMINACIÓN DE ÁREAS DE EROSIÓN POTENCIAL EN CÁRCAVAS: UN EJEMPLO EN EL CENTRO DE MÉXICO

José Luis Palacio Prieto*

RESUMEN

Por medio de un Sistema de Información Geográfica se caracterizó la erosión en cárcavas en un municipio del estado de Hidalgo, considerándose para ello a la litología, tipo suelo, pendiente y cubierta del terreno. A partir de dicha caracterización, fueron definidas áreas de condiciones similares a las existentes en áreas ya erosionadas (luvisoles desarrollados, principalmente, sobre basaltos, sujetos a un uso de suelo agrícola o de pastizal), determinando, así, áreas de erosión potencial. Las variables utilizadas explican hasta un 85% de la erosión actual en cárcavas; dada la accesibilidad de las variables y el tiempo empleado en su procesamiento, los resultados derivados del procedimiento se consideran satisfactorios.

SUMMARY

Using a Geographical Information System, gully erosion ocurring in a municipality of the state of Hidalgo, was characterized. The variables involved were lithology, type of soil, slope end landcover. Variables commonly related to gully-eroded areas in the municipality (luvisols developed, mainly, over basalts used for agriculture or grazing) were used to define areas in which gullies can potentially develop. Up to 85% of the present gully erosion can be explained considering the variables mentioned before. Due to the accesibility of the variables and the time involved, the results derived from the procedure are considered satisfactory.

Introducción

Los diversos intentos por evaluar la erosión potencial del suelo han tendido, desde fines del siglo pasado, a la formulación de modelos empíricos de aplicación universal (Meyer, 1984). La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS; Wischmeier y Smith, 1978) constituye, sin duda alguna, el aporte más importante en el campo de los modelos desarrollados para la predicción de la erosión. Pueden citarse también el modelo GAMES (Dickinson *et al.*, 1986), en buena medida basado en la EUPS, y los modelos SLEMSA (Elwell, 1978) y el CREAMS (Knisel, 1980), todos ellos encaminados a la estimación de la pérdida anual de suelo a partir de variables básicamente comunes a todos los modelos, entre los cuales se incluyen la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la cobertura del terreno y factores topográficos.

Los modelos mencionados, en esencia hortonianos, se restringen, por ello, a la estimación de la pérdida de suelo por erosión laminar y, no obstante su amplia difusión y experiencias, sobre todo de las EUPS, en la práctica han enfrentado dificultades, debido a la complejidad del fenómeno de la erosión

*Instituto de Geografía, UNAM.

Igualmente complejo resulta el desarrollo de modelos predictivos en el caso de otros tipos de erosión, específicamente de la erosión en cárcavas, tema en el que los estudios realizados son comparativamente escasos. La complejidad de los procesos involucrados en la génesis y desarrollo de las cárcavas es, sin duda, la principal causa que ha limitado "la disponibilidad de un modelo matemático de amplia aceptación" (Kirkby y Morgan, 1984), entre otros temas.

Una metodología distinta presentan Donker y Damen (1984), quienes basándose en una caracterización y estudio comparativo de sitios erosionados y no erosionados por cárcavas, definen áreas de desarrollo potencial de estos rasgos erosivos.

De acuerdo con este último enfoque, el presente estudio tiene como objetivo principal el diseño y aplicación de un procedimiento para la determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas, a partir de la caracterización de las áreas ya erosionadas en un municipio del estado de Hidalgo. No se persigue la formulación de un modelo matemático de aplicación universal como los citados anteriormente.

Selección de variables

Las variables seleccionadas para la caracterización de la erosión y definición de áreas de erosión potencial en cárcavas fueron elegidas con base, fundamentalmente, en su accesibilidad para ser incorporadas al procedimiento y a su probada participación en el proceso de erosión.

La esta manera, la erosividad de la lluvia, considerada como el factor activo más importante, y a la vez de más difícil valoración que interviene en el proceso de la erosión (Hudson, 1981), no fue tomada en cuenta. Ello se debió, básicamente, a la deficiente distribución de la red de información meteorológica en la zona de estudio y, en particular, a la falta de datos pluviográficos, necesarios para el cálculo de índices de erosividad de la lluvia. La litología, tipo de suelo, cobertura del terreno (uso del suelo y vegetación) y pendiente, son variables de fácil acceso y probada participación sobre el proceso erosivo (pueden consultarse al respecto Hudson, 1981; Campbell, 1974; Nir y Klein, 1974; Imeson y Kwaad, 1980; Yair *et al.*, 1980; Bryan y Yair, 1982; Kirkby y Morgan, 1984, entre otros). Estas variables fueron incorporadas en su sentido más amplio, sin puntualizar en características específicas. Casos de información puntual sobre cada una de estas variables (profundidad de suelo, pedregosisdad, tipo de asociaciones vegetales, tipo de cultivo, etc.) contribuyeron de manera secundaria en la definición de las áreas de erosión potencial en cárcavas.

Metodología

Las variables seleccionadas fueron capturadas dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG). El Integrated Land and Westershed Management Information System (ILWIS); Valenzuela, 1988), fue utilizado para almacenar y procesar los datos. La fuente principal de información fue la cartografía elaborada a aprtir de fotointerpretación y trabajo de campo; cartografía topográfica y litológica a escala 1:50 000 y edafológica a

1:250 000 (DGGTN) fue de gran utilidad. Los mapas referidos fueron introducidos al SIG por medio de digitación.

El mapa de pendientes se obtuvo a partir de un modelo digital de terreno calculado con un algoritmo de interpolación a partir de curvas de nivel con equidistancias variables (20, 50 y 100 m) según las condiciones del terreno.

A partir de fotografías blanco y negro a escala 1:25 000 se obtuvo un mapa base de erosión mostrando la distribución de cárcavas y badlands, mismo que fue incorporado también en la base de datos por medio de digitación.

La caracterización de la erosión en cárcavas se estableció por medio de sobreposiciones del mapa de erosión con los mapas temáticos elegidos (suelos, litología, uso del suelo y pendientes). La sobreposición de mapas y la consecuente generación de información tabular son capacidades básicas de cualquier Sistema de Información Geográfica (SIG), como el utilizado en este trabajo. Cualquier SIG es capaz de desarrollar estas operaciones, por lo cual no existe restricción a un programa o conjunto de programas de computación en particular para aplicar la metodología aquí propuesta.

A partir de la sobreposición de los mapas referidos, se obtuvieron histogramas de frecuencias que mostraron la relación entre la erosión en cárcavas y las variables seleccionadas. Las frecuencias más altas fueron consideradas para conformar el grupo final de condiciones que permitieron el establecimiento de las áreas de erosión potencial en cárcavas.

Características generales del área en estudio

El municipio de Huasca de Ocampo, estado de Hidalgo, cubre unos 300 km^2 de superficie y se localiza a unos 40 km al NE de la ciudad de Pachuca, Hdo. (**figura 1**).

Se encuentra localizado en la transición entre el Sistema Volcánico Transversal, caracterizado por rocas pliocénicas y pleistocénicas, desde riolitas hasta basaltos, y la Sierra Madre Oriental, consistente en rocas sedimentarias marinas del Mesozoico. Las riolitas se presentan en el sur, formando montañas de laderas abruptas, mientras que los basaltos forman una extensa meseta limitada por profundos cañones en cuyas paredes afloran las calizas y lutitas mesozoicas.

En parte debido a la baja pendiente de las mesetas lávicas y a la presencia de suelos relativamente más profundos (luvisoles, andosoles y vertisoles, principalmente), la mayor parte de la actividad agrícola y el pastoreo en el municipio se llevan a cabo en esta unidad; como consecuencia de prácticas agrícolas inadecuadas, abandono de tierras y sobrepastoreo, la mayor parte de la erosión en cárcavas y badlands se desarrollan, asimismo, en los luvisoles de estas mesetas.

Un clima templado, con una concentración de la lluvia durante seis meses (mayo-octubre; alrededor de 800 mm anuales) cubre la mayor parte del municipio (desde los 2000 a los 3000 m de altitud); un clima más seco caracteriza a las zonas menos elevadas.

Figura 1. Localización del municipio de Huasca de Ocampo, estado de Hidalgo.

Características de las cárcavas

Se pueden reconocer de manera general dos tipos de cárcavas, ambos desarrollados en luvisoles y andosoles principalmente.

El primer tipo se desarrolla en suelos someros a los cuales subyace una capa endurecida de material de composición variable (traquita y lahares de composición ácida, principalmente). La diferente resistencia de las capas subyacentes da como resultado cárcavas poco profundas (menos de 1 m en su mayoría), de laderas rectas y más frecuentemente cóncavas, en donde la relación anchura/profundidad es frecuentemente superior a 10.

El segundo tipo de cárcava es considerablemente más profundo que el primero (hasta 6 m); sus laderas son comúnmente convexas y la relación anchura/profundidad es, en la mayor parte de los casos, menor de 3.

Con base en mediciones de remoción de sedimento realizadas en este segundo tipo de cárcava (Palacio y Vázquez, 1990) y a observaciones de campo, se asume que la movilidad de sedimento en este tipo de cárcava es mayor que en el primero.

Caracterización de la ocurrencia de la erosión en cárcavas

-Erosión en cárcavas y litología (tabla 1).

El 75% de la erosión en cárcavas se desarrolla sobre basaltos, seguida por lahares (7.6%), andesitas (6.8%) y traquitas (3.3%). En diferentes áreas, las cárcavas desarrolladas sobre basaltos exponen perfiles en donde se puede apreciar la secuencia de roca fresca a alterada. El espesor de la capa de alteración, en parte dependiente de la edad, varía, desde prácticamente inexistente en el caso de flujos de lava recientes, hasta unos 3 m en derrames más antiguos. La totalidad de las cárcavas desarrolladas en basaltos pertenece al segundo tipo; las cárcavas someras, correspondientes al primer tipo de estos rasgos, se desarrollan sobre los otros tipos de litología.

Tabla 1. Erosión en cárcavas y litología; frecuencias más importantes

	Superficie erosionada Tipo de Cárcava					
Litología	1		2		Total (HA)	
	HA	%	HA	%	HA	%
Basalto	0	0.0	1183	74.9	1183	74.9
Lahares	89	5.6	33	2.0	122	7.6
Andesita	107	6.8	0	0.0	107	6.8
Traquita	52	3.3	0	0.0	52	3.3
Conglomerado	29	1.8	0	0.0	29	1.8

-Erosión en cárcavas y suelos (tabla 2).

Más del 85% de las cárcavas se desarrollan en luvisoles; otro 6% se presenta en andosoles. El característico horizonte Bt de los luvisoles ha sido relacionado, en un contexto ambiental similar al de la zona estudiada, con procesos de retroceso de cabecera y laderas de las cárcavas y aun con la iniciación de las mismas (Bocco, 1986).

La mayoría de los luvisoles en el área de estudio se derivan de cenizas volcánicas redepositadas, flujos de lava y lahares alterados. Se encuentran en pendientes de alrededor de 3^0 (4-6%), pendiente a la cual corresponde también la más alta densidad de cárcavas, lo que coincide, también, con lo observado en otras áreas del centro de México (Bocco, comunicación personal).

Tabla 2. Erosión en cárcavas y tipo de suelo; frecuencias más importantes

Suelo	Superficie erosionada Tipo de Cárcava 1		2		Total (HA)	
	HA	%	HA	%	HA	%
Luvisol	143	9.0	1208	76.5	1351	85.5
Andosol	97	6.1	0	0.0	97	6.1
Planosol	79	4.9	0	0.0	79	4.9
Feozem	29	1.8	0	0.0	29	1.8

-Erosión en cárcavas y cubierta del terreno (tabla 3).

Siete diferentes clases de cubierta del terreno (uso del suelo y vegetación) fueron consideradas; la **tabla 3** presenta las cinco frecuencias más importantes. Los resultados muestran la relación entre la erosión y las actividades humanas. Agrupando los tipos de cubierta del terreno asociados a las actividades antrópicas (agricultura de riego, agricultura de temporal y pastoreo) el 90% de cárcavas son incluidas. El resto de las cárcavas se desarrolla en otros tipos de cubierta del terreno, aunque normalmente en zonas marginales a las áreas agrícolas y de pastizal.

Tabla 3. Erosión en cárcavas y cubierta de suelo; frecuencias más importantes

Cubierta del suelo	Superficie erosionada Tipo de Cárcava 1		2		Total (HA)	
	HA	%	HA	%	HA	%
Pastizal y cultivos de temporal	113	7.2	648	41.0	761	48.2
Cultivos de temporal	31	1.9	360	22.8	391	24.7
Pastizal	39	8.8	104	6.5	243	15.3
Bosque mixto	67	4.2	43	2.7	110	6.9
Cultivos de riego	0	0.0	44	2.8	44	2.8

-Erosión en cárcavas y pendiente del terreno (tabla 4).

La sobreposición de mapas mostró frecuencia de los rasgos erosivos analizados y las pendientes de alrededor de 3^0 (4-6%). Alrededor del 50% de los casos se encuentran en pendientes de entre 2 y 6% y 67% en pendientes entre 2 y 8%.

Tabla 4. Erosión en cárcavas y pendiente del terreno; frecuencias más importantes

Pendiente del Terreno en %	Superficie erosionada Tipo de Cárcava 1 HA	%	2 HA	%	Total (HA) HA	%
0 - 2	15	1.0	98	6.0	113	7.0
2 - 4	42	2.6	319	20.0	361	22.6
4 - 6	106	6.7	344	21.8	450	28.5
6 - 8	54	3.4	205	12.9	259	16.3
8 - 10	34	2.0	91	5.7	125	7.7
10 - 12	24	1.5	45	2.8	69	4.3
12 - 14	17	1.1	28	1.8	45	2.9
14 - 16	18	1.2	20	1.2	38	2.4
16 - 18	9	0.8	15	1.0	24	1.8

Los resultados obtenidos se explican indirectamente a través de la influencia de la pendiente sobre el tipo de suelo y sobre el uso del mismo. Casi el 90% de los luvisoles están localizados en áreas con pendientes entre 0 y 12% (menos de 7^0) y la agricultura y pastoreo se encuentran igualmente relacionadas a este intervalo de pendientes en su casi totalidad.

Áreas de erosión potencial en cárcavas

La mayor parte de las cárcavas (alrededor del 85%) se presenta en luvisoles y andosoles desarrollados sobre basaltos, lahares y andesitas que se encuentran sujetos a un uso de suelo agrícola o de pastizal.

La modificación en el comportamiento hidrológico de la ladera a través de la influencia antrópica, puede referirse como una causa principal de desequilibrio que ha propiciado la erosión en cárcavas (Bocco, 1989).

Las áreas que satisfacen estas condiciones litológicas, edáficas y de uso del suelo son consideradas áreas de erosión potencial en cárcavas (**figura 2**). La diferenciación del área potencial al desarrollo de cárcavas de acuerdo con el tipo de las mismas se realizó tomando en cuenta información puntual obtenida en campo. Los luvisoles y andosoles relativamente más profundos, se encuentran en las mesetas andesíticas y basálticas con pendientes generalmente menores de 12%, mientras que en áreas de pendiente más abrupta estos mismos suelos son someros; de ello se deduce que la

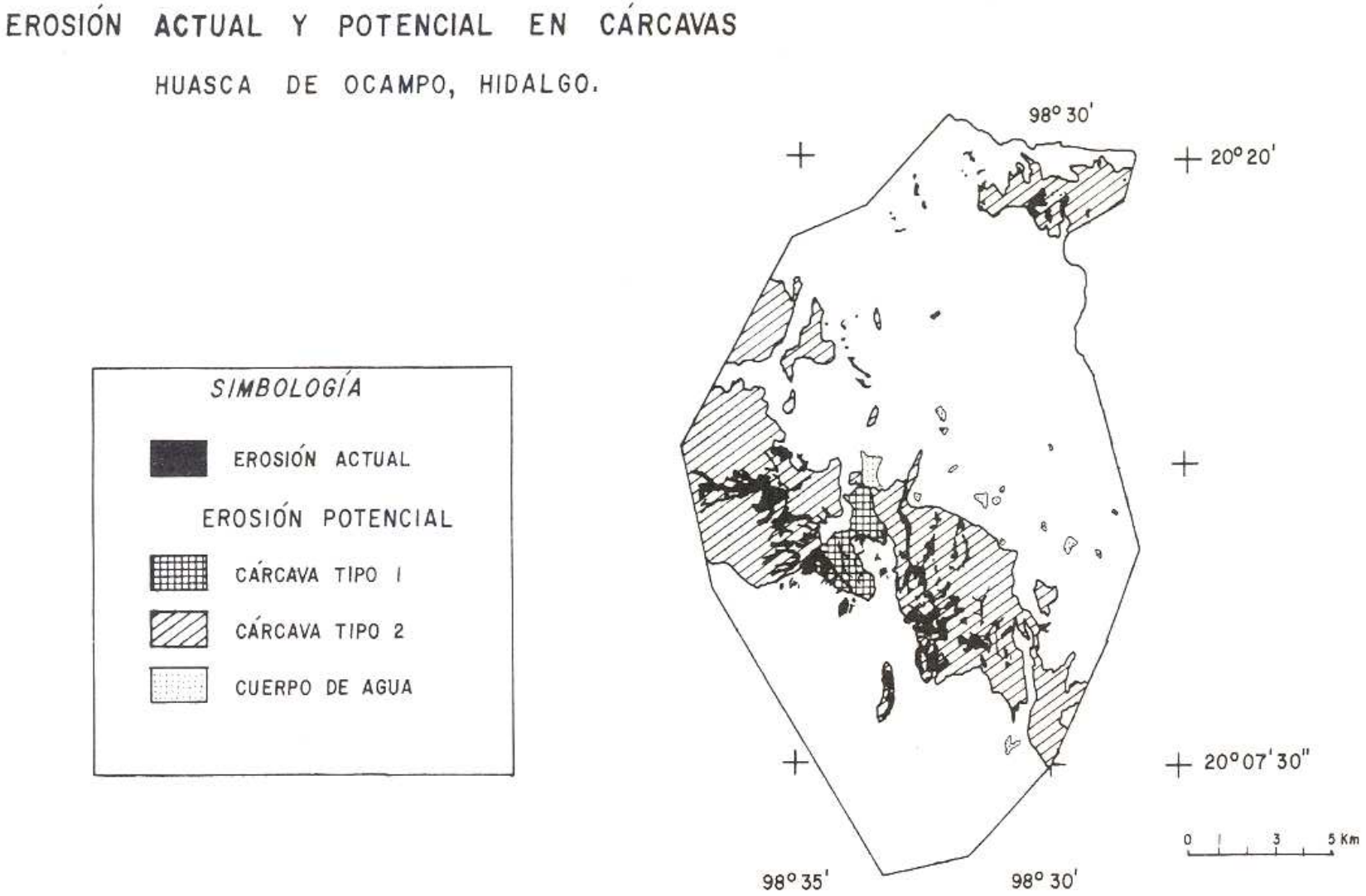

Figura 2. Áreas de erosión potencial como una función de la litología, suelos, cubierta del terreno (uso del suelo y vegetación) y pendiente.

potencialidad a desarrollar cárcavas profundas, del segundo tipo, se limita a la unidad de mesetas con pendientes como la señalada y, las del primer tipo, al resto de las áreas de pendiente más elevada.

El área total con posibilidades de desarrollar cárcavas en función de las variables seleccionadas es de unas 8 400 ha (**tabla 5**); es decir, el 26% del área total del municipio. De dicha cifra, unas 6 850 ha corresponden al tipo de cárcava número 2 y unas 1 550 ha al primer tipo. El área total correspondiente a cárcavas es de unas 1 600 ha (350 ha que corresponden al primer tipo y 1 250 al segundo), menos del 20% del área potencial a la erosión y 5% del área total del municipio.

Tabla 5. Erosión potencial en cárcavas -como una función de la litología, cubierta del terreno y tipo de suelo- y superficie erosionada

Tipo de Cárcava	Área Potencial (HA)	Área Erosionada (HA)
1	1550	350
2	6850	1250
	8400	1600

Conclusiones y recomendaciones

Las variables litología, uso del suelo y tipo de suelo, en su concepción más amplia y consideradas en conjunto, explican alrededor del 85% de las cárcavas actuales en la zona, por lo cual la definición de áreas de erosión potencial en cárcavas es confiable para el municipio estudiado. Toda vez que se trata de variables de fácil acceso, el resultado se considera satisfactorio dentro del marco de un procedimiento expedito que permita establecer las áreas de erosión potencial en cárcavas en la zona de estudio.

Un muestreo de áreas erosionadas para su posterior caracterización puede substituir a la elaboración del mapa general de erosión en cárcavas, el cual fue preparado únicamente para fines de comprobación. Ello permite una simplificación mayor de las tareas a realizar.

Por último la falta de variables e información más específicas no permite la categorización de la potencialidad de erosión, por lo cual todas las áreas con potencial a desarrollar cárcavas se encuentran en el mismo nivel. La información puntual de campo puede en este sentido, contribuir en la definición de dichas categorías.

Referencias bibliográficas

Bocco, G. H. R., *Aspects of antropic erosion of the Tlalpujahua river basin*, Tesis Maestría, ITC Enschede, The Netherlands, 1986.

Bocco, G. H. R., *Gully erosion in the Tlalpujahua river catchment, Central Mexico*, Tesis Doctoral (en preparación), ITC Enschede, The Netherlands, 1989.

Bryan, R. y A. Yair, *Badland geomorphology and piping*, Geobooks, Norwich, 1982.

Campbell, I. A., "Measurements of erosion in badland surfaces", *Z. Geomor.*, Suppl. Bd. 21, Berlín-Stuttgart, diciembre, 1974, pp. 122–137.

Dicknson, W. y R. Rudra, "Identification of soil erosion and fluvial sediment problems", *Hydrol. Processes*, vol. 4, 1986, pp. 111–124.

Donker, N. y M. Damen, "Gully system development and an assessment of gully initiation risk in Miocene deposits near Daroca, Spain", *Z. Geomor.*, Suppl. Bd. 49, 1984, pp. 37 50.

Elwell, H. A., "Modelling soil losses in southern Africa", *J. Agric. Eng. Res.*, núm. 23, 1978, pp. 117–127.

Hudson, N., *Soil conservation*, Cornell University Press, N. Y., 1981.

Imeson, A. C. y F. Kwaad, "Gully types and gully prediction", *Geografisc Tijdschrift*, XIV, núm. 5, 1980, pp. 430–441.

Kirkby, M. J. y R. P. C. Morgan (eds.), *Erosión de suelos*, Limusa, México, 1984.

Knisel, G., "CREAMS; a field scale model for chemical, runoff and erosion from agricultural management system", *USDA*, rep. 26, 1980.

Meyer, L. D. "Evolution of the Universal Soil Loss Equation", *Journal Soil and Water Cons.*, marzo-abril, 1984, pp. 99–104.

Nir, D. y M. Klein, "Gully erosion induced in land use in a semiarid terrain", *Z. Geomor.*, Suppl. Bd. 21, 1974, pp. 191–201.

Palacio, J. L. y L. Vázquez, "Relative importance of modelling processes on badland slopes; an example in central Mexico", *Z. Geomor.* (en prensa), 1990.

Stocking, M. A., "Examination of the factors controlling gully growth" en M. De Boodt y D. Gabriels (eds.), *Assessment of Erosion*, John Wiley and Sons, G. B., 1980.

Thompson, J. R., "Quantitative effect of watershed variables on rate of gully head advancement", *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.*, núm. 7, 1964, pp. 54–55.

USSCS-United States Soil Conservation Service, "A method for estimating volume and rate of runnoff in small watersheds", *USDA*, rep. núm. TP–149, 1973.

Valenzuela, C. R., "ILWIS overview", *ITC Journal*, 1988-1, pp. 3–14.

Wischmeier, W. y D. Smith, "Predicting rainfall losses; a guide to conservation planning", *USDA*, Handbook, núm. 537, 1978.

Yair, A. *et al.*, "Runoff and erosion processes and rates in the Zin Valley Badlands, Nothern Negev, Israel", *Earth Surf. Proc.*, vol. 5, John Wiley and Sons, 1980, pp. 205–225.