

Escenarios de erosión bajo diferentes manejos agrícolas en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México

Recibido: 2 de octubre de 2007. Aceptado en versión final: 11 de junio de 2008.

Miguel Bravo Espinosa*

Manuel E. Mendoza Cantú**

Lenin E. Medina Orozco***

Resumen. La erosión hídrica, la desecación y pérdida de áreas y volúmenes de los lagos son problemas severos en las cuencas cerradas del Sistema Volcánico Transversal. Este deterioro comienza a extenderse a la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, en la cual se encuentra uno de los pocos lagos mexicanos de aguas casi prístinas; por ello, es urgente plantear estudios que ofrezcan bases para un manejo sostenible de los recursos naturales que beneficie a los distintos usuarios del lago y de la cuenca. El objetivo de este trabajo fue predecir la erosión hídrica asociada a sistemas de manejo agrícola considerando tres tipos de labranza (tradicional, mínima y de conservación) en la cuenca del lago de Zirahuén.

La predicción se realizó aplicando la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS) dentro del contexto de un sistema de información geográfica. Los resultados indicaron que el uso de la labranza de conservación en las áreas agrícolas de la cuenca, reduciría las pérdidas de suelo a menos de $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en toda el área agrícola de la cuenca, y probablemente se disminuiría la contaminación por arrastre de sedimentos en el lago de Zirahuén.

Palabras clave: Manejo de cuencas, sistemas de labranza, Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo.

Soil erosion scenarios under different agronomic managements in the Zirahuén Lake Basin, Michoacán, Mexico

Abstract. Main problems in endorheic watersheds of the Volcanic Belt of Mexico are soil erosion, lake dissection, and losses of both water-areas and water-volumes. This degradation begins to occur in the Zirahuén Lake watershed, which is one of the few Mexican lakes of clean non polluted water. Thus, it is necessary to carry out studies which provide bases for sustainable natural resources management by lake and basin stakeholders. The main objective of this study was to predict soil erosion for different cropland systems considering three tillage intensities (traditional, minimum and the conservation tillage) in the Zirahuén Lake water-

shed. For this evaluation it was applied the Universal Soil Loss Equation (USLE) linked to a geographical information system (GIS). Results suggested that the use of the conservation tillage could reduce soil losses to less than $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ in all cropland within the basin; this improved farming practice will probably reduce the sediment discharge to the Zirahuén Lake.

Key words: Watershed management, tillage systems, Universal Soil Loss Equation.

* Campo Experimental Uruapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Av. Latinoamericana No. 1101, 60500, Uruapan, Michoacán, México. E-mail: bravo.miguel@inifap.gob.mx

** Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México. E-mail: mmendoza@ciga.unam.mx

*** Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. B4, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México. E-mail: leninmed@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica y la desecación, que conllevan a la pérdida de áreas y volúmenes de los lagos, son problemas severos en las cuencas cerradas del Sistema Volcánico Transversal. Entre las principales causas de la pérdida de suelo por erosión se han mencionado a la deforestación, el sobrepastoreo y el uso de prácticas de cultivo inadecuadas en la agricultura de ladera, y entre las causas de la desecación se encuentra la sobreexplotación de acuíferos y la pérdida de agua por fallamiento (Challenger, 1998; Bernal Brooks y MacCrimmon, 2000a; Mendoza *et al.*, 2002; Garduño *et al.*, 2006). En Michoacán, la erosión del suelo es el mayor problema de degradación del suelo, pues ocurre en el 55% de la superficie del estado, ocasionando disminución de la productividad y el incremento en los costos de producción, lo cual contribuye a la pobreza y marginación de los agricultores de pequeña escala. Para algunas regiones, como la cuenca del lago de Pátzcuaro, existen estudios que muestran que el proceso erosivo del suelo causado por el hombre pudo haberse iniciado hace 2 300 años, que se mantuvo esta degradación en los siglos XVI y XVII, y que en los últimos 50 años se presenta con mayor intensidad abarcando una mayor extensión (Street Perrott *et al.*, 1989; Caballero *et al.*, 1992; Ohara *et al.*, 1993; Tiscareño *et al.*, 1999; Metcalfe *et al.*, 2005). Actualmente, el tipo de desarrollo turístico y la agricultura tradicional contribuyen a la degradación del suelo en la cuenca del lago de Zirahuén (Davies *et al.*, 2004), uno de los pocos lagos mexicanos de aguas casi prístinas, por lo que es urgente un manejo sostenible de los recursos naturales que beneficie a los distintos usuarios del lago y de la cuenca.

En la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, subsisten 31 comunidades que cultivan alrededor de 20 mil hectáreas, principalmente con maíz (Aleman *et al.*, 2007), cuyo cultivo inició hace 2 300 años de acuerdo con restos de polen encontrados (Metcalfe *et al.*, 2006). Esta cuenca presenta un relieve de montañas y lomeríos que abarcan más de 60% del área (Bocco y Mendoza, 1999). En estos escenarios se combinan la producción de maíz y el libre pastoreo de ganado en el sistema conocido

como *año y vez*. De acuerdo con estudios realizados en lotes de escurrimiento, en un ciclo agrícola se pierden más de 3 t ha⁻¹ de suelo (Bravo *et al.*, 2005) y la productividad del sistema tradicional es de 1.4 t ha⁻¹ de grano de maíz (Álvarez *et al.*, 1993; Astier *et al.*, 2000). En el año de descanso, por la combinación de texturas finas, procesos de consolidación natural del suelo, así como el pisoteo de los animales durante el pastoreo, se reduce la entrada del agua al suelo, y con ello, los eventos de lluvia intensos generan volúmenes de escurrimiento superficial con capacidad para desprender y transportar partículas de sedimento. Por lo anterior, se asume que volúmenes significativos de suelo se erosionan de las partes altas y medias de la cuenca, éstos se transportan a las partes bajas y de manera recurrente se depositan en el lago ocasionando su azolvamiento y contaminación. Bernal-Brooks y MacCrimmon (2000b) estimaron que durante el periodo 1987-1995, las descargas de sedimento que transportó el río La Palma, que fluye al lago de Zirahuén, modificaron la morfometría del fondo del lago, alcanzando una tasa de sedimentación de 1.4 m año⁻¹ en la porción este, próxima a la desembocadura, y de 0.03 m año⁻¹, en la parte más profunda del lago.

Recientemente, Davies *et al.* (2005) realizaron un estudio basado en registros paleolimnológicos para inferir impactos antrópicos en la cuenca del lago de Zirahuén durante los últimos 500 años. Concluyeron que la cuenca es muy sensible a la actividad humana cuyo impacto se refleja en el lago, el cual gradualmente tiende a la eutrofización; en las columnas de suelo colectadas en el fondo del lago identificaron un estrato superior de 5 cm constituido por limos rojizos, que al parecer son producto reciente (últimos 20 años) de la erosión de suelos rojos adyacentes al lago. Estos autores sugirieron implementar prácticas de conservación de suelos para reducir la contaminación de los recursos hídricos de la cuenca.

Durante varias décadas la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS) se ha utilizado para planear el uso del suelo y para diseñar medidas de conservación del suelo que mantengan la productividad de la tierra y que prevengan la contaminación de cuerpos de agua. La EUPS es un modelo empírico

multifactorial que predice la pérdida promedio anual de suelo, resultado de la erosión y deposición, en segmentos de una pendiente, pero no de aquellos sedimentos que ingresan a un cauce ni los que se originan en una cárcava (Wischmeier y Smith, 1978; Figueroa *et al.*, 1991; Nearing *et al.*, 1994; Renard *et al.*, 1996). La aplicabilidad de la EUPS a una región o zona de estudio está limitada por la disponibilidad de bases de datos representativos de cada factor de la ecuación, por ello son relativamente escasos los estudios que reportan su aplicación en México (Meyer, 1984; Flores *et al.*, 2002). Su expresión matemática es multifactorial (Wischmeier y Smith, 1978; ecuación 1):

$$A = R K (L S) C P \quad (1)$$

donde A = es la estimación promedio anual de pérdida de suelo (MG ha⁻¹);

R = factor de erosividad anual de la lluvia [M] mm (ha hr)⁻¹;

K = factor de erosionabilidad del suelo [Mg ha hr (ha Mj mm)];

LS = factor topográfico (adimensional);

C = factor de manejo y cobertura (adimensional);

P = factor de prácticas mecánicas de conservación (adimensional).

Para evaluar y solucionar problemas en la conservación del suelo y agua, en los últimos veinte años se han documentado avances significativos en la aplicación de la Percepción Remota (PR) y los sistemas de información geográfica (SIG). Los factores que han acelerado estas aplicaciones son el perfeccionamiento y la mayor oferta de productos de PR y herramientas SIG, disponibilidad de bases digitalizadas de información, cartografía e inventarios en diferentes temas y formatos, y la mayor demanda de productos que faciliten el análisis y manejo espacio-temporal de los recursos naturales (Mellerowics *et al.*, 1994). El enfoque metodológico que integra la EUPS con la PR y los SIGs para la predicción de la erosión a una escala regional o de cuenca se ha utilizado ampliamente en diversos países del mundo (Spanner *et al.*, 1982; Warren *et al.*, 1989; Blaszczynski, 1992; Mellerowics *et al.*,

1994; Mongkolsawat *et al.*, 1994; Molnar y Julien, 1998; Mati, *et al.*, 2000; Shi, *et al.*, 2002; Bhattarai y Dutta, 2007). Pero en México, el desarrollo de esta línea de investigación es incipiente (Amador, 2000; Tiscareño *et al.*, 1999; Flores *et al.*, 2002). En el área agrícola de la cuenca de Zirahuén se han realizado estudios sobre pérdidas de suelo bajo diferentes prácticas de producción agrícola (Bravo *et al.*, 2005) y estudios de erosión integrando la EUPS con un SIG (Denny, 2001). Sin embargo, no existen estudios que incluyan datos de campo locales sobre diferentes prácticas de cultivo para la integración de la EUPS en un SIG.

El objetivo de este trabajo fue predecir la erosión hídrica asociada a tres sistemas de labranza en las áreas agrícolas de la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán; para ello se consideraron datos de experimentos de campo locales y la implementación de la EUPS en un SIG.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

Este trabajo se realizó en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, la cual se localiza en la provincia fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal (19° 21' 14" – 19° 29' 32" N y 101° 30' 33" - 101° 46' 15" O; Figura 1). La cuenca cubre aproximadamente 260 km² con elevaciones que varían de 2 080 msnm, registrada en el vaso del lago, a 3 280 m en el cerro El Frijol. La cuenca es de tipo endorreico con una red hidrológica centrípeta cuyos flujos tanto superficial como subsuperficial son drenados por el arroyo La Palma, también conocido como arroyo El Silencio, que se origina en la porción este de la cuenca y que desemboca en el lago de Zirahuén. Esta cuenca se ubica en la región del vulcanismo monogenético del Corredor Tarasco. Es un vulcanismo del Plioceno-Cuaternario con un paisaje de sierras y llanos intermontanos. La estructura litológica está constituida en su mayor parte por basalto y otras rocas ígneas extrusivas (Garduño, 1999). En la cuenca los diferentes suelos y sus propiedades hidrológicas están estrechamente asociados con la litología que les dio origen. Los suelos "tupuris" o Andosoles, derivados de cenizas



Figura 1. Ubicación del área en estudio.

volcánicas, cubren el 70% de la cuenca, y Litosoles, Feozems y Luvisoles el 30% restante. El clima es templado subhúmedo con una precipitación media anual de 900 mm, concentrada durante junio a noviembre, y una temperatura media anual de 16^o C. La producción agrícola y pecuaria ocurre en el 64% del área total de la cuenca, mientras que la forestal abarca el 30%. En la cuenca habitan 32 892 personas distribuidas en 31 asentamientos, de los cuales dos concentran el 62% del total de habitantes. El 24% de la Población Económicamente Activa (PEA) se ubica en el sector primario, mientras que el 32% obtiene su ingreso por la venta de servicios (INEGI, 2000).

Estimación de los factores de la EUPS

Factor erosividad de la lluvia. La erosividad de la lluvia se determinó con base en registros de tres estaciones climatológicas del área Pátzcuaro-Zirahuén (Cuadro 1); las bases de datos de Zirahuén y Pátzcuaro fueron extraídas de registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y la de Santa Isabel de Ajuno, de los archivos del Campo Experimental Uruapan-INIFAP. Con el uso de la ecuación obtenida por Figueroa *et al.* (1991) para la Región V, se estimó el factor R en función de la precipitación media anual; la ecuación aplicada fue la siguiente:

$$Y = 3.4880X - 0.000188X^2 \quad R^2 = 0.94 \quad (2)$$

donde Y= valor anual del índice EI₃₀ (MJ mm ha¹ hr⁻¹) y X= lluvia media anual (mm).

Factor erosionabilidad del suelo. El factor K se estimó a partir de la textura superficial usando la metodología de la FAO para las diferentes unidades o asociaciones de suelos presentes en la cuenca (*Ibid.*).

Factor topográfico. El factor combinado LS se calculó con el algoritmo propuesto por Toxopeus (1997); L se determinó con la siguiente ecuación:

$$L = 0.4 * S + 40 \quad (3)$$

donde L es el factor de longitud de la pendiente (m) y S es la inclinación de la pendiente (%) para cada celda, calculada a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT).

Cuando las pendientes tuvieron una inclinación menor o igual a 21%, el factor combinado LS se calculó con la siguiente expresión:

Cuadro 1. Precipitación media anual en tres estaciones climatológicas del área Pátzcuaro-Zirahuén, Michoacán

Estación	Periodo	Altitud (msnm)	Precipitación media anual (mm)
Zirahuén	1948-2002	2124	1 180.0
Santa Isabel de Ajuno	1996-2000	2200	834.3
Pátzcuaro	1969-1992	2043	905.6

$$LS = (L/72.6) * (65.41 * \sin(S) + 4.56 * \sin(S) + 0.065) \quad (4)$$

Y cuando la inclinación de la pendiente fue mayor a 21% se aplicó la ecuación:

$$LS = (L/22.1)^{0.7} * (6.432 * \sin(S^{0.79}) * \cos(S)) \quad (5)$$

donde LS es el factor de pendiente; L y S ya fueron definidas.

Factor prácticas de manejo y cobertura. A partir de la interpretación visual de un compuesto en falso color realzado, elaborado a partir de la imagen de satélite (*Landsat* para el año 2003) y recorridos de campo, se construyó un mapa de cobertura y uso del suelo de la cuenca. El factor C se determinó despejando C de la EUPS y conociendo los valores anuales de pérdida de suelo obtenidos por Tiscareño *et al.* (1999) y Bravo *et al.* (2005) en lotes con 8 y 18% de pendiente, respectivamente; es decir:

$$C = A/RKLS \quad (6)$$

$$C(LT) = 3.2/2998.68 * 0.013 * \underline{2.63} * 1 = 0.0312$$

$$C(LM) = 2.6/2998.68 * 0.013 * \underline{2.63} * 1 = 0.0253$$

$$C(LC) = 0.3/2998.68 * 0.013 * \underline{2.63} * 1 = 0.0029$$

donde LT, LM y LC son los sistemas de labranza tradicional, labranza mínima y labranza de conservación, respectivamente.

Una vez obtenidos los mapas de valores de pérdida de suelos, y considerando el carácter empírico del modelo USLE, se decidió reclasificar los mapas en clases baja (< 3 t ha⁻¹ año⁻¹), media (3 - 5 t ha⁻¹ año⁻¹) y alta (> 5 t ha⁻¹ año⁻¹) de pérdida de suelo. Este procedimiento permitió manejar el nivel de precisión obtenido de un cálculo basado en un modelo empírico; es decir, incrementar la exactitud del análisis al ingresar a un dominio semicuantitativo.

En la cuenca de Zirahuén se practica el sistema de manejo denominado *año y vez*, que consiste

en cultivar la tierra con arado un año, dejándola después para el pastoreo de ganado durante un periodo de uno a tres años. En cada año se deja en descanso aproximadamente el 60% de las tierras agrícolas (Astier *et al.*, 2000). El cultivo principal es el maíz, solo o asociado con frijol. La labranza tradicional para el cultivo de maíz (LT) incluye un barbecho, cruza, surcado y dos labores de cultivo. Recientemente se ha observado que los productores tienden a eliminar las labores de cultivo y adoptar el control químico de la maleza más la aplicación de fertilizantes en dosis no limitativas de nitrógeno y fósforo; a este sistema que no incluye las labores de cultivo, se le denomina labranza mínima (LM). Además de LT y LM, en este trabajo se consideró evaluar el uso de la labranza de conservación (LC) en las áreas agrícolas, con base en los resultados obtenidos por Tiscareño *et al.* (1999) y Bravo *et al.* (2005). La LC se refiere a un sistema que mantiene cuando menos el 33% de la superficie del suelo cubierta con residuos de maíz después de la siembra, lo cual se logra con aproximadamente 3 t ha⁻¹ de residuos (Velázquez *et al.*, 2002). La siembra se hace con arado de espuela para tracción animal y el control de la maleza mediante la aplicación de herbicidas.

Esquema de integración de la EUPS a un SIG

El SIG utilizado en este trabajo fue el *Integrated Land and Water Management Information System* (ILWIS, 1997). Las bases de datos cartográficas en formato vectorial de los distintos temas requeridos para la evaluación fueron convertidas a un formato de celdas, con un tamaño de 10 por 10 m; cuando se obtuvieron todos los factores se procedió a realizar la multiplicación de las bases de datos aplicando álgebra de mapas, a fin de estimar la pérdida de suelo.

RESULTADOS

El Cuadro 2 y la Figura 2 presentan la distribución de las diferentes categorías de cobertura y uso del suelo en la cuenca del lago de Zirahuén. Los principales usos son en orden decreciente: agrícola, que se realiza en el 44.4% de la cuenca, y el forestal que

abarca el 51% de la misma. Estos usos del suelo siguen un patrón de mosaico fragmentado.

Dado el carácter empírico del modelo EUPS, se decidió elaborar un mapa de clases que se pudiera comparar con dos escenarios alternos al de manejo tradicional que se realiza en el área agrícola de la cuenca del lago de Zirahuén. El escenario con la distribución espacial de las pérdidas de suelo bajo la tecnología tradicional, que no incluye ninguna práctica mejorada de conservación del suelo, se muestra en la Figura 3; en el Cuadro 3 se presentan las superficies para las tres clases de erosión consideradas con base en los resultados de pérdidas de suelo obtenidas en lotes de escurrimiento. De acuerdo con las pérdidas de suelo estimadas con la EUPS para dicho manejo tradicional, en casi el 98% de la superficie agrícola de la cuenca, las pérdidas de suelo están por debajo de la tasa de erosión permisible de $2.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ bajo estas condiciones ambientales (Alexander, 1988).

La Figura 4 muestra la distribución de la erosión asumiendo la aplicación en toda la cuenca de las prácticas de conservación (LM) para la producción de maíz. El Cuadro 3 presenta los cambios que ocurrirían en la superficie cultivada con maíz, y con ello las pérdidas de suelo, si la agricultura tradicional se complementara con este tipo de prácticas. Este cambio conllevaría la eliminación de la clase alta de pérdidas de suelo en una superficie muy pequeña (0.44 km^2), que representa $< 1\%$. Su

impacto sería principalmente en la clase de erosión media que pasaría a formar parte de la clase de pérdida de suelo baja en un área de 9.7 km^2 , que abarca el 7.7%.

En la Figura 5 se muestra el escenario para las pérdidas de suelo bajo la alternativa de la labranza de conservación (LC), consistente en remover el suelo sólo con dos pasos de arado (barbecho y surcado) y dejar una cobertura de residuos de cosecha (33%) sobre la superficie del suelo durante la mayor parte del año. Este sistema de manejo del suelo aumenta la rugosidad superficial, incrementa la infiltración del agua y disminuye el arrastre de sedimentos al lago. Con este sistema se eliminarían las clases media y alta de pérdidas de suelo en la cuenca, es decir, habría un escenario con una erosión permisible del suelo en toda el área agrícola de la cuenca. Los principales beneficios de este cambio serían la reducción del arrastre de sedimentos y la disminución de nutrimentos que van adsorbidos a las partículas de suelo, principalmente fósforo y amonio, evitando con ello la eutrofización del lago de Zirahuén.

DISCUSIÓN

La problemática relacionada con la pérdida de suelo tiene una dimensión territorial, debido a que los atributos requeridos para su análisis tienen una distribución en el espacio geográfico que permite la integración de modelos empíricos con los siste-

Cuadro 2. Cobertura y uso del suelo en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán

Uso	Área (km ²)	Área (%)
Bosque de encino	8.9	2.9
Bosque de pino	4.1	1.3
Bosque de pino-encino	125.2	40.4
Bosque mesófilo de montaña	19.5	6.3
Agricultura tradicional de temporal	137.7	44.4
Asentamientos humanos	4.1	1.3
Lago	7.2	2.3
Total	310.1	100

Cuadro 3. Superficie por rango de tasa de pérdida de suelo para tres sistemas de labranza

Pérdidas de suelo (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Manejo labranza tradicional (LT) (km ²)	Manejo labranza mínima (LM) (km ²)	Manejo labranza de conservación (LC) (km ²)
Baja (< 3.0)	109.25	118.95	126.17
Media (3.0-5.0)	13.62	4.36	0
Alta (> 5.0)	3.30	2.86	0

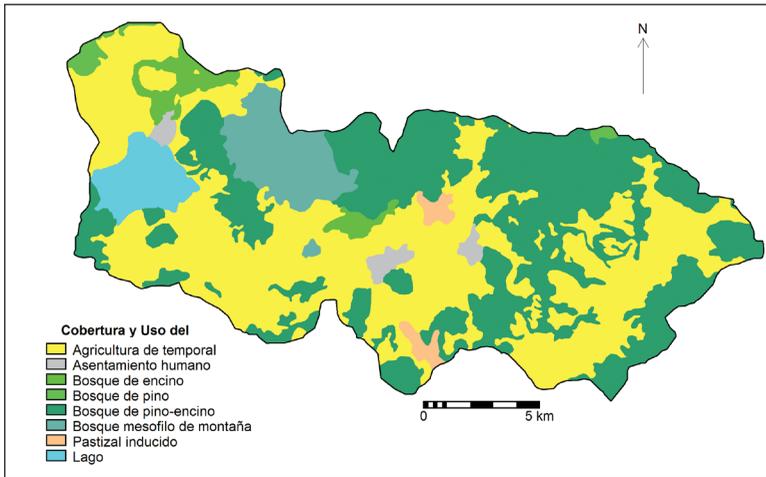


Figura 2. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de la cuenca de Zirahuén (2003).

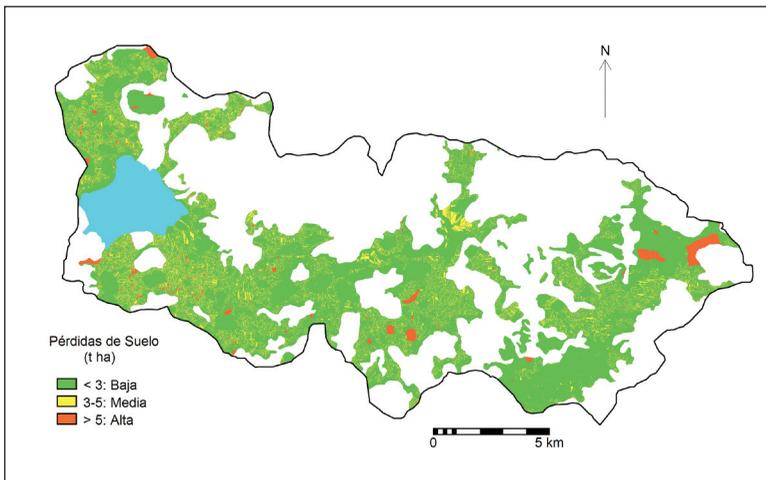


Figura 3. Mapa de pérdidas de suelo bajo un manejo tradicional (LT) de producción de maíz en la cuenca de Zirahuén, Michoacán.

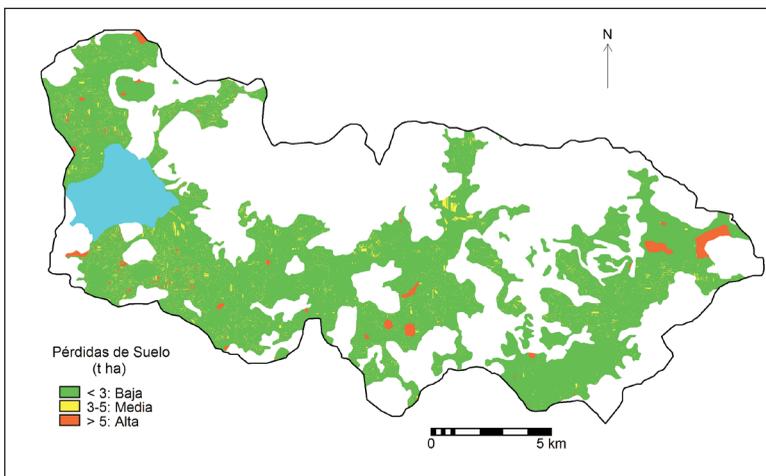


Figura 4. Mapa de pérdidas de suelo bajo un manejo de labranza mínima (LM) para la producción de maíz en la cuenca de Zirahuén, Michoacán.

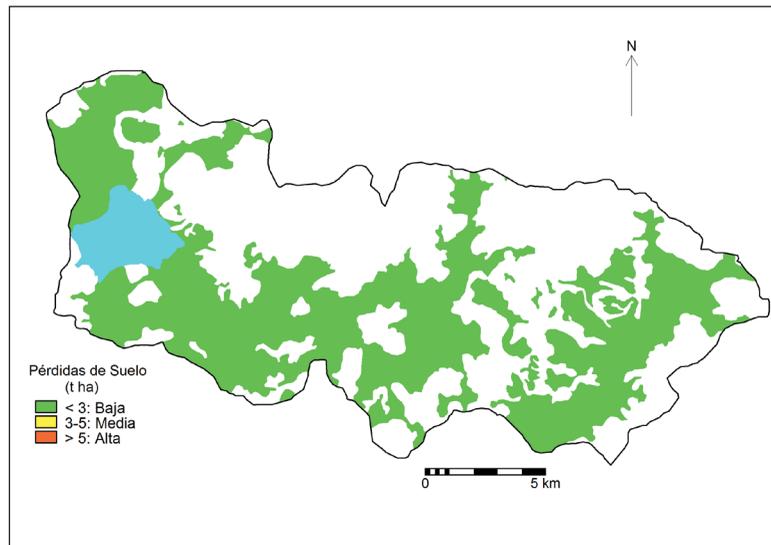


Figura 5. Mapa de pérdidas de suelo bajo un manejo de labranza de conservación (LC) para la producción de maíz en la cuenca de Zirahuén, Michoacán.

mas de información geográfica. Sin embargo, se reconoce que los resultados incrementan la incertidumbre cuando se considera toda el área de la cuenca, como lo documentó Bhatturai y Dutta (2007). Para reducir la incertidumbre asociada a los datos de entrada, principalmente meteorológicos, es recomendable la reclasificación de los mapas de valores. Aun cuando la cuenca del lago de Zirahuén es relativamente pequeña, en este trabajo se usó un esquema que incluyó: *a*) clasificar la erosión en tres clases considerando el concepto de pérdida permisible de suelo (Alexander, 1988; Sparovek y DeMaría, 2003) y de los resultados obtenidos en parcelas experimentales, y no estrictamente de un estudio de laderas en la cuenca, y *b*) comparar tres sistemas productivos que se evaluaron experimentalmente en parcelas de productores cooperantes de la cuenca.

La aplicación de metodologías asociadas al modelo de erosión EUPS en la cuenca del lago de Zirahuén arrojó tasas de erosión bajas. Resultados similares fueron reportados en un estudio de laderas en Oaxaca, por Martínez *et al.* (2007), quienes documentaron pérdidas de suelo menores de $1.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, utilizando lotes de escurrimiento tipo Wischmeier en terrenos agrícolas con 60% de pendiente. En un estudio realizado por Medina (2006) en una cuenca ubicada en el Sistema Volcánico Transversal, se midieron en lotes de escurri-

miento de $1\ 000 \text{ m}^2$, pérdidas de suelo menores de $2.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Es necesario reconocer que la escala espacial que usan las metodologías convencionales de medición de la erosión, es menor que la escala que maneja un productor, y que la erosión del suelo es dependiente de la escala; Osterkamp y Toy (1997) mostraron estas relaciones. Por ejemplo, para evaluar los procesos de erosión que ocurren en cárcavas o en cauces naturales se requiere trabajar en áreas mayores de $10\ 000 \text{ m}^2$. De acuerdo con la experiencia de campo de los autores de este trabajo, la erosión en cárcavas efímeras, cárcavas permanentes y cauces naturales, son fuentes que generan probablemente la mayor producción de sedimentos en las cuencas del Centro de México, por lo que es necesario realizar estudios de erosión en cárcavas y cauces.

La modelación de la erosión con manejo tradicional (LT) mostró que la erosión severa (clase alta) se encuentra espacialmente dispersa, pero formando pequeños núcleos; en contraste, la erosión media presentó una distribución altamente dispersa, pero sin concentración en núcleos (Figura 3). Cuando se modeló bajo el manejo de labranza mínima (LM), la erosión no modificó las áreas con erosión alta, pero sí disminuyó el área con erosión media (Figura 4). Finalmente, bajo una modelación con un manejo de labranza de conservación (LC), las áreas con erosión alta fueron prácticamente

eliminadas (Figura 5); estos cambios en las clases de erosión sugieren que aquellas zonas donde persistió la erosión alta, bajo un manejo con LM, serán las áreas que requieren de mayor protección por encontrarse en zonas de ladera con longitudes y gradientes no aptos para la actividad agrícola con manejo tradicional. En estas áreas será necesario impulsar la labranza de conservación y el uso de barreras vivas entre los productores. Para ello, se deberá continuar con la ventana ya explorada en la cuenca, sobre la investigación participativa que co-definan las estrategias de conservación de suelos más apropiadas (Alemán *et al.*, 2007).

El cultivo de maíz en la cuenca del lago de Zirahuén es una actividad que se remonta a más de 2 300 años (Metcalf *et al.*, 2005) y actualmente ocupa el 45% de la cuenca; las prácticas de labranza tradicional que se emplean en esta cuenca para producir maíz son erosivas, por lo que el azolve del lago dependerá en gran medida de los cambios en los sistemas de labranza que se apliquen en las áreas agrícolas de la cuenca. El riesgo de eutrofización del lago, en este caso derivado de los cultivos agrícolas por la adición de fosfatos y nitratos, provenientes del escurrimiento de los fertilizantes, y de estiércoles de las áreas de pastoreo, también puede ser un problema grave para este lago. Considerando las diferentes ventajas que se han documentado para la labranza de conservación, ésta es una tecnología que beneficia al productor, y que protege el ambiente si se reduce el uso de herbicidas en este sistema a través de un programa de control de malezas que incluya la rotación de cultivos (FAO, 2002).

Para vislumbrar la factibilidad de que los agricultores de la cuenca de Zirahuén adopten la labranza de conservación, se revisará brevemente una experiencia local. En 1998 se inició la transferencia de la tecnología de labranza de conservación en el cultivo de maíz, en la cuenca del lago de Pátzcuaro, con la participación de técnicos que apoyaron la difusión de la tecnología. El modelo de transferencia fue el denominado productor-experimentador (Valdivia y Villarreal, 1998), a través de la formación de grupos liderados por productores innovadores y por técnicos. Una innovación importante que usan los productores participantes es utilizar arvenses y pastos nativos como cobertura al suelo,

dejando los rastrojos de maíz para la alimentación del ganado. La adopción de esta tecnología ha sido modesta, pues se estima que se aplica en 2 000 ha en la cuenca del lago de Pátzcuaro. Con base en lo anterior, para promover la labranza de conservación en la cuenca de Zirahuén se requerirá mejorar varias condiciones como son: seguir el principio de “adaptar, no adoptar”, porque los principios son más universales que las tecnologías, por ello, a través de talleres y ejercicios consensuados se deben identificar los principios que pueden adaptarse a las situaciones locales, aumentar la movilidad y un mayor grado de participación comunitaria, incrementar la disponibilidad de forrajes, facilitar el acceso a sembradoras para labranza mínima, mejorar la oferta de insumos, y aumentar el uso de estiércoles; es decir, se requerirá de una estrategia que considere factores socioeconómicos, tecnológicos, y de mayores apoyos de asistencia técnica y créditos (Lal, 2007).

Otro escenario que merece alguna reflexión es el siguiente. Históricamente se ha documentado que el deterioro de las cuencas del Centro de México, como la del lago de Pátzcuaro, se detonó por un cambio drástico de la cobertura natural de la cuenca, originado éste por un gran crecimiento de los asentamientos humanos; sin embargo, no fue la actividad agrícola *per se* la causante de la degradación, sino el abandono de tierras a gran escala, que ocurrió durante la conquista (Fisher, 2005; Fisher *et al.*, 2003). Para el caso de la cuenca de Zirahuén, el cambio de uso de la tierra ha ocurrido en cerca de 50% del área total. En estas áreas el abandono de tierras no es alarmante; sin embargo, cada vez es más frecuente que la actividad agrícola la realicen agricultores de la tercera edad, debido a la emigración de los jóvenes (Alemán *et al.*, 2007); quizá por esta razón, en un futuro cercano, las tierras abandonadas podrían incrementar su área en esta cuenca.

CONCLUSIONES

La aplicación del enfoque EUPS-SIG para tres sistemas de producción de maíz de temporal en las áreas agrícolas de la cuenca del lago de Zirahuén,

Michoacán, sugirió que los escenarios de pérdidas de suelo pueden modificarse si se cambian los sistemas de labranza para la producción de maíz, el cual se practica en el 45% de la superficie total de la cuenca. Las pérdidas de suelo asociadas al manejo tradicional son en general moderadas, sin embargo, el uso de la labranza de conservación, esto es aplicar un laboreo mínimo complementado con el uso de residuos de cosecha, puede reducir las pérdidas de suelo a menos de 3.0 t ha⁻¹ año⁻¹ en toda la superficie agrícola de la cuenca, lo cual reduciría el aporte de sedimentos al lago de Zirahuén. Se sugiere evaluar la producción de sedimentos en cauces y cárcavas de la cuenca del lago de Zirahuén.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación Produce Mich AC por los apoyos brindados al proyecto: “Potencial de barreras vivas y labranza de conservación en suelos de ladera”, del cual derivó este trabajo; asimismo, agradecemos los comentarios emitidos por dos árbitros anónimos que mejoraron la versión final de este material.

REFERENCIAS

- Alemán, M. S., C. Flora, C. Sánchez, R. Sánchez, L. Fregoso, G. Barrera y M. Cepeda (2007), “Involucramiento de ejidatarios y científicos en la investigación y manejo de la cuenca del Lago de Zirahuén, Michoacán”, en Sánchez Brito, C., M. Bravo Espinosa y L.E. Fregoso Tirado (eds.), *Avances de Investigación en Agricultura Sostenible IV: Bases Metodológicas para el Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas*. INIFAP, Campo Exp. Uruapan, Michoacán, México.
- Alexander, E. B. (1988), “Rates of soil formation: implications for soil-loss tolerance”, *Soil Sci.*, no. 145, pp. 37-45.
- Álvarez Icaza, P., G. Cervera, C. Garibay, P. Gutiérrez y F. Rosete (1993), *Los umbrales del deterioro. La dimensión ambiental de un desarrollo desigual en la región Purhépecha*, Fundación Friedrich Ebert Stiftung, México.
- Amador, G. A. (2000), *Simulación dinámica del impacto ambiental por actividades agrícolas en la cuenca de Pátzcuaro, Michoacán*, tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Astier, M., E. Pérez, F. Mota, O. Masera y C. Alatorre (2000), “El diseño de sistemas sustentables de maíz en la región Purhépecha”, en Masera, O. y S. López-Ridaura (eds.), *Sustentabilidad y Sistemas Campesinos: cinco experiencias de evaluación en el México rural*, GIRA, PUMA, Mundi-Prensa, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Bernal Brooks, F. W. and H. R. MacCrimmon (2000a), “Lake Zirahuén (Mexico): a pristine natural reservoir visually insensitive to expected cultural eutrophication”, in Munawar, M. et al. (eds.), *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*, Backhuys Pu., Leiden, The Netherlands.
- Bernal Brooks, F. W. and H. R. MacCrimmon (2000b), “Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs”, in Munawar, M. et al. (eds.), *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*, Backhuys Pu., Leiden, The Netherlands.
- Bhattarai, R. and D. Dutta (2007), “Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS at catchment scale”, *Water Resources Management*, no. 21, pp. 1635-1647.
- Blaszczyński, J. (1992), “Regional soil loss prediction utilizing the RUSLE/GIS interface”, in Johnson, A. I. (ed.), *Geographic Information System (GIS) and Mapping-Practices and Standards ASTM*, STP 1126, ASTM, Philadelphia.
- Bocco, G. y M. E. Mendoza (1999), “La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo”, en Garduño Monroy, V. H., P. Corona Chávez, I. Israde Alcántara, L. Menella, E. Arreygue, B. Bigioggero y S. Chiesa (eds.), *Carta Geológica de Michoacán*, escala 1:250 000, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Bravo Espinosa, M., J. Ruiz Vega y V. Volke H. (2005), “Cultivo de maíz en sistemas de labranza con barreras biofísicas en Andosoles de ladera”, *TERRA Latinoamericana* 23(3), pp. 371-380.
- Caballero, J., N. Barrera-Bassols y C. Mapes (1992), “La vegetación terrestre”, en Toledo, V. M., P. Álvarez Icaza y P. Ávila (eds.), *Plan Pátzcuaro 2000: Investigación multidisciplinaria para el desarrollo sostenido*, Fundación Friedrich Ebert Stiftung, México, pp. 71-90.

- Challenger, A. (1998), *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Davies, S. J., S. E. Metcalfe, A. B. MacKenzie, A. J. Newton, G. H. Endfield and J. G. Farmer (2004), "Environmental changes in the Zirahuén Basin, Michoacán, Mexico, during the last 1000 years", *Journal of Paleolimnology*, 31(1), pp. 77-98.
- Davies, S. J., S. E. Metcalfe, F. Bernal Brooks, A. Chacon Torres, J. G. Farmer, A. B. MacKensie and A. J. Newton (2005), "Lake sediments record sensitivity of two hydrologically closed upland lakes in Mexico to human impact", *Ambio*, 34(6), pp. 470-475.
- Denny, S. C. (2001), *Modelling soil erosion potential in the Zirahuén catchment, Michoacán, Mexico* [http://www.geo.edu.ac.uk/manuscripts/runquery/diss_abstract/MSCOO115: 15 de octubre de 2004].
- FAO (2002), *Agricultura de conservación. Estudio de casos en América Latina*, Boletín de Suelos de la FAO 78, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.
- Figuroa, S., B., A. Amante O., H. G. Cortés T., J. Pimentel L., E. S. Osuna C., J. M. Rodríguez O., F. J. y F. Morales (1991), *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Colegio de Postgraduados-CREZAS, San Luis Potosí, México.
- Fisher, C. T., H. P. Polland, I. Israde-Alcantara, V. H. Garduño and S. Benerjee (2003), "A reexamination of human-induced environmental change within the Lake Pátzcuaro basin, Michoacán, Mexico", *Proc. of the National Academy of Sciences*, 100(8), pp. 4957-4962.
- Fisher, C. T. (2005), "Demographic and landscape change in the Lake Pátzcuaro basin, Mexico: abandoning the garden", *American Anthropologist*, 107(1), pp. 87-95.
- Flores, L., H. E., M. Martínez M., J. L. Oropeza, E. Mejía S. y R. Carrillo G. (2002), "Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México", *Terra*, núm. 21(2), pp. 233-244.
- Garduño Monroy, V. H. (1999), "El vulcanismo del Mioceno-Pliocuaternario de Michoacán", en Garduño Monroy, V. H., P. Corona Chávez, I. Israde Alcántara, L. Menella, E. Arreygue, B. Bigioggero y S. Chiesa (eds.), *Carta Geológica de Michoacán*, escala 1:250 000, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, pp. 27-45.
- Garduño Monroy, V. H., S. Alcalá, M. E. Mendoza y V. M. Hernández (2007), *Comportamiento histórico y actual del espejo de agua del lago de Pátzcuaro. Aguas y lagos de Michoacán: una mirada desde lo global hasta lo local*, Secretaría de Cultura del Estado de Michoacán, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Michoacán y Colegio de Michoacán, Morelia, Michoacán.
- ILWIS (1997), *Integrated Land and Water Management Information System*, User's Manual. ITC, The Netherlands.
- INEGI (2000), *XII Censo General de Población y Vivienda*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México [cd-rom].
- Lal, R. (2007), "Constraints to adopting no-till farming in developing countries", *Soil and Tillage Research*, no. 94, pp. 1-3.
- Martínez Menez, M., J. D. Etchevers, J. I. Cortés, E. Rubio y L. Jiménez (2007), "Manejo sustentable de laderas en microcuencas: Estudio de caso", en Sánchez Brito, C., M. Bravo Espinosa y L. E. Fregoso Tirado (eds.), *Avances de Investigación en Agricultura Sostenible IV: Bases Metodológicas para el Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas*, INIFAP, Campo Experimental Uruapan, Michoacán, México.
- Mati, B. M., R. P. C. Morgan, F. N. Gichuki, J. N. Quinton, T. R. Brewer and H. P. Liniger (2000), *Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: a case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya*, JAG 2(1).
- Medina, O. L. E. (2006), *Pérdidas de suelo, agua y nutrientes en parcelas experimentales bajo sistemas agrícolas de Año y Vez y alternativos en un Acrisol de Michoacán, México*, tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
- Mellerowics, K. T., H. W. Rees, T. L. Chow and I. Ghanem (1994), "Soil conservation planning at the watershed level using the Universal Soil Loss Equation with GIS and microcomputer technologies: a case study", *J. of Soil and Water Cons.*, no.49(2), pp. 194-200.
- Mendoza M., G. Bocco, E. Lopez G. y M. Bravo (2002), "Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del Lago de Cuitzeo, Michoacán", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 49, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 92-117.

- Metcalf, S., F. Bernal Brooks, A. Chacon Torres, J. G. Farmer, A. B. MacKensie and A. J. Newton (2005), *Vulnerability of lake basins in Central Mexico to changes in the coupled human environmental system: A long-term perspective spanning 3500 years* [http://www.nrel.colostate.edu/ftp/ojima/GLP/aquatic_systems.pdf: 25 de agosto 2006].
- Meyer, L. D. (1984), "Evolution of the universal soil loss equation", *J. of Soil and Water Cons.*, no. 39(2), pp. 99-104.
- Molnar, D. K. and P. Y. Julien (1998), "Estimation of upland erosion using GIS", *Computers and Geosciences*, no. 24(2), pp.183-192.
- Mongkolsawat, C., P. Thirangoon and S. Sriwongsa (1994) *Soil erosion mapping with universal soil loss equation and GIS* [http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1994/ts3/ts3001pf.htm: 12 de febrero 2005].
- Nearing, M. A., L. J. Lane and V. L. Lopes (1994), "Modeling soil erosion", in Lal; R. (ed.), *Research Methods, Soil and Water Conservation Society*, Ankeny IA, pp. 127-156.
- Ohara, S. L., F. A. Street-Perrott and T. P. Burt (1993), "Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture", *Nature*, no. 362, pp. 48-51.
- Osterkamp, W. R. and T. J. Toy (1997), "Geomorphic considerations for erosion prediction", *Environmental Geology*, no. 29(3/4), pp. 152-157.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies and D. K. McCool (1996), *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revisited Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Agric. Handbook 703. U.S. Gov. Print. Office, Washington D. C.
- Shi, Z. H., C. F. Cai, S. W. Ding, Z. X. Li, T. W. Wang and Z. C. Sun (2002), *Assessment of erosion risk with the rusle and Gis in the middle and lower reaches of Hanjiang River*, 12th ISCO Conference Beijing, China.
- Spanner, M. A., A. H. Strahler and J. E. Estes (1982), "Soil loss prediction in a geographic information system format", in *Papers Selected for Presentation at the 16th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment*, vol 1, Buenos Aires, 2-9 June 1982, Environmental Research Inst. of Michigan, Ann. Arbor.
- Sparovek, G. and I. C. DeMaria (2003), "Multiperspective analysis of erosion tolerance", *Scientia Agricola*, no. 60(2), pp. 409-416.
- Street Perrott, F. A., R. A. Perrott and D. D. Harkness (1989), "Anthropogenic soil erosion around lake Pátzcuaro, Michocán, Mexico, during the Preclassic and Postclassic-Hispanic Periods", *American Antiquity*, no. 51, pp. 759-765.
- Tiscareño López, M., A. D. Báez González, M. Velásquez Valle, K. N. Potter, J. J. Stone, M. Tapia Vargas and R. Claverán Alonso (1999), "Agricultural research for watershed restoration in Central Mexico", *J. Soil and Water Cons.*, no. 54(4), pp. 686-692.
- Toxopeus, A. G. (1997), "Cibodas: the erosion issue", in: Van Westen, C., A. Saldaña L., P. Uría C and G. Chávez A. (eds.), *ILWIS 2.1 for Windows, The Integrated Land and Water Information System. Applications Guide*, Chapter 23, Enschede, The Netherlands, pp. 307-322.
- Valdivia, R. and E. Villarreal (1998), *Technical diagnostic methodology for maize crop*, XVII Congress of Plant Genetics, Acapulco, Guerrero, México.
- Velásquez, J. de J., J. R. Salinas, K. N. Potter, M. Gallardo, F. Caballero y P. Díaz (2002), "Cantidad, cobertura y descomposición de residuos de maíz sobre el suelo", *Terra Latinoamericana*, núm. 20(2), pp. 171-182.
- Warren, S. D., V. E. Diersing, P. J. Thompson and W. D. Goran (1989), "An erosion-based land classification system for military installations", *Environmental Management*, no. 13(2), pp. 251-257.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith (1978), *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning*, U.S.D.A. Handbook 537, U.S. Gov. Print. Office, Washington D. C.