

EROSIÓN SUPERFICIAL Y CARSTIFICACIÓN EN MACUSPANA, TABASCO, SURESTE DE MÉXICO

SUPERFICIAL SOIL LOSSES AND KARSTIFICATION IN MACUSPANA, TABASCO, SOUTHEAST OF MÉXICO.

Violette Geissen^{1*}, José G. López de Llergo-Juárez¹, Adalberto Galindo-Alcántara² y Rodimiro Ramos-Reyes¹

¹El Colegio de la Frontera Sur. ²Universidad Autónoma de Tabasco. 86100. Villahermosa, Tabasco, México (vgeissen@web.de)

RESUMEN

El sureste de México está afectado por diferentes formas de erosión hídrica pero no hay información sobre su impacto en la región, la cual es necesaria para los programas de conservación de suelos. Por ello, se estudió la cantidad y ubicación de las diferentes formas de pérdida de suelos por erosión hídrica y por formaciones tipo Karst (carstificación) (i.e. un área de terreno de piedra caliza caracterizada por depresiones y corrientes subterráneas), en Macuspana, Tabasco, México. Esta zona se caracteriza por planicies y terrenos con pendientes mayores a 5% y precipitación media anual de 3186 mm. El uso principal del suelo es para pastoreo. Las principales formaciones geológicas de la región son rocas sedimentarias del Terciario como calizas, areniscas, y conglomerados. En una superficie de 2500 km² se cuantificaron pérdidas de suelo por grietas, cárcavas, movimiento de masas, túneles y pozos con la metodología propuesta por DVWK (1996). La información de campo se incluyó en mapas digitales de topografía, tipo de suelo y geología. Se incluyen los datos del uso actual del suelo de acuerdo con lo observado en campo. Se identificaron 1334 puntos de pérdidas de suelo, de los que 28 fueron grietas, 33 cárcavas, 56 movimientos en masa, 1198 pozos, y 19 túneles. Se hicieron análisis para explorar relaciones entre los factores y formas de pérdidas de suelo. En regiones con pendientes menores de 5% y con vegetación de *Cynodon plectostachyus* hubo un fuerte efecto de túneles y pozos en los Leptosoles réndzicos ubicados sobre caliza del Oligoceno. Las grietas, cárcavas y movimiento de masas se encontraron principalmente en Vertisoles peli-éutricos y Luvisoles crómicos con pendientes entre 5 y 30% y con vegetación de *Paspalum notatum* o *Cynodon plectostachyus*. La formación de pozos no está considerada en modelos predictivos para calcular el riesgo de erosión hídrica. Se concluye que las áreas estudiadas requieren urgentemente la aplicación de técnicas de conservación y restauración.

Palabras clave: Carstificación, erosión hídrica, erosión subterránea, sobrepastoreo.

ABSTRACT

The Southeast of México is affected by different forms of hydrological erosion; however, there is no information about its impact on the region, which is necessary for soil conservation programs. Thus, the quantity and location of various forms of soil loss due to hydrological erosion were studied, as well as because of Karst formations (karstification) (that is, an area of land with limestone rock characterized by depressions and underground currents), in Macuspana, Tabasco, México. This area is characterized by plains and lands with slopes over 5% and average annual precipitation of 3186 mm. The main land use is for grazing. The primary geological formations in the region are sedimentary rocks from the Tertiary such as limestone, sandstone and conglomerate. In a surface of 2500 km², losses of soil were quantified through cracks, crevices, mass movements, tunnels and wells with the methodology proposed by DVWK (1996). Field information was recorded in digital maps for topography, land type and geology. The data of the current land use was included, according to what was observed on the field. There were 1334 points of soil loss identified, out of which 28 were cracks, 33 crevices, 56 mass movements, 1198 wells and 19 tunnels. Analyses were carried out to explore the relation between the factors and forms of soil loss. In regions with slopes of less than 5% and *Cynodon plectostachyus* vegetation. The rendzic Leptosols found over limestone from the Oligocene were strongly affected by tunnels and wells. Cracks, crevices and mass movements were found mainly in peli-eutric Vertisols and chromic Luvisols with slopes between 5 and 30% and with *Paspalum notatum* or *Cynodon plectostachyus* vegetation. The formation of wells is not considered in predictive models used for estimating the risk of hydrological erosion. We conclude that the areas studied urgently require the application of conservation and restoration techniques.

Key words: Karstification, hydrological erosion, underground erosion, over-grazing.

INTRODUCTION

During the last five decades, the increase in population and extreme poverty has caused the devastation of natural vegetation in the

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Junio, 2007. Aprobado: Abril, 2008.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 42: 605-614. 2008.

INTRODUCCIÓN

En las cinco décadas recientes, el aumento de la población y la pobreza extrema han provocado la devastación de la vegetación natural en el sureste de México, principalmente por el cambio de uso de suelo a agrícola y ganadero (Pool, 1997). En suelos de ladera y marginales, la presión de uso sobre los recursos naturales no permite periodos de descanso del suelo, lo que propicia la erosión hídrica (Kirby y Morgan, 1994; Palma y Triano, 2002). Las pérdidas de suelo cambian su fertilidad y productividad, al modificar negativamente sus características físicas, químicas y biológicas, y originan procesos de degradación como compactación y acidez; además, los sedimentos arrastrados durante la erosión se acumulan en el fondo de ríos y lagunas y causan eutricación (Tollan, 2002).

En 2002 la SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) publicó mapas donde se señalan los riesgos de erosión y el nivel de degradación de los suelos en México. Según éstos, en Tabasco casi no existe pérdida de suelo. Sin embargo, Sánchez (1997) y la CNA (2002) definen algunas zonas de la Sierra de Tabasco como de alto riesgo por erosión: 707 188 ha con una alta tasa de erosión (pérdidas de 50 a 200 t ha año⁻¹) y 106 950 ha con una erosión mayor (pérdidas de más de 200 t ha año⁻¹). Además, los productores del municipio de Macuspana, observaron un incremento en la formación de pozos y túneles en sus suelos, que puede ser la consecuencia de un proceso de carstificación (formación de Karst, *i.e.* la formación de depresiones o pozos en terrenos de piedra caliza). Según Gerstenhauer (1966, 1978) y Li y Wang (1990), la carstificación es típica en suelos delgados que se encuentran sobre calizas en zonas tropicales. Debido al ingreso del agua al subsuelo se forman escurrimientos o corrientes subterráneas que fragmentan y arrastran partículas que desembocan en los ríos, formándose túneles. Éstos aumentan rápidamente su diámetro durante la época de lluvias, por lo que su pared superior se adelgaza, hasta que no puede soportar el peso, se derrumba y se forman pozos (Li y Wang, 1990). Además de los pozos, con el descenso del manto freático aumenta la velocidad del agua subterránea, lo que causa la erosión y formación de túneles entre la roca madre y la superficie del suelo. En suelos poco profundos el túnel crece hasta que el suelo colapsa (Gerstenhauer, 1966; Li y Wang, 1990).

El presente estudio se realizó para investigar el impacto de la erosión superficial y la carstificación en el municipio de Macuspana, Estado de Tabasco, con el fin de caracterizar las áreas más afectadas por

Southeast of México, mainly due to the change in land use for agriculture and livestock (Pool, 1997). In marginal and slope lands, the pressure on natural resources does not allow periods of rest for the soil, which facilitates hydrological erosion (Kirby and Morgan, 1994; Palma and Triano, 2002). Soil losses affect the fertility and productivity of the lands, because they modify their physical, chemical and biological characteristics, and originate processes of degradation such as compacting and acidity; in addition, the sediments that are dragged during erosion accumulate at the bottom of rivers and lagoons, causing eutrication (Tollan, 2002).

In 2002, the SEMARNAT (Secretariat of the Environment and Natural Resources) published maps where the risks of erosion and the level of degradation of soils in México are pointed out. According to these, in Tabasco there is almost no soil loss. However, Sánchez (1997) and the CNA (2002) define some areas of the Sierra de Tabasco as of high risk for erosion: 707 188 ha have a high rate of erosion (losses of 50 to 200 t ha year⁻¹) and 106 950 ha with a greater erosion (losses of more than 200 t ha year⁻¹). In addition, producers from Macuspana observed an increase in the formation of wells and tunnels in their lands, which can be the consequence of a process of karsification (Karst formation, *i.e.* the formation of depressions or wells in limestone rock lands). According to Gerstenhauer (1996, 1978) and Li and Wang (1990), the karsification is typical in thin soils that are found over limestone in tropical areas. Due to the entrance of water into the subsoil, runoffs or underground currents are formed, which fragment and drag particles that flow into the rivers, so that tunnels are formed. These tunnels rapidly increase their diameter during the rainy season, and their upper walls thin out until they cannot support weight anymore and collapse, and wells are formed (Li and Wang, 1990). In addition to wells, with the decrease of the water table, the speed of underground water flow is increased, causing erosion and the formation of tunnels between the mother rock and the soil surface. In soils that are not very deep, the tunnel grows until the soil collapses (Gerstenhauer, 1966; Li and Wang, 1990).

This study was carried out in order to investigate the impact of superficial erosion and karsification in the municipality of Macuspana, Tabasco, with the goal of characterizing the areas most affected by soil loss and correlating the different types of losses with the soils, geological formations, slopes, elevations and vegetation. This was done so as to obtain a database for those responsible of planning land conservation in Tabasco.

pérdidas de suelo y correlacionar los diferentes tipos de pérdidas con los suelos, formaciones geológicas, pendientes, elevaciones y vegetación. Ésto se realizó para obtener una base de datos para los responsables de planificar la conservación del suelo en Tabasco.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio fue el municipio de Macuspana, en Tabasco, México, entre 17° 32' 48" y 18° 05' 48" N y 92° 07' 54" y 92° 41' 48" O (Figura 1). Tiene una superficie de 223 827 km², limita al norte con los municipios de Centla y Centro, al sur con el Estado de Chiapas, al este con el municipio de Jonuta y al oeste con el de Jalapa. La mayor parte es una planicie, aunque en el sur del municipio hay una zona de lomeríos y cerros (Figura 1).

El clima (Af(m)) es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; la temperatura media anual es 23.6 °C y la precipitación media anual es 3186 mm; el mes más lluvioso es septiembre y el más seco es abril. La mayoría de los suelos se usan para pastoreo, menos del 10% en la agricultura, y las áreas boscosas y de acahuales son mínimas (INEGI, 2000).

Para caracterizar el área de estudio se digitalizaron los mapas de tipo de suelos, geología y topografía del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1983, 1985, 1990). La escala de análisis para la cartografía digital de geología y tipos de suelos fue 1:250 000, mientras que la correspondiente a la topografía fue 1:50 000 (INEGI, 1983, 1985, 1990).

En el municipio de Macuspana se realizaron recorridos en las 220 comunidades, y se hicieron entrevistas abiertas a cinco campesinos de cada pueblo para definir con ellos las áreas dañadas por erosión. Además, se realizaron recorridos por cuatro meses en el municipio para calcular las pérdidas de suelo. En campo se identificaron y clasificaron los tipos de erosión en los sitios: grietas (erosión lineal <40 cm de profundidad), cárcavas (erosión lineal

MATERIALS AND METHODS

The study area is the municipality of Macuspana, in Tabasco, México, between 17° 32' 48" and 18° 05' 48" N, and 92° 07' 54" and 92° 41' 48" W (Figure 1). Its territorial extension is 223 827 km², it borders North with the municipalities of Centla and Centro, South with the State of Chiapas, East with the municipality of Jonuta and West with Jalapa. The largest part is a plain, although in the south of the municipality there is an area of hills and hillocks (Figure 1).

The climate (Af(m)) is warm humid with abundant rain in the summer; the average annual temperature is 23.6 °C and the average annual precipitation is 3186 mm; the month with most rain is September and the driest April. Most of the lands are used for grazing, less than 10% for agriculture, and the forest and grass areas are minimal (INEGI, 2000).

In order to characterize the study area, INEGI (National Institute of Statistics, Geography and Informatics) maps for land type, geology, and topography were digitalized (1983, 1985, 1990). The scale of analysis for the digital cartography for geology and land type was 1:250 000 while the one for topography was 1:50 000 (INEGI, 1983, 1985, 1990).

In the municipality of Macuspana, tours were carried out in the 220 communities and open interviews were performed with five peasants in each town in order to define with them the areas affected by erosion. In addition, tours were carried out during four months in the municipality, in order to estimate the soil losses. In the field, the types of erosion were identified and classified: cracks (linear erosion <40 cm deep), crevices (linear erosion >40 cm deep), mass movement (loss because of soil movement in surfaces with some degree of slope) according to the DVWK methodology (1996). In addition, wells (soil sinking) and tunnels (underground excavation) were identified, which were formed as consequence of the process of karsification (Table 1).

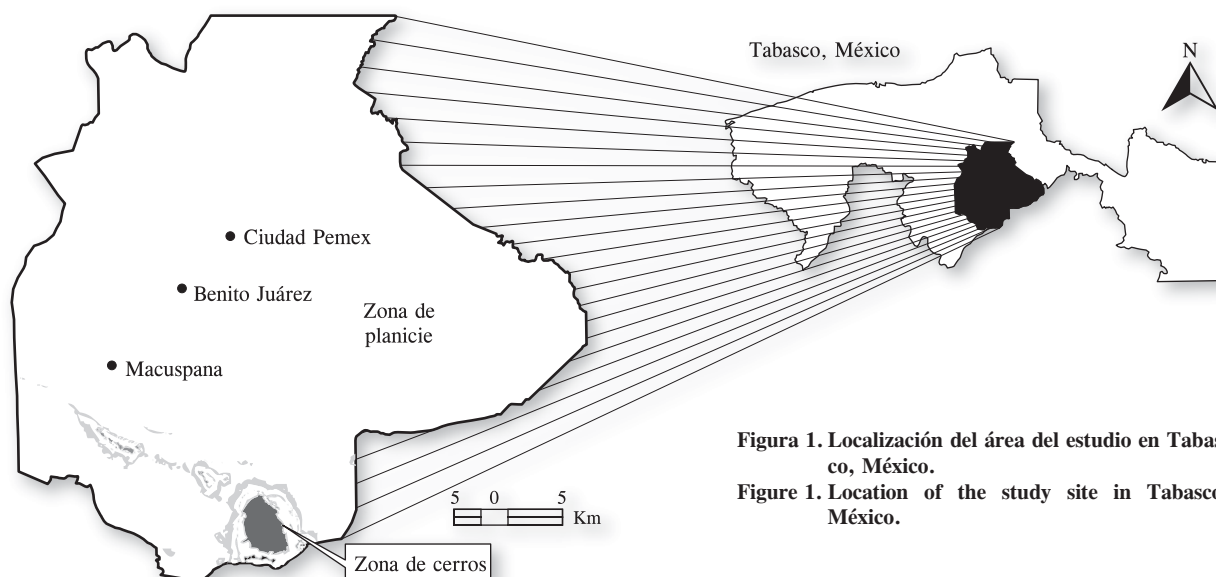


Figura 1. Localización del área del estudio en Tabasco, México.

Figure 1. Location of the study site in Tabasco, México.

>40 cm de profundidad), movimiento de masas (pérdida por movimiento de suelo en superficies con cierto grado de pendiente) según la metodología DVWK (1996). Además se identificaron pozos (hundimientos de suelo) y túneles (excavación subterránea) que se formaron como consecuencia del proceso de carstificación (Cuadro 1). Cada sitio fue localizado mediante GPS y en cada uno se determinó el grado de pendiente y el tipo de vegetación (Cuadro 1). Se elaboraron mapas donde se ubicaron las zonas dañadas por diferentes tipos de erosión usando el programa ArcView 1.2. Se confrontaron mapas de diferentes formas de pérdida de suelo sobre los de topografía (escala 1:50 000) (INEGI 1990), tipos de suelo (escala 1:250 000) (INEGI, 1985) y formaciones geológicas (escala 1:250 000) (INEGI, 1983).

Con la información sobre las características del área y la manifestación de las formas de pérdidas de suelo (grietas, cárcavas, movimientos de masas, pozos, túneles, Cuadro 1), se determinó la frecuencia de la apariencia de cada forma de erosión en las diferentes pendientes, formaciones geológicas, tipos de suelos y vegetación, para analizar la relación entre estos factores y las formas de pérdida de suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del área de estudio

De acuerdo con los mapas del INEGI (1983, 1985, 1990), el área de estudio está ubicada en una planicie (72%), en zona de cerros (11%) y en zona de lomeríos (17%) (Figura 1). En la planicie se encontraron principalmente sedimentos del Cuaternario, de los cuales se formaron Gleysoles (60% del área total) y Fluvisoles (2.17%) (Cuadros 2 y 3; Figuras 2 y 3). En la zona de cerros (200 a 250 m) se encontraron principalmente Leptosoles réndzicos sobre calizas del Oligoceno (2.96%); en la zona de lomeríos se formaron Acrisoles férricos (2.48%), Luvisoles crómicos (20.6%), Vertisoles eútricos (4.46%) y pelieútricos (4.52%) sobre rocas sedimentarias como Arenisca y Lutita-Arenisca del Terciario (Cuadros 2 y 3; Figuras 2 y 3).

Pérdida de suelo

En las 220 comunidades del municipio de Macuspana se ubicaron 16 comunidades con pérdidas de

Each site was located using GPS and in each one the degree of slope and type of vegetation was determined (Table 1). Maps were elaborated where the areas affected by different types of erosion were located, using the program ArcView 1.2. Maps of different types of soil loss were confronted with the topographical (scale 1:50 000) (INEGI, 1990), land type (scale 1:250 000) (INEGI, 1985) and geological formations (scale 1:250 000) (INEGI, 1983) maps.

With the information regarding the characteristics of the area and the manifestation of the forms of soil loss (cracks, crevices, mass movements, wells, tunnels, Table 1), the frequency of appearance for each type of erosion in various slopes, geological formations, land types and vegetation, was determined in order to analyze the relation between these factors and the forms of soil loss.

RESULTS AND DISCUSSION

Characteristics of the study area

According to the INEGI maps (1983, 1985, 1990), the study area is located on a plain (72%), in an area of hills (11%) and in an area of hillocks (17%) (Figure 1). On the plain, sediments from the Quaternary were primarily found, which formed Gleysols (60% of the total area) and Fluvisols (2.17%) (Tables 2 and 3; Figures 2 and 3). In the area of hills (200 to 250 m), rendzic Leptosols over limestone from the Oligocene (2.96%) were mainly found; in the area of hillocks, ferric Acrisols (2.48%), chromic Luvisols (20.6%), eutric (4.46%) and peli-eutric (4.52%) Vertisols were formed over sedimentary rocks such as sandstone and Lutite-sandstone from the Tertiary (Tables 2 and 3; Figures 2 and 3).

Soil loss

In the 220 communities from the municipality of Macuspana, 16 communities affected by soil loss were found in 1334 spots: 33 crevices, 28 cracks in 3 sites, 56 mass movements, 19 tunnels and 1198 wells in 84 sites (Table 4; Figures 2, 3, 4).

The width of the crevices varied from 1 to 40 m, their length from 6 to 100 m and their depth from 1 to 3 m. The cracks had lengths of 7 to 48 m and widths

Cuadro 1. Formas de pérdidas de suelo, descripción y características.
Table 1. Forms of soil loss, description and characteristics.

Forma	Descripción	Características medidas
Grieta	Erosión lineal < 40 cm de profundidad	Longitud, anchura, profundidad, área afectada y ubicación geográfica
Cárcavas	Erosión lineal > 40 cm de profundidad	Longitud, anchura, profundidad y ubicación geográfica
Movimientos de masas	Proceso gravitatorio	Longitud, anchura, profundidad y ubicación geográfica
Pozo	Hundimientos del suelo	Diámetro, profundidad y ubicación geográfica
Túnel	Excavación subterránea	Diámetro, longitud y ubicación geográfica

(según DVWK, 1996).

Cuadro 2. Formaciones geológicas identificadas en el municipio de Macuspana mediante evaluación digital del mapa de INEGI (1983).**Table 2.** Geological formations identified in the municipality of Macuspana through digital elevation of INEGI's (1983) map.

Formación geológica [†]	Área ocupada (%)
Ks_Caliza	0.02
Q_Aluvial	11.10
Q_Lacustre	2.17
Q_Palustre	50.71
Te_Lutita-Arenisca	3.74
Tm_Arenisca	28.48
To_Caliza	3.79
Total	100.0

[†] (Ks=cretáceo, Q=Cuaternaria, Te=Eoceno, Tm=Mioceno, To=Oligoceno) (área total: 2500 km²).

suelo, y en 1334 puntos; 33 fueron cárcavas, 28 grietas localizadas en 3 sitios, 56 movimientos de masas, 19 túneles y 1198 pozos en 84 sitios (Cuadro 4; Figuras 2, 3, 4).

La anchura de las cárcavas varió de 1 a 40 m, su longitud de 6 a 100 m y su profundidad de 1 a 3 m. Las grietas tuvieron longitudes de 7 a 48 m y anchuras de 9 a 30 m. Las grietas y cárcavas tienen diferentes profundidades. La anchura de los movimientos de masas varió de 5 a 78 m, y su longitud de 2 a 30 m. Los tamaños de las diferentes formas de erosión superficial coincidieron con los descritos por Wijdenes y Bryan (2001) en países con trópicos húmedos.

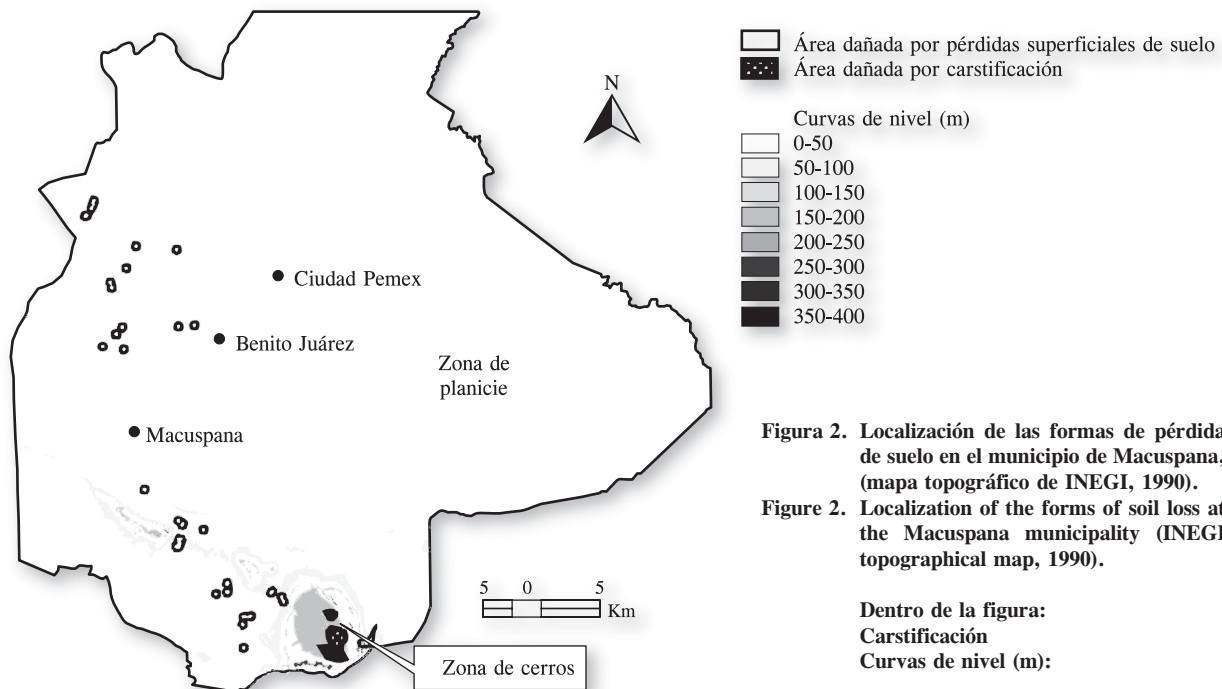
Cuadro 3. Tipos de suelos identificados en el municipio de Macuspana mediante evaluación digital del mapa de INEGI (1985).**Table 3.** Types of soils identified in the municipality of Macuspana through digital evaluation of INEGI's (1985) map.

Tipo de suelo	Área ocupada (%)
Acrisoles férricos	2.48
Fluvisoles éutricos	2.17
Gleysoles dístricos	3.57
Gleysoles éutricos, Gleysoles mólicos,	
Histosoles fibricos	47.29
Gleysoles mólicos	9.68
Leptosoles réndzicos	2.96
Luvisoles crómicos	20.60
Luvisoles gléyicos	2.28
Vertisoles éutricos	4.46
Vertisoles peli-éutricos	4.52
Total	100.0

of 9 to 30 m. The cracks and crevices have various depths. The width of the mass movements varied from 5 to 78 m, and their length from 2 to 30 m. The sizes of the various forms of superficial erosion coincided with those described by Wijdenes and Bryan (2001) in countries with humid tropics.

The wells have circular or oval shapes and diameters between 4 and 80 m; the tunnels had widths between 4 and 10 m and lengths between 3 and 38 m. The diameters of the wells coincided with those of 5 to 50 m reported by Denizman (2003).

Wells and tunnels derived from the karsification process were found in rendzic Leptozols formed over

**Figura 2.** Localización de las formas de pérdida de suelo en el municipio de Macuspana, (mapa topográfico de INEGI, 1990).**Figure 2.** Localization of the forms of soil loss at the Macuspana municipality (INEGI topographical map, 1990).

Dentro de la figura:
Carstificación
Curvas de nivel (m):

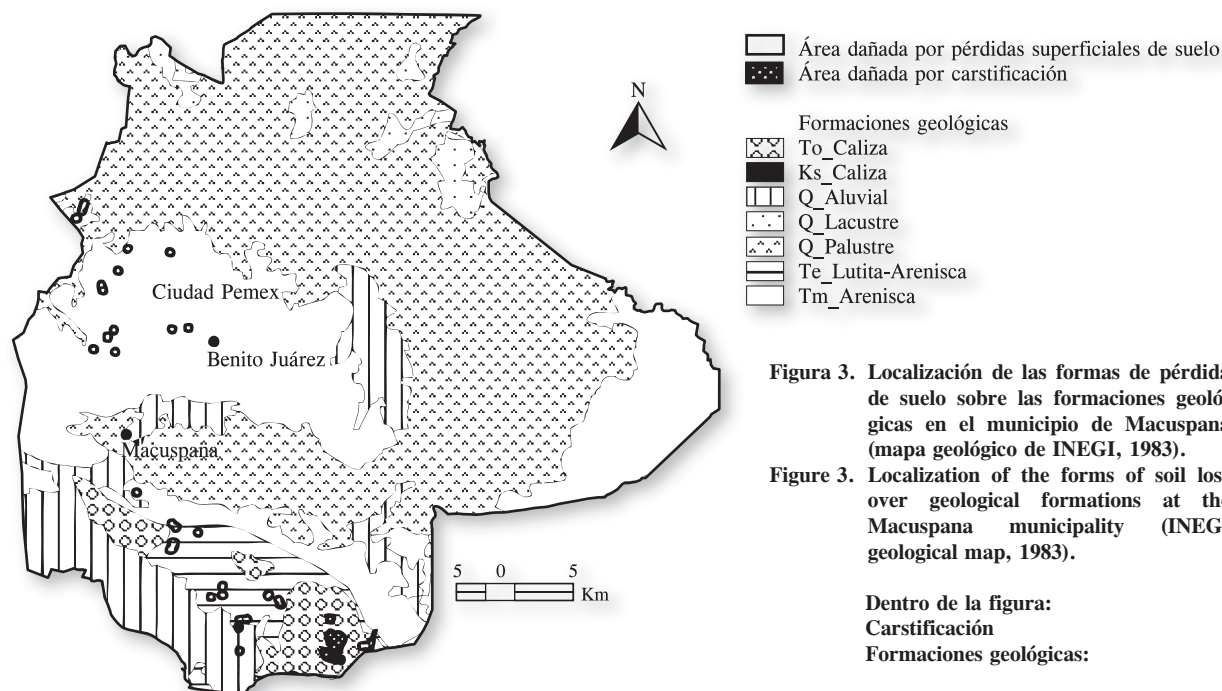


Figura 3. Localización de las formas de pérdida de suelo sobre las formaciones geológicas en el municipio de Macuspana (mapa geológico de INEGI, 1983).

Figure 3. Localization of the forms of soil loss over geological formations at the Macuspana municipality (INEGI geological map, 1983).

Dentro de la figura:
Carstificación
Formaciones geológicas:

Los pozos tienen formas circulares u ovales y diámetros de 4 a 80 m; los túneles tuvieron anchuras de 4 a 10 m y longitudes de 3 a 38 m. El diámetro de los pozos coincidió con el de 5 a 50 m reportados para la mayoría de los pozos por Denizman (2003).

Los pozos y túneles resultantes del proceso de carstificación se encontraron en Leptosoles réndzicos formados sobre caliza del Oligoceno en una planicie con pendiente menor de 1%, a alturas de 200 y 250 m en la zona de los cerros, al sureste del municipio (Cuadro 4; Figuras 2, 3, 4). La mayoría de los pozos se encontraron en pastizales cultivados con *Cynodon plectostachyus* y en áreas de cultivo de maíz, mientras que los túneles estaban en áreas no cultivadas (Cuadro 5).

limestone from the Oligocene on a plain with a slope less than 1%, at altitudes of 200 and 250 m in the area of hills, in the Southeast of the municipality (Table 4; Figures 2, 3, 4). Most of the wells were found in grasslands cultivated with *Cynodon plectostachyus* and in areas of corn cultivation, while the tunnels were found in uncultivated areas (Table 5).

This study area is not considered in danger of soil loss in the SEMARNAT map (2000) because the phenomenon of karsification is not taken into account in these maps. In 1978 the municipal territory of Macuspana was still protected by natural vegetation (Gerstenhauer, 1978). However, during the last 40 years the deforestation rate was very high and a large part of the forests has disappeared; now the lands are

Cuadro 4. Frecuencia (número) de las formas de pérdida de suelo observados en tipos de suelos y formaciones geológicas.
Table 4. Frequency (number) of the forms of soil loss found in types of soils and geological formations.

Tipo de suelo	Formación geológica [†]	Cárcavas	Grietas	MM [‡]	Pozos	Túnel	Total
Gleysoles eutricos, molicos, Histosoles fibrícos	Tm_Arenisca		1		7		8
Gleysoles mólicos	Tm_Arenisca	1		2			3
Leptosoles réndzicos	To_Caliza	11		3	1198	19	1154
Leptosoles réndzicos	Te_Lutita-Arenisca	3		3			6
Luvisoles cromicos	Tm_Arenisca	1	14	13			28
Luvisoles cromicos	To_Caliza	2		4			6
Vertisoles eutricos	Q_Aluvial			1			1
Vertisoles peli-eutricos	Q_Aluvial			2			2
Vertisoles peli-eutricos	Te_Lutita-Arenisca	14	14	21			49
Total		33	28	56	1198	19	1334

[†] Tm=Mioceno; To=Oligoceno; Te=Eoceno; Q=Cuaternaria.

[‡] MM=movimiento de masas.

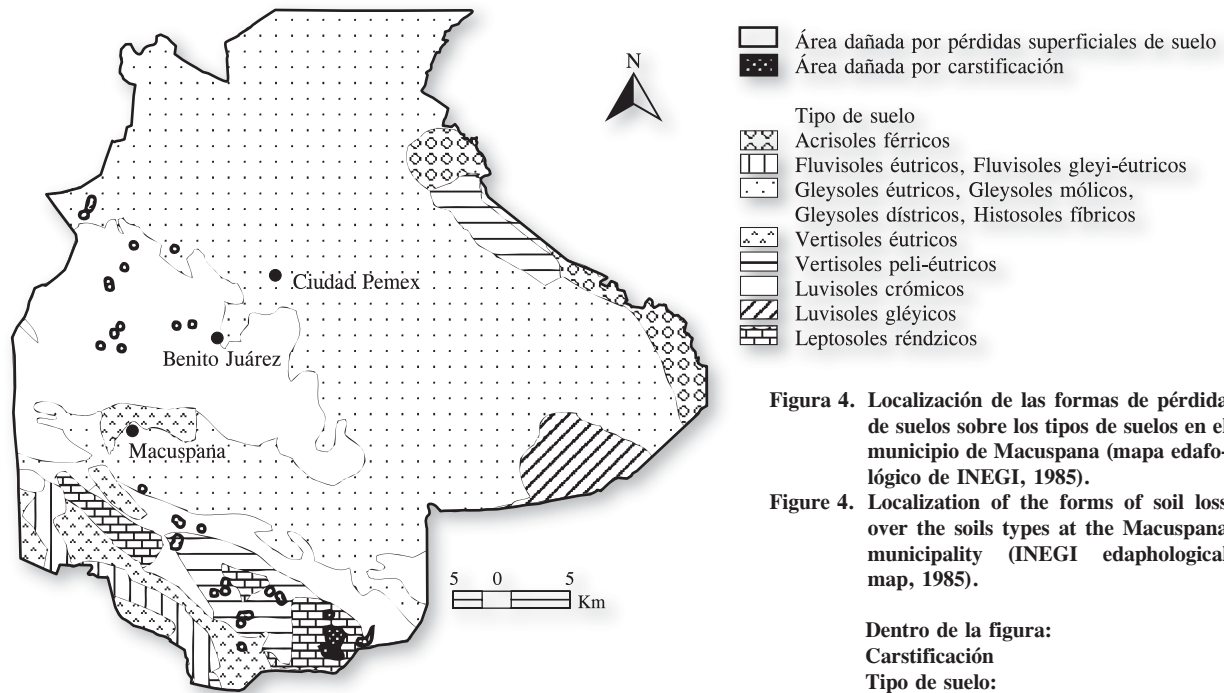


Figura 4. Localización de las formas de pérdida de suelos sobre los tipos de suelos en el municipio de Macuspana (mapa edafológico de INEGI, 1985).

Figure 4. Localization of the forms of soil loss over the soils types at the Macuspana municipality (INEGI edaphological map, 1985).

Dentro de la figura:

Carstificación

Tipo de suelo:

Esta área de estudio no está considerada en peligro por pérdida de suelo en el mapa de la SEMARNAT (2002) porque el fenómeno de carstificación no se considera en estos mapas. En 1978, el territorio del municipio de Macuspana estaba aún protegido por vegetación natural (Gerstenhauer, 1978). Sin embargo, en los últimos 40 años la tasa de deforestación fue muy alta y una gran parte de los bosques ha desaparecido; ahora los suelos son utilizados principalmente como pastizales (Palma y Cisneros 2000).

Según Li y Wang (1990), la deforestación causa cambios en el balance hídrico y descenso en el nivel freático. La infiltración del agua de lluvia es un factor muy importante, debido a que al entrar en contacto más cantidad de agua con la roca, la disolución de la caliza es más alta (Keqiang *et al.*, 2004). La poca profundidad de los Leptosoles réndzicos facilita el acceso del agua hasta la roca madre. Esto explica

used primarily as grasslands (Palma and Cisneros, 2000).

According to Li and Wang (1990), deforestation causes changes in the hydrological balance and a decrease in the level of the water table. Rainwater infiltration is a very important factor, since when a larger amount of water comes into contact with the rock, the limestone dissolution is higher (Keqiang *et al.*, 2004). The low depth of the rendzic Leptosols facilitates the access of water to the mother rock. This explains the formation of wells in the area after deforestation over the last 40 years.

Although the inclination of the slope is very slight, the theory of Li and Wang (1990) partially explains why wells and tunnels are only found in rendzic Leptosols associated with limestone from the Oligocene and not in Luvisols or Vertisols associated with the same rock. The tunnels formed under the

Cuadro 5. Frecuencia de las formas de pérdidas de suelo registradas, según tipo de vegetación.

Table 5. Frequency of the forms of soil loss registered, according to type of vegetation.

Vegetación actual	Cárcavas	Grietas	MM	Pozos	Túnel	Total
No cultivado	1		4	10	14	29
<i>Eleusine indica</i>	2	5	2			9
<i>Cynodon plectostachyus</i>	16	9	11	1054	5	1095
<i>Brachiaria humidicola</i>			3	1		4
<i>Zea maíz</i>				133		133
<i>Paspalum notatum</i>	14	14	31			59
<i>Brachiaria decumbens</i>			1			1
<i>Paspalum virgatum</i>			4			4
Total (N)	33	28	56	1198	19	1334

la formación de pozos en el área después de la deforestación en los últimos 40 años.

Aunque la inclinación de la pendiente es muy ligera, la teoría de Li y Wang (1990) explica parcialmente por qué los pozos y túneles sólo aparecieron en Leptosoles réndzicos asociados con calizas del Oligoceno y no en Luvisoles o Vertisoles asociados con la misma roca. Los túneles formados debajo de la superficie de suelos más profundos no se colapsan (Li y Wang, 1990). La formación del karst en el área del estudio es menos intensa que en otras áreas, como en Yucatán, México, donde también se han encontrado los Leptosoles más dañados por carstificación en relación con Luvisoles o Cambisoles (Bautista-Zuñiga *et al.*, 2004); pero dichos autores también observaron pozos en Luvisoles y Cambisoles.

En el área de estudio no se encontraron formaciones de pozos en calizas del Cretáceo, sino sólo calizas del Oligoceno. Ésto no coincide con otros reportes que describen la formación de pozos en calizas de diferentes edades geológicas como en calizas del Plioceno, Mioceno y Eoceno (Bautista-Zuñiga *et al.*, 2004) y en calizas del Siluro y Devónico (Applegate, 2003). Según Gerstenmeier (1978), en suelos formados sobre calizas del Cretáceo en la región de estudio, se forman conos de caliza, Kegelkarst, y no se forman pozos. Se requieren otros estudios para caracterizar la composición y la degradación de las dos formaciones de caliza en el área de estudio, para explicar las diferencias en la degradación de los dos tipos de calizas.

En la zona de lomeríos (de 50 a 100 m) y la de planicies (hasta 50 m) predominaron grietas, cárcavas y movimientos de masas. Un 72% de las cárcavas se encontraron áreas con pendientes menores a 1% en Luvisoles, Leptosoles, Gleysoles y Vertisoles. De ellos, 28% se observaron en áreas con pendientes mayores de 10% en Luvisoles crómicos y Vertisoles peli-éutricos. Todas las grietas se encontraron en áreas con pendientes menores a 1%; 68% de los movimientos de masas en áreas con pendientes menores a 1% en Gleysoles, Vertisoles, Luvisoles y Leptosoles; 11% en áreas con pendientes entre 5 y 10% en Vertisoles peli-éutricos, Luvisoles crómicos y Leptosoles réndzicos; 21% de los movimientos de masas aparecieron en áreas con pendientes mayores a 10% en Vertisoles peli-éutricos y Luvisoles crómicos. El sobrepastoreo y mal manejo de pastizales probablemente causó primero erosión laminar y con el tiempo se generaron diferentes formas de erosión lineal también en áreas menos inclinadas. Ésto concuerda con Jordan *et al.* (2003), quienes encontraron señales de erosión lineal intensa como grietas, cárcavas y movimientos de masas a bajas pendientes (Figura 2).

surface of deeper soils do not collapse (Li and Wang, 1990). The formation of karst in the study area is less intense than in other areas such as Yucatán, México, where Leptosols more affected by karsification have also been found as compared to Luvisols or Cambisols (Bautista-Zuñiga *et al.*, 2004); however, those authors also observed wells in Luvisols and Cambisols.

In the study area were not found formations of wells in limestone from the Cretaceous, but only limestone from the Oligocene. This does not coincide with other reports that describe the formation of wells in limestone from different geological ages such as limestone from the Pliocene, Miocene and Eocene (Bautista-Zuñiga *et al.*, 2004) and in limestone from the Silurian and Devonian (Applegate, 2003). According to Gerstenmeier (1978), in soils formed over limestone from the Cretaceous in the study region, limestone cones are formed, Kegelkarst, and not wells. Other studies are required in order to characterize the composition and degradation of the two limestone formations in the study area, so as to explain the differences in degradation for the two types of limestone.

In the area of hillocks (50 to 100 m) and the plain area (up to 50 m), cracks, crevices and mass movements predominated. Of the crevices, 72% were found in areas of slopes less than 1% in Luvisols, Leptosols, Gleysols and Vertisols. Out of these, 28% were observed in areas with slopes greater than 10% in chromic Luvisols and peli-eutric Vertisols. All cracks were found in areas with slopes of less than 1%; 68% of the mass movements in areas with slopes less than 1% in Gleysols, Vertisols, Luvisols and Leptosols; 11% in areas with slopes between 5 and 10% in peli-eutric Vertisols, chromic Luvisols crómicos and rendzic Leptosols; 21% of mass movements appeared in areas with slopes greater than 10% in peli-eutric Vertisols and chromic Luvisols. Overgrazing and poor management of grasslands probably caused laminar erosion first, and with time various forms of linear erosion were generated also in less inclined areas. This coincides with Jordan *et al.* (2003), who found signals of intense lineal erosion, such as cracks, crevices and mass movements in slight slopes (Figure 2).

Of the cracks, 50% and most of the crevices and mass movements were found over peli-eutric Vertisols (Figure 4) and, to a lesser degree, over chromic Luvisols and rendzic Leptosols (Table 4). Palma and Cisneros (2000) found that the peli-eutric Vertisols covered by dense vegetation rarely presented problems with hydrological erosion; however, in this study serious soil losses are shown if they are used as grasslands, especially with *C. pseudostachyus* and

El 50% de las grietas y la mayoría de las cárcavas y movimientos de masas se encontraron sobre Vertisoles peli-éutricos (Figura 4) y, en menor cantidad, sobre Luvisoles crómicos y Leptosoles réndzicos (Cuadro 4). Palma y Cisneros (2000), encontraron que los Vertisoles peli-éutricos cubiertos por vegetación espesa, raramente presentan problemas de erosión hídrica; sin embargo, en el presente estudio hay severas pérdidas de suelo si se usan como pastizales, especialmente con *C. pseudostachyus* y *Paspalum notatum* (Cuadro 5). En gran medida, esto se debe a que la formación de grietas en la época de sequía favorece la erosión lineal, por lo que al permitir el ingreso del agua por los agrietamientos típicos de estos suelos, se facilita la formación de cárcavas. En las condiciones climáticas de la zona y el cultivo de *C. pseudostachyus*, estos suelos no tienen la capacidad para resistir los procesos de erosión.

En los Vertisoles peli-éutricos, la manifestación de los movimientos de masas se debe a que sobre la lutita-arenisca hay caras de deslizamiento, las cuales son superficies pulidas o acanaladas producidas cuando una masa de suelo se desliza sobre otra (Figura 3, Figura 4). Este fenómeno, aunado a la falta de raíces profundas que sujeten el suelo, facilita el desarrollo de movimientos de masas durante la época de lluvias. Los Luvisoles crómicos sobre Tm_arenisca también fueron impactados por movimiento de masas. Probablemente la intemperización de la arenisca donde se forma la saprolita pudo causar corrientes internas debido a la intensidad de los movimientos de masas.

CONCLUSIONES

Es urgente aplicar técnicas de conservación y restauración de suelos en pastizales, como la plantación de cercas vivas, siembra de árboles y arbustos, así como instalar sistemas agroforestales o multicultivos en el gran número de áreas dañadas por formas de erosión superficial. En los pastizales, la conservación del suelo también requiere manejo del ganado y de la carga animal. La carstificación es el proceso que más daña al municipio de Macuspana y urge aplicar programas de restauración y conservación en esta área. Debe sembrarse árboles dentro de los pozos y túneles para evitar su aumento y sembrar cercas vivas para disminuir la velocidad de las aguas superficiales que ocurren después de lluvias en zonas tropicales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca (SEDAFOP), Tabasco, por su soporte financiero, a Rufo Sánchez Hernández por su apoyo en la redacción.

Paspalum notatum (Table 5). To a large extent, this is due to the fact that crack formation in the dry season favors linear erosion, which is why once water is allowed to enter through the typical cracks found in these soils, the formation of crevices is facilitated. In the climate conditions of the area and the cultivation of *C. pseudostachyus*, these soils do not have the capacity to resist the processes of erosion.

In the peli-eutric Vertisols, the manifestation of mass movements is due to the fact that over the lutite-sandstone there are sliding sides, which are polished or channeled surfaces that are produced when a landmass slides over another (Figure 3, Figure 4). This phenomenon, in addition to the lack of deep roots to hold the soil, facilitates the development of mass movements during the rainy season. The chromic Luvisols over the Tm sandstone were also affected by mass movements. It is likely that the exposure of sandstone where saprolite is formed could cause internal currents due to the intensity of the mass movements.

CONCLUSIONS

It is urgent to apply conservation and restoration techniques for soils in grasslands, such as planting live fences, sowing trees and brushes, as well as installing agricultural-forest or multi-crop systems in the large number of areas affected by forms of superficial erosion. In the grasslands, soil conservation also requires management of livestock and stocking rate. Karsification is the process that affects the municipality of Macuspana the most, and it is urgent to apply programs of restoration and conservation in this respect. Trees should be planted inside wells and tunnels to avoid their expansion, and live fences should be planted to decrease the speed of superficial waters that occur after the rains in tropical zones.

—End of the English version—



LITERATURA CITADA

- Applegate, P. 2003. Detection of sinkholes developed on shaly Ordovician limestones, Hamilton County, Ohio, using digital topographic data: Dependence of topographic expression of sinkholes on scale, contour interval, and slope. *J. Cave and Karst Studies* 65(2): 126-129.
- Bautista-Zuñiga, F., H. Estrada-Medina, J. J. Jiménez-Osornio, y G. A. González-Iturbe. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelos en zona cársticas de Yucatán. *Terra Latin*. 22: 243-254.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en el Distrito de Temporal

- Tecnificado 001 La Sierra, Tabasco. Chapingo. Tabasco. México. 25 p.
- Denizman, C. 2003. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida. *J. Cave and Karst Studies*, 65(1): 29-35.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik) 1996. Bodenerosion durch Wasser – Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 239/1996. Hamburg, Alemania. 36 p.
- FAO. 1998. World reference base for soil resources. World soil resources reports 84. Rome, Italy.
- Gerstenhauer, A. 1966. Beiträge zur Geomorphologie des mittleren und nördlichen Chiapas (México) unter besonderer Berücksichtigung des Karstformenschatzes. *Frankfurter Geographische Hefte* 41. Frankfurt, Alemania. 82 p.
- Gerstenhauer, A. 1978. Der tropische Kegelkarst in Tabasco (Mexico). *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 2: Karstmorphologie*. Frankfurt, Alemania. pp: 22-48.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) 1983. Carta Geológica, Teapa. 1:250.000. Aguascalientes. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1985. Carta Edafológica. Villahermosa E15-8. 1: 250.000. Aguascalientes. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1990. Carta Topográfica. Macuspana, E15D22, 1: 50.000. Aguascalientes. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000. Anuario estadístico del Estado de Tabasco. INEGI – Gobierno del Estado. Mapas. Aguascalientes. México.
- Jordán, A., N. Bellinfante, y G. Paneque. 2003. Valoración de paisajes erosivos en el campo de Gibraltar. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. <http://www.us.es./gsma/docs/tarifaerosion.htm>. Fecha de consulta: 25/8/2006.
- Keqiang, H., W. Bin, and Z. Dunyun. 2004. Mechanism and mechanical model of karst collapse in an over-pumping area. *Environ. Geol.* 46: 1102-1107.
- Kirkby, M. J., y R. P. C. Morgan. 1994. Erosión de Suelos. Grupo Noriega Editores. México. D.F. 132 p.
- Li, Z., and Z. Wang. 1990. The Basis of Engineering Geology. Publishing Company of China Geoscience University. China. 45. pp: 176-179.
- Palma L., D. J., y D. J. Cisneros. 2000. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Segunda ed. ISPROTAB-Fundación Produce Tabasco-Colegio de Postgraduados. Villahermosa, Tabasco, México. 179 p.
- Palma L., D. J., y S. A. Triano. 2002. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco, Vol. II. Colegio de Posgraduados- ISPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 118 p.
- Pool N., L. 1997. Intensificación de la agricultura tradicional y cambios en el uso del suelo. In: ECOSUR (ed). Los Altos de Chiapas: Agricultura y Crisis Rural. Tomo 1: Los Recursos Naturales. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. pp: 1-23.
- Sánchez E., D. C. 1997. El riesgo de la pérdida del suelo por erosión hídrica en Tabasco. In: SEMARNAP (ed). Los suelos de Tabasco: Restauración, Conservación y Uso. pp: 27-31.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2002. Evaluación de la degradación del suelo causado por el hombre en la República Mexicana Escala 1:250.000. Memoria Nacional. Mexico, D. F. 76 p.
- Tollan, A. 2002. Land use changes and floods: what do we need most, research or management? *Water Sci. Technol.* 44(8): 183-190.
- Wijdenes, D. J. O., and R. Bryan. 2001. Gully-head erosion processes on a semi-arid valley floor in Kenya: A case study into temporal variation and sediment budgeting. *Earth Surf. Process. Landforms* 26: 11-933.