



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

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

Contreras-Hinojosa, José; Volke-Haller, Víctor; Oropeza-Mota, José; Rodríguez-Franco, Carlos;
Martínez-Saldaña, Tomás; Martínez-Garza, Ángel
Reducción del rendimiento de maíz por la erosión del suelo en Yanhuitlán, Oaxaca, México
Terra Latinoamericana, vol. 23, núm. 3, julio-septiembre, 2005, pp. 399-408
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311101012>

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

redalyc.org

Sistema de Información Científica

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

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

REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ POR LA EROSIÓN DEL SUELO EN YANHUITLÁN, OAXACA, MÉXICO

Reduction of Maize Yield by Erosion in Yanhuítlan, Oaxaca, Mexico

José Contreras-Hinojosa^{1†}, Víctor Volke-Haller², José Oropeza-Mota², Carlos Rodríguez-Franco³, Tomás Martínez-Saldaña⁴ y Ángel Martínez-Garza⁴

RESUMEN

Diversos estudios realizados en la región Mixteca Oaxaqueña indican que alrededor de 95% de su superficie presenta erosión en grados moderado, alto y muy alto, producto del uso agrícola del suelo, del sobrepastoreo y de la deforestación. Parte de esta región lo constituye el municipio de Yanhuítlan, en el cual se realizó el presente estudio con el objetivo de evaluar la reducción del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) debido a la erosión del suelo, con base en características y propiedades del suelo relacionadas con ella. Se establecieron 31 lotes experimentales de maíz en suelos con erosión ligera, moderada y severa, con los tratamientos: sin fertilización y con la fertilización 80-40-40 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O. Se colectó información sobre factores de suelo y de manejo del cultivo, precipitación y humedad del suelo durante el ciclo de cultivo, así como el rendimiento de grano y de paja del cultivo. Las funciones de producción para grano y paja obtenidas mediante análisis de regresión indican que el rendimiento fue afectado por los factores de suelo: pendiente, profundidad, materia orgánica y humedad aprovechable; humedad disponible en el suelo durante 45 días antes de la floración femenina; precipitación en el primer mes después de la siembra; y fertilización inorgánica. De los factores de suelo que se asociaron con las clases de erosión ligera, moderada y severa, la disminución de la profundidad, de 99 a 61 y 26 cm,

presentó el mayor efecto de reducción del rendimiento de maíz; y el incremento de la pendiente, de 2.1 a 3.0 y 10.0%, presentó un efecto intermedio; en cambio, la materia orgánica, que no se asoció con la erosión, no causó mayores reducciones del rendimiento entre clases de erosión, aunque sí entre sus valores extremos observados.

Palabras clave: *Zea mays* L., materia orgánica del suelo, profundidad del suelo, pendiente del suelo.

SUMMARY

In the Mixteca Oaxaqueña region several studies have shown that about 95% of its surface is affected by moderate, high, and very high erosion. The causes of this situation are deforestation, overgrazing, and land tillage. The present study was carried out in the county of Yanhuítlan, Oaxaca, Mexico, to determine the reduction of maize yield due to the effect of erosion on some soil properties. Thirty-one experimental plots were established on low eroded, moderately eroded and severely eroded soils, without and with fertilizer rates of 80-40-40 kg ha⁻¹ N-P₂O₅-K₂O. Information on soil and crop management factors, rainfall and soil humidity during the growing season, as well as on grain and straw yield was collected. Production functions for grain and straw yield were obtained and it showed that the yield of grain and straw were affected by soil factors such as slope, depth, organic matter, and available water, available water in the soil during 45 days before feminine flowering, rainfall in the first month after sowing date, and inorganic fertilization. Among the soil factors associated with the soil erosion classes low, moderate and severe, 99 to 61 and 26 cm decrease in soil depth caused the greatest reduction in maize yield, and the increase of soil slope of 2.1 to 3.0 and 10.0% caused a medium reduction in maize yield; whereas, soil organic matter, which was not associated with soil erosion classes, did not cause reduction of maize yield among soil erosion classes, but did between its extreme values observed.

¹ Campo Experimental Yanhuítlan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 69660 Yanhuítlan, Oaxaca, México.

[†] Autor responsable (contrerasraf@hotmail.com)

² Instituto de Recursos Naturales, ⁴ Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, estado de México.

³ Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, Texcoco, México.

Index words: *Zea mays L., soil organic matter, soil depth, soil slope.*

INTRODUCCIÓN

El uso de los recursos naturales por el hombre para satisfacer sus diversas necesidades ha dado lugar a su deterioro, debido a que se ha realizado con base en criterios económicos de beneficios inmediatos, sin considerar la conservación de ellos a mediano y largo plazo. Esto ha originado que grandes superficies de suelo agrícola se encuentren en estado avanzado de degradación, o bien, ya se hayan perdido totalmente (Dregne *et al.*, 1991).

Diversos procesos causan la degradación del suelo, como: erosión hídrica, erosión eólica, salinización, sodización, acidificación, compactación, encostramiento, pérdida de materia orgánica, pérdida de nutrientes y acumulación de sustancias tóxicas; sin embargo, la erosión, por su impacto destructivo y por ser de un carácter irreversible, se ha convertido en el principal proceso de degradación del suelo (Dragne, 1987).

La erosión causa: 1) la remoción de los horizontes superficiales del suelo, con la consecuente pérdida de materia orgánica y nutrientes, el deterioro de las propiedades físicas, la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos delgados y, finalmente, la disminución de la productividad de los agroecosistemas; 2) en estados más avanzados, la pérdida de superficies importantes de suelo por la formación de cárcavas o pérdidas totales; y 3) la disminución de los ingresos de los productores, por menor rendimiento de los cultivos y mayor costo de producción por incrementos de los requerimientos de fertilización y de la labranza del suelo (USDA-SCS, 1990; Kidd y Pimentel, 1992; Huitzhunsen, 1993).

La información acerca del efecto de la erosión sobre las características y propiedades del suelo y, en consecuencia, sobre la productividad de los agroecosistemas, es numerosa. Frausto *et al.* (1991), con base en la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) estimaron las pérdidas de suelo por erosión en Cambisoles con pendientes de 2 a 19% con uso agrícola y pecuario de la zona de Nochixtlán, región Mixteca Oaxaqueña, durante el período de 1950 a 1988 y determinaron que la erosión afectó la profundidad del suelo, de tal forma que pérdidas del orden de 40 t ha⁻¹ año⁻¹ redujeron, en promedio, la profundidad de más de 90 cm a 65 cm y pérdidas del orden de 125 t ha⁻¹ año⁻¹ la redujeron a 30 cm. López

y Anaya (1994), en un Cambisol con 65% de pendiente de la región de La Fraylesca, Chiapas, encontraron que las pérdidas de suelo por erosión redujeron la materia orgánica en 0.0186%, el potasio intercambiable en 0.0030 cmol_c kg⁻¹ y la conductividad hidráulica a saturación en 0.0011 cm h⁻¹, e incrementaron la densidad aparente en 0.0040 Mg m⁻³, por 1.0 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de suelo perdido. Uribe *et al.* (2002), en Entisoles con 15% de pendiente con uso agrícola y labranza tradicional de la región de Los Tuxtlas, Veracruz, midieron pérdidas promedio de suelo del orden de 199 t ha⁻¹ año⁻¹ en el período 1995-1999, equivalentes a una disminución de 1.37 cm año⁻¹ de la profundidad, y causantes de pérdidas de materia orgánica de 3388 kg ha⁻¹ año⁻¹, de 279 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, y de diversas cantidades de P, K, Ca y Mg. González *et al.* (2003) estudiaron la relación entre la erosión y algunas características del suelo en el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, Guerrero y encontraron que ella se asoció con la profundidad ($r = -0.885$) y la pendiente ($r = 0.647$); en cambio, no mostró relación con otras características del suelo. López y Anaya (1994), en un Cambisol con 65% de pendiente y 15 cm de profundidad de la región La Fraylesca, Chiapas, determinaron una reducción del rendimiento de maíz de 0.0024 t ha⁻¹ por 1.0 t ha⁻¹ de suelo perdido por erosión, lo que, considerando pérdidas de suelo de 49.67 t ha⁻¹ año⁻¹, equivale a una pérdida anual de maíz de 0.119 t ha⁻¹, y para un rendimiento observado de 3.07 t ha⁻¹, a 3.9% anual. Pérez *et al.* (1998), en la zona de Nochixtlán, región Mixteca Oaxaqueña, encontraron reducciones del rendimiento de maíz por remoción de suelo superficial simulando la erosión, del orden de 40% para una remoción de 20 cm en un Faeozem profundo, y de 99.2% para una remoción de 10 cm en un Leptosol de 25 cm de profundidad, a la vez que, en el primer suelo, ocurrieron pocos cambios en las propiedades físicas y químicas con la remoción, mientras que, en el segundo, ocurrieron disminuciones importantes en el contenido de materia orgánica, P y K, además de la profundidad. Villar *et al.* (2003), en un Acrisol de 60 cm de profundidad y 6% de pendiente de la zona de La Fraylesca, Chiapas, determinaron, para un rendimiento de 3.7 t ha⁻¹, una disminución anual del rendimiento de maíz del orden de 18.9% para remociones de 15 cm de suelo, que simulan la erosión. González *et al.* (2003), estudiando el efecto de reducción del rendimiento de maíz por la erosión, expresada en las clases de erosión de Morgan (Morgan, 1997) y su equivalente por clase de erosión

de FAO (FAO, 1980), en el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, Guerrero, encontraron disminuciones del rendimiento de hasta 53.0 y 70.7% para las clases de erosión de Morgan, respectivamente, o muy severa de FAO.

En México, diversas estimaciones indican que entre 79 y 86% de su superficie territorial presentan algún grado de erosión (INEGI-SEMARNAP, 1998). Para la región Mixteca Oaxaqueña, se menciona que 59% de su superficie presenta erosión del suelo en grado alto y muy alto (Martínez *et al.*, 1986), a la vez que otros estudios señalan que 36.0% de la superficie presenta erosión moderada, 46.1% erosión alta y 13.3% erosión muy alta (Romero *et al.*, 1986).

El presente estudio tiene por objetivo evaluar la reducción del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) debido a la erosión del suelo, con base en características y propiedades del suelo relacionadas con ella, en la zona de Yanhuatlán, región Mixteca Oaxaqueña.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde al municipio de Santo Domingo Yanhuatlán, en la región denominada Mixteca Oaxaqueña (17° 28' y 17° 31' N y 97° 16' y 97° 20' O), mismo que comprende una superficie de 6838 ha y presenta una altitud que varía de 1950 a 2800 m. Según la clasificación de Köppen, modificada por García (1987), el clima de la región corresponde a un BS₁kw(w)igw", presentando una precipitación media anual de 420 mm, con régimen de lluvias de verano y picos máximos en los meses de junio (20%) y septiembre (18%), y una temperatura media anual de 16.9 °C, con valores medios mínimo de 6.5 °C en enero y máximo de 22.0 °C en mayo. Los suelos se clasifican como Faeozem calcárico (INEGI, 1981), los cuales presentan un color dominante castaño rojizo (5YR5/3), textura arcillosa, profundidades de 10 a más de 100 cm, y se ubican en terrenos desde planos hasta montañosos. La superficie agrícola comprendió, a principios de la década de los noventa, 758 ha de maíz como cultivo principal (INEGI, 1994).

En el área agrícola del municipio de Santo Domingo Yanhuatlán, se evaluó la erosión del suelo de manera semicuantitativa mediante la metodología FAO (FAO, 1980) y se definieron las clases de erosión ligera, moderada y severa. En estas clases de erosión se ubicaron 31 sitios, en parcelas de agricultores cooperantes, distribuidos en las tres clases

de erosión: 13 en la clase ligera, 10 en la clase moderada y 8 en la clase severa. En cada sitio se tomaron muestras compuestas de suelo a las profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, en las cuales se determinaron: pH, en relación suelo:agua de 1:2; conductividad eléctrica, en relación suelo:agua de 1:5; materia orgánica, por combustión húmeda mediante el método de Walkley y Black; P extractable, por el método de Olsen; K intercambiable, en acetato de amonio 1 N a pH 7.0; carbonato de calcio, utilizando ácido clorhídrico como neutralizante; textura, por el método de Bouyoucos, con solución de Calgón como dispersante; humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, en la olla y membrana de presión a -30 y -1500 kPa, respectivamente (CSTPA, 1980); y, también se determinaron, con base en cuatro muestras: la densidad aparente del suelo, por el método de la parafina; el color del suelo, mediante la carta de colores Munsell; la profundidad del suelo, hasta la ubicación del "tepetate", considerando valores máximos de hasta 100 cm; y la pendiente, utilizando un clisímetro y estadal graduado.

Con fines de determinar la relación entre las características y propiedades del suelo y las clases de erosión del suelo, se realizó un análisis discriminante (SAS Institute, 1982), mismo que indicó una relación significativa ($P = 0.5$) entre pendiente y profundidad del suelo y el color del suelo de 0 a 20 cm, y las clases de erosión; en cambio, no indicó relación con otras características o propiedades del suelo, como: materia orgánica, densidad aparente, arcilla, limo, arena y humedad aprovechable de 0 a 20 cm (Cuadro 1).

En el ciclo primavera-verano de 1994, se establecieron lotes experimentales de maíz en las 31 parcelas de los agricultores seleccionados. Ellos incluyeron dos tratamientos de fertilización: un control sin fertilización y, otro, con una dosis de fertilización de 80-40-40 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, de acuerdo con la recomendación dada por el INIFAP para la zona (INIA, 1984). Las unidades experimentales tuvieron un tamaño de ocho surcos de 10 m de largo, sin repeticiones y, en cada lote, los tratamientos se distribuyeron al azar en el sentido perpendicular a la pendiente. En todos los lotes se utilizó maíz criollo del agricultor y el arreglo topológico fue de tres plantas por mata a una distancia de 0.75 m y una separación entre surcos de 0.80 m, lo que correspondió a una población de 50 000 plantas ha⁻¹. Durante el ciclo del cultivo, se midió la precipitación en períodos semanales mediante

Cuadro 1. Relación entre la erosión y algunas características y propiedades del suelo en la zona de Yanhuitlán, región Mixteca Oaxaqueña.

Característica o propiedad del suelo	Valores promedio por clase de erosión de FAO			Nivel de probabilidad
	ligera	moderada	Severa	
Pendiente (%)	2.1	3.0	10.0	0.01
Profundidad (cm)	99	61	26	0.01
Color de 0 a 20 cm	2.50	2.8	3.25	0.04
Materia orgánica de 0 a 20 cm (%)	0.95	0.8	0.66	0.29
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1.65	1.66	1.80	0.09
Arcilla (%)	57.1	58.9	63.1	0.34
Limo (%)	29.1	27.4	30.1	0.56
Arena (%)	13.8	13.7	6.8	0.22
Humedad aprovechable (%)	12.3	11.1	12.1	0.23

[†] Valor medio para los valores de color 10YR = 1, 7.5YR = 2, 5YR = 3 y 2.5YR = 4.

pluviómetros distribuidos en el área de estudio y se determinó la humedad del suelo a las profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, a intervalos quincenales en el período de 45 días antes y de 45 días después de la floración femenina, y se tomaron cuatro submuestras por sitio, para estimar la humedad disponible media en el suelo. Al final del ciclo del cultivo, se midió la infiltración en el fondo del surco, para lo cual se utilizó un infiltrómetro de doble cilindro, en un tiempo de 120 min. Por otra parte, se consideró la fecha de siembra y de floración femenina, la densidad de plantas del maíz medida a la cosecha y el rendimiento de grano y de paja del maíz en una parcela útil de seis surcos de 8 m de largo, y se consideró al grano con 14% de humedad y a la paja en peso seco en el momento de la cosecha.

Con toda la información colectada, se procedió a determinar funciones de producción del rendimiento de grano y de paja en relación con las características y propiedades del suelo, los factores de manejo del cultivo, la precipitación, expresada en diferentes períodos a partir de la siembra y de la fecha de floración femenina, la humedad del suelo en el período de 45 días antes y 45 días después de la floración femenina y los dos tratamientos de fertilización en conjunto, mediante variables auxiliares, para lo cual se siguió el procedimiento indicado por María y Volke (1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características y Propiedades del Suelo, Precipitación, Humedad del Suelo y Manejo

Los valores mínimo, máximo y medio de las características y propiedades de suelo, la

precipitación, los factores de manejo del cultivo y la humedad del suelo 45 días antes y 45 días después de la floración femenina, observados en los lotes experimentales, se presentan en el Cuadro 2.

Algunas características y propiedades relevantes de los suelos, de acuerdo con la capa superficial de 0 a 20 cm, son: pH alcalinos, que varían de 8.1 a 8.3, asociados con el alto contenido de carbonato de calcio, mayor que 16.9%; contenido de materia orgánica menor que 0.50%, 25.8%, entre 0.51 y 1.00%, 48.4%, y entre 1.01 y 1.61%, 25.8%; contenido de P Olsen bajo (< 5.5 mg kg⁻¹), 77%, medio (5.5 a 11 mg kg⁻¹), 16%, y alto (> 11 mg kg⁻¹), 6% (CSTPA, 1980); contenido alto de K intercambiable, mayor que 2.1 cmol_c kg⁻¹; textura arcillosa; y densidad aparente mayor que 1.47 Mg m⁻³. Por otra parte, 29.0% de los suelos presentaron profundidades menores que 45 cm, 35.5% entre 46 y 90 cm y 35.5% mayor que 90 cm; y 87% de los suelos tienen pendientes menores que 8%, y 13% entre 9% y 24%.

Las siembras se realizaron en el período del 13 de junio al 2 de julio, con el establecimiento del temporal y cuando el suelo llegó a tener una profundidad de humedecimiento de 20 a 30 cm. La precipitación durante el ciclo de cultivo varió de 407 a 493 mm entre los lotes experimentales y, debido a la distribución deficiente y presencia de suelos someros y delgados, se observaron síntomas de deficiencia de humedad del cultivo en varios lotes experimentales.

Rendimiento de Maíz

El rendimiento obtenido de grano y paja del maíz para los tratamientos sin y con fertilización, excluyendo el Lote 14, en el cual el tratamiento sin

Cuadro 2. Características y propiedades del suelo, precipitación, humedad del suelo y manejo del cultivo, en los 31 lotes experimentales.

Variable	Valor		
	mínimo	máximo	promedio
pH de 0 a 20 cm	8.1	8.3	8.2
Conductividad eléctrica de 0 a 20 cm (dS m ⁻¹)	0.14	0.19	0.17
Materia orgánica de 0 a 20 cm (%)	0.13	1.61	0.78
Materia orgánica de 20 a 40 cm (%)	0.07	1.47	0.61
Fósforo de 0 a 20 cm (mg kg ⁻¹)	1	20	4
Fósforo de 20 a 40 cm (mg kg ⁻¹)	1	11	3
Potasio intercambiable de 0 a 20 cm (cmol _c kg ⁻¹)	2.1	37.3	7.0
Potasio intercambiable de 0 a 40 cm (cmol _c kg ⁻¹)	1.8	34.4	6.3
Carbonato de calcio de 0 a 20 cm (%)	16.9	28.0	25.1
Carbonato de calcio de 0 a 40 cm (%)	19.6	28.5	25.3
Arena de 0 a 20 cm (%)	1	39	11.5
Arena de 20 a 40 cm (%)	1	49	10.4
Limo de 0 a 20 cm (%)	21	40	28.6
Limo de 20 a 40 cm (%)	12	38	28.3
Arcilla de 0 a 20 cm (%)	39	72	59.6
Arcilla de 20 a 40 cm (%)	31	77	61.2
Capacidad de campo de 0 a 20 cm (%)	18.3	34.0	27.2
Capacidad de campo de 20 a 40 cm (%)	18.9	35.4	28.6
Punto de marchitez permanente de 0 a 20 cm (%)	8.8	20.5	15.4
Punto de marchitez permanente de 20 a 40 cm (%)	9.1	22.1	16.6
Humedad aprovechable de 0 a 20 cm (%)	8.6	15.3	11.7
Humedad aprovechable de 20 a 40 cm (%)	7.9	15.7	12.0
Densidad aparente de 0 a 20 cm (Mg m ⁻³)	1.47	2.03	1.69
Densidad aparente de 20 a 40 cm (Mg m ⁻³)	1.54	2.00	1.76
Color del suelo de 0 a 20 cm	2.5 YR	10YR	
Color del suelo de 20 a 40 cm	2.5 YR	10YR	
Profundidad del suelo (cm)	16	> 100	67.9
Pendiente (%)	1	24	4.7
Infiltración básica (cm h ⁻¹)	1.2	22.8	6.7
Infiltración a los 30 minutos (cm h ⁻¹)	0.6	36.0	6.3
Infiltración a los 60 minutos (cm h ⁻¹)	0.9	42.0	8.1
Precipitación durante el ciclo del cultivo (mm)	407	493	450
Humedad disponible media del suelo de 0 a 20 cm, en tres quincenas antes de la floración femenina (%).	8.6	16.2	11.4
Humedad disponible media del suelo de 0 a 20 cm, en tres quincenas después de la floración femenina (%).	2.2	15.5	11.0
Fecha de siembra (días julianos)	164	183	175
Densidad de plantas (plantas ha ⁻¹):			
sin fertilización	22 135	50 000	41 150
con fertilización	20 182	50 347	41 878

fertilización dio un rendimiento muy alto (atípico), varió, en el tratamiento sin fertilización, de 0 a 2994 kg ha⁻¹ para grano y de 21 a 6562 kg ha⁻¹ para paja; y en el tratamiento con fertilización, de 0 a 5512 kg ha⁻¹ para grano y de 62 a 9149 kg ha⁻¹ para paja. El bajo rendimiento, tanto de grano como de paja, observado en algunos lotes experimentales, se asoció, en mayor o menor medida, con la sequía que se presentó en ellos.

Relación entre Rendimiento de Maíz y Características y Propiedades del Suelo, Precipitación, Humedad del Suelo y Manejo

La relación entre el rendimiento de grano y de paja de maíz y las características y propiedades del suelo, precipitación, humedad del suelo y manejo del cultivo se estimó mediante una función de producción de manera conjunta para los tratamientos sin y con

fertilizante. En estos términos, las funciones de producción obtenidas para grano y paja son:

- Función de producción para grano:

$$YG = - 869.17 - 393.93 D^{0.25} + 0.86902 (P-16)^{1.5} + 0.83478 (M-0.13) + 171.24 (A-8.6) + 187.61 (H-8.6) + 16.949 (L-16) + 71.384 V + 1.2088 (M-0.13)(P-16)^{1.5}V$$

(CME = 257 161, Pr.F = 0.01, R² = 0.846)

donde: YG es el rendimiento de grano de maíz (kg ha⁻¹), D es la pendiente del suelo (%), P es la profundidad del suelo (cm), M es la materia orgánica del suelo de 0 a 20 cm (%), A es la humedad aprovechable del suelo de 0 a 20 cm (% en peso), H es la humedad disponible media del suelo durante 45 días antes de la floración femenina de 0 a 20 cm (% en peso), L es la precipitación en el primer mes después de la siembra (mm), V es una variable auxiliar para fertilización inorgánica, y los valores numéricos de las variables dentro del paréntesis son los valores mínimos observados de la variable en cuestión. CME = cuadrado medio del error, Pr.F = probabilidad de F, R² = coeficiente de determinación múltiple.

- Función de producción para paja:

$$YP = 121.54 - 1483.2 D^{0.25} + 7.5972 (P-16) + 8.4933 (M-0.13)(P-16) + 493.15 (A-8.6) + 358.49 (H-8.6) + 27.610 (L-16) + 213.99 V + 11.169 (M-0.13)(P-16) V$$

(CME = 665 373, Pr.F = 0.01, R² = 0.871)

donde: YP es el rendimiento de paja de maíz (kg ha⁻¹) y las demás variables son las mismas que para la función de producción de grano.

Las variables que quedaron incluidas en las funciones de producción de grano y de paja son las mismas y, de acuerdo con las funciones, aquellas que afectaron al rendimiento del maíz fueron: pendiente del suelo, profundidad del suelo, interacción entre la profundidad y la materia orgánica del suelo, humedad aprovechable del suelo, humedad disponible del suelo durante 45 días antes de la floración femenina, precipitación en el primer mes después de la siembra, fertilización inorgánica, e interacción entre la profundidad y materia orgánica del suelo y la fertilización inorgánica.

De estas variables interesa el análisis de aquellas que tienen relación con la erosión del suelo, esto es, la pendiente y profundidad del suelo (Cuadro 1), a la vez que la materia orgánica del suelo que, aunque no

presentó relación con la erosión del suelo (Cuadro 1), también se consideró en términos de que esta relación suele presentarse en muchas condiciones, la interacción que resultó entre la materia orgánica y profundidad del suelo, y los valores extremos de la materia orgánica del suelo observados. Por su parte, debido a la interacción entre la materia orgánica y profundidad del suelo y la fertilización inorgánica, el análisis se hace en función de esta fertilización inorgánica.

La pendiente del suelo corresponde a una variable que interviene en la erosión de los suelos con cultivo, como fue en el presente caso (Cuadro 1), y su efecto sobre el rendimiento de los cultivos puede deberse al mayor escurrimiento del agua de lluvia que causa, y, por lo tanto, menor infiltración de ella en el suelo, lo que puede favorecer la deficiencia de agua para los cultivos de temporal en suelos delgados. En el presente caso, la pendiente presentó una correlación negativa con la humedad disponible del suelo durante 45 días antes de la floración femenina (r = -0.530, P = 0.01). Otro posible efecto de la pendiente del suelo puede ser a través de su relación con la erosión, ya que los suelos con mayor pendiente se encontraron más erosionados (Cuadro 1) y, por lo tanto, tendieron a presentar menores valores de materia orgánica (Cuadro 1) y probablemente de fertilidad, como normalmente ocurre.

La profundidad del suelo puede afectar el rendimiento de los cultivos a través de un menor almacenamiento de agua en los suelos delgados. En el presente caso, 35.5% de los suelos tuvieron profundidades mayores que 90 cm, 35.5% entre 46 y 90 cm y 29.0% menores que 46 cm, que se relacionaron con la erosión (Cuadro 1), lo que pudo afectar el rendimiento, aunque no se observó alguna interacción entre la profundidad del suelo y las variables relacionadas con la humedad para el cultivo. Otro efecto de la profundidad del suelo sobre el rendimiento puede deberse a la menor erosión y pérdida de horizontes superficiales en los suelos más profundos y, en consecuencia, a una mayor fertilidad de ellos, puesto que se observó una estrecha relación entre una mayor profundidad del suelo y una menor erosión de éste (Cuadro 1).

Las variables pendiente y profundidad del suelo, que tienen relación con la erosión (Cuadro 1), presentan alguna correlación entre ellas (r = -0.656, P = 0.01), por lo que el hecho de que ambas afecten al rendimiento significaría que este efecto sería a través de mecanismos diferentes.

La interacción positiva entre la profundidad del suelo y la materia orgánica del suelo, mayor en el tratamiento con fertilización, se debería a que la materia orgánica muestra su mayor efecto positivo sobre el rendimiento a medida que la profundidad del suelo se va haciendo mayor y, por lo tanto, menos limitativa.

La fertilización inorgánica, de N, P y K en el presente caso, suele tener efecto sobre el rendimiento de los cultivos en prácticamente todos los suelos, de tal manera que su efecto era esperado, aunado a que muchos de los suelos considerados se encuentran erosionados y son de baja fertilidad; sin embargo, el efecto positivo de la fertilización con N, P y K se manifestó en mayor medida a través de la interacción entre la profundidad y materia orgánica del suelo.

Las demás variables incluidas en las funciones de producción de grano y de paja, como la humedad aprovechable del suelo, la humedad disponible del suelo durante 45 días antes de la floración femenina, la precipitación en el primer mes después de la siembra, aunque afectan el rendimiento del maíz y permitieron el mejor ajuste de las funciones de producción, no presentan relación con la erosión del suelo, por lo cual no se analizarán.

Efecto de Pendiente, Profundidad y Materia Orgánica del Suelo sobre el Rendimiento

A partir de las funciones de producción de grano y de paja, se estimó la reducción del rendimiento del maíz debida a la pendiente, profundidad y materia orgánica del suelo, a sus valores medios por clase de erosión del suelo, y para con y sin fertilización

inorgánica, a los valores medios de las demás variables que se encontrasen incluidas en las funciones de producción (Cuadros 3, 4 y 5). En el caso de la materia orgánica, cuya relación con la erosión es no significativa, se consideraron, además, los valores más altos y más bajos observados en los suelos estudiados, con la finalidad de estimar el efecto potencial de la pérdida de ella sobre el rendimiento del maíz.

El efecto de reducción del rendimiento del maíz de la pendiente del suelo se hace notorio para la pendiente media de 10% de la clase de erosión severa, para la cual, en relación con la pendiente media de 2.1% de la clase de erosión ligera, llega a ser del orden de 29 y 20% para grano y los tratamientos con y sin fertilización, respectivamente; y 35 y 28% para paja y los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.

La disminución de la profundidad del suelo presentó un efecto importante de reducción del rendimiento del maíz, siendo de 53 a 54% y de 85% para la profundidad de 61 y 26 cm de las clases de erosión moderada y severa, respectivamente, con respecto a la profundidad de 99 cm de la clase de erosión ligera, para grano y los tratamientos sin y con fertilización; y para paja, las correspondientes reducciones fueron de 21 a 24% y de 40 a 46% para los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.

El efecto de reducción del rendimiento del maíz de la pérdida de materia orgánica del suelo resultó de ligera magnitud para el contenido medio de 0.80 y 0.65% de las clases de erosión moderada y severa, respectivamente, en comparación con el contenido medio de 0.95% de la clase de erosión ligera, con valores de: para grano, 7 y 13% y 10 y 19% para

Cuadro 3. Reducción estimada del rendimiento de maíz por efecto de la pendiente del suelo, asociada a las clases de erosión del suelo: ligera, moderada y severa.

Pendiente media	Grano			Paja		
	Rendimiento medio	Reducción [†]		Rendimiento medio	Reducción [†]	
%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%
Sin fertilizante						
2.1	774			2415		
3.0	730	44	6	2249	166	7
10.0	547	227	29	1563	852	35
Con fertilizante						
2.1	1149			3019		
3.0	1105	44	4	2852	167	6
10.0	923	226	20	2167	852	28

[†] Reducción con respecto a la clase de erosión ligera.

Cuadro 4. Reducción estimada del rendimiento de maíz por efecto de la disminución de la profundidad del suelo, asociada a las clases de erosión del suelo: ligera, moderada y severa.

Profundidad media cm	Grano			Paja		
	Rendimiento medio kg ha ⁻¹	Reducción [†] kg ha ⁻¹	%	Rendimiento medio kg ha ⁻¹	Reducción [†] kg ha ⁻¹	%
Sin fertilizante						
99	1212			2429		
61	564	648	53	1924	505	21
26	178	1034	85	1459	970	40
Con fertilizante						
99	1896			3264		
61	879	1017	54	2475	789	24
26	275	1621	85	1748	1516	46

[†] Reducción con respecto a la clase de erosión ligera.

Cuadro 5. Reducción estimada del rendimiento de maíz por efecto de la pérdida de materia orgánica del suelo, asociada a las clases de erosión del suelo: ligera, moderada y severa, y valores extremos de ella.

Materia orgánica media %	Grano			Paja		
	Rendimiento medio kg ha ⁻¹	Reducción [†] kg ha ⁻¹	%	Rendimiento medio kg ha ⁻¹	Reducción [†] kg ha ⁻¹	%
Sin fertilizante						
0.95	715			2083		
0.80	668	47	7	2017	66	3
0.66	624	91	13	1955	128	6
1.60	918			2370		
0.20	480	438	48	1752	618	26
Con fertilizante						
0.95	1158			2774		
0.80	1043	115	10	2620	154	6
0.66	936	222	19	2477	297	11
1.60	1656			3438		
0.20	583	1073	65	2007	1431	42

[†] Reducción con respecto a: la clase de erosión ligera; y entre el valor máximo y mínimo de materia orgánica observados.

ambos tratamientos de fertilización, respectivamente; y, para paja, 3 y 6% y 6 y 11% para los mismos tratamientos de fertilización, respectivamente.

La variación del contenido medio de materia orgánica entre las clases de erosión resulta ser del orden de 0.15%, lo que, en gran parte, puede explicar la baja reducción del rendimiento debido a su pérdida por la erosión. Sin embargo, al considerar los valores extremos de disminución de materia orgánica del suelo, del orden de 1.60 a 0.20%, la reducción fue de: para grano, 48 y 65% para ambos tratamientos de fertilización, respectivamente; y, para paja, 26 y 42% para los mismos tratamientos de fertilización, respectivamente.

El efecto de la erosión sobre las características y propiedades del suelo, y de reducción del rendimiento de los cultivos, se ha reportado en numerosos trabajos en el mundo y también, aunque en menor medida, en México, como se mencionó previamente,

observándose diferencias de acuerdo con las condiciones propias de cada caso. En los aspectos en que existen menos resultados reportados es sobre las características y propiedades del suelo que son afectadas por la erosión, que pueden explicar el efecto de reducción del rendimiento de los cultivos de ésta. En el presente caso, el efecto de reducción del rendimiento del maíz por la erosión en la zona de Yanhuitlán, región Mixteca Oaxaqueña, se debería fundamentalmente a la disminución de la profundidad del suelo que ha originado, en cambio no se debería a la ligera pérdida de la materia orgánica. Por su parte, el efecto de reducción del rendimiento del maíz de la pendiente del suelo, que es causal de la erosión y se asoció con ella, tendría una explicación propia a través de reducir la infiltración de agua en el suelo o indirecta a través de su asociación con una menor fertilidad de los suelos más erosionados.

De acuerdo con la importancia que tienen las variables profundidad y pendiente del suelo, asociadas con la erosión, en el rendimiento del maíz en los suelos con cultivo en el área del municipio de Yanhuatlán, región Mixteca de Cárdenas, una medida sería evitar la siembra en terrenos con pendientes elevadas; sin embargo, ante la necesidad que muchos productores tienen de sembrarlos, debido a su escasez de tierra, sería necesario implementar la práctica de construcción de terrazas, que muchos productores ya han desarrollado. No obstante, esto requeriría de un programa de apoyo a los productores con menor disponibilidad de tierra debido a que usualmente realizan actividades extrapredio o no disponen del capital que implicaría la construcción de terrazas.

CONCLUSIONES

- La pendiente media del suelo, relacionada con las clases de erosión ligera con 2.1%, moderada con 5.0%, y severa con 10.0%, causó reducciones del rendimiento de maíz de ésta última con respecto a la primera, de 29 a 20% para grano y de 35 a 28% para paja, para los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.
- La disminución de la profundidad media del suelo, en relación con las clases de erosión ligera con 99 cm, moderada con 61 cm, y severa con 26 cm, llegó a ser del orden de: para grano, 53 a 54% y 85%, y, para paja, 21 a 24% y 40 a 46%, para las clases de erosión moderada y severa, respectivamente, y los tratamientos sin y con fertilización.
- La materia orgánica del suelo presentó un efecto ligero sobre el rendimiento del maíz, de acuerdo con sus valores medios en las clases de erosión moderada de 0.80%, y severa de 0.66, en relación con un valor medio de 0.95% de la clase ligera, aunque al considerar los valores extremos de materia orgánica observados, de 1.60 y 0.20%, se estimó un efecto de reducción de 48 a 65% para grano y de 26 a 42% para paja, para los tratamientos sin y con fertilización.
- Considerando la presencia de erosión de ligera a severa en el área del municipio de Yanhuatlán, y el efecto de ésta sobre en especial la profundidad y el contenido de materia orgánica del suelo, se observa el gran efecto que ella puede tener sobre el rendimiento del maíz.

LITERATURA CITADA

- CSTPA (Council on Soil Testing and Plant Analysis). 1980. Handbook on reference methods for soil testing. Athens, GA.
- Dregne, H.E. 1987. Soil erosion: cause and effect. Land Use Policy 4: 412-418.
- Dregne, H.E., M. Kassas y B. Rosanov. 1991. A new assessment of the world status of desertification. UNEP Desertification Control Bull. 20: 6-18.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- Frausto-Reyes, J.V., V. Volke-Haller, B. Figueroa-Sandoval, N. Estrella-Chulín y H. Vaquera-Huerta. 1991. Estimación de la erosión hídrica laminar. Caso: Paraje Zaayucuanino, del Distrito de Nochixtlán, Oax. Agrociencia, Serie Agua-Suelo-Clima 2(3): 83-96.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Cuarta edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- González-Mateos, R., C.A. Ortiz-Solorio, V. Volke-Haller, J. González-Ríos y F. Manzo-Ramos. 2003. Conocimiento local de pequeños productores sobre la erosión del suelo en el Ejido El Tomatal, Guerrero, México. Terra 21: 245-258.
- Huitzhunsen, F.J. 1993. Land degradation and sustainability of agricultural growth: some economic concepts and evidence from selected developing countries. Agric. Ecosyst. Environ. 46: 69-79.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1981. Carta Edafológica: México. Escala 1:1 000 000. pp. 152-169. In: Atlas Nacional del Medio Físico. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1994. XI Censo de Población y Vivienda, 1990. Resumen General. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) – SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1998. Estadísticas del medio ambiente. México, 1997. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas). 1984. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del Campo Experimental Mixteca Oaxaqueña. Nochixtlán, Oaxaca, México.
- Kidd, C. y D. Pimentel. 1992. Integrated resource management. Academic Press. New York.
- López-Martínez, J. y M. Anaya-Garduño. 1994. Efecto de tres prácticas agronómicas sobre la conservación y productividad de suelos de ladera de La Fraylesca, Chiapas. Agric. Téc. en México 20: 113-132.
- María-Ramírez, A. y V. Volke-Haller. 1999. Estratificación del potencial productivo del maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala. Terra 17: 131-138.
- Martínez-Calleja, M.D., E. Sierra-Cortés, G. Narváez-Carbajal, J.W. Estrada-Berg, N. Ramírez-Pérez, M. Vázquez-Guzmán y J. Romero-Peñaloza. 1986. Levantamiento fisiográfico y evaluación de la erosión de las Mixtecas Oaxaqueñas Alta y Baja. Universidad Autónoma Chapingo-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Chapingo, estado de México.
- Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Trad. al español por P. Urbano-Terrón y J. de M. Urbano-López de Meneses. Mundi-Prensa. México, D.F.

- Pérez-Nieto, J., V. Volke-Haller, M. Martínez-Menes y N. Estrella-Chulín. 1998. Erosión, productividad y rentabilidad de dos suelos del estado de Oaxaca. *Agrociencia* 32: 113-118.
- Romero-P., J., L. García-B., D. Martínez-C., J.C. Ramírez-G. y C. Ramírez-M. 1986. Diagnóstico de la producción agrícola de las Mixtecas Oaxaqueñas Alta y Baja. *Rev. Chapingo* 50-51: 52-57.
- SAS Institute, Inc. 1982. SAS User's guide: statistics. Cary, NC.
- Uribe-Gómez, S., N. Francisco-Nicolás y A. Turrent-Fernández. 2002. Pérdida de suelo y nutrimentos en un Entisol, con prácticas de conservación en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia* 36: 161-168.
- USDA (United States Department of Agriculture) – SCS (Soil Conservation Service). 1990. Soil erosion by water. *Agriculture Information Bulletin* 513. Washington, DC.
- Villar-Sánchez, B., J. López-Martínez, J. Pérez-Nieto y R. Camas-Gómez. 2003. Aplicación del modelo de simulación EPIC en la predicción del efecto de sistemas de labranza del suelo. *Terra* 21: 381-388.