

PÉRDIDA DE SUELO, AGUA Y NUTRIENTES EN UN ACRISOL BAJO DIFERENTES SISTEMAS AGRÍCOLAS EN MICHOACÁN, MÉXICO*

SOIL, WATER AND NUTRIENT LOSSES IN AN ACRISOL UNDER DIFFERENT AGRONOMIC SYSTEMS IN MICHOACAN, MEXICO

Lenin Ejecatl Medina Orozco^{1§}, Miguel Bravo Espinosa², Christian Prat³, Mario Martínez Menes⁴, Enrique Ojeda Trejo⁴ y Blanca Estela Serrato Barajas²

¹Facultad de Biología, Laboratorio de Edafología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Av. Fco. J. Múgica S/N C. P. 58030, Morelia, Michoacán, México. ²Campo Experimental Uruapan, INFAP, ³IRD-Francia. ⁴Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. [§]Autor para correspondencia: leninmed@gmail.com

RESUMEN

Los productores agrícolas de la porción alta de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, usan el sistema denominado “año y vez” (AV), que es una rotación maíz-descanso, la cual consiste en la producción de maíz durante un ciclo y en el posterior la tierra permanece en descanso para el pastoreo del ganado. Este sistema se practica en Andosoles y Acrisoles principalmente, y se asume que está asociado con la degradación del suelo por su bajo nivel de reciclamiento de nutrientes y por el laboreo excesivo durante el año de cultivo. El objetivo de este trabajo fue medir las pérdidas de suelo, escurrimiento y nutrientes para la rotación “año y vez” (AV) y dos sistemas alternativos: tradicional mejorado (TM) y orgánico (O). La investigación se desarrolló en un Acrisol de la subcuenca de Cointzio durante tres ciclos de cultivo bajo condiciones de temporal, en parcelas de escurrimiento de 1 000 m² sin repeticiones. Los resultados indicaron que todos los sistemas presentaron pérdidas de suelo permisibles (<1.2 t ha⁻¹ año⁻¹), excepto en TM y O en el año 2002 cuando la cobertura vegetal fue menor de 20%; sin embargo, bajo el sistema AV hubo un aumento significativo en el escurrimiento y con ello mayores pérdidas de nutrientes durante el año de descanso, causados por un aumento en la densidad aparente de la superficie del suelo, cambio que no se presentó en O y TM, quizás por el efecto del laboreo del suelo. Las principales fugas nutrimentales en los tres

tratamientos fueron: N, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺. Lo anterior sugiere que el sistema AV tiene mayor efecto de degradación en el año de descanso que durante la fase de cultivo. Las mejores prácticas para reducir las pérdidas de agua, suelo y nutrimentos fueron: cultivos tupidos (avena), y el uso de residuos de cosecha como cobertura del suelo (30% de cobertura), este último disminuyó además significativamente la evaporación. Un análisis de la pérdida de suelo a nivel de subcuenca en Acrisoles, mostró que es posible reducir la erosión de manera significativa utilizando cubiertas de residuos de cosecha en la producción de cultivos TM.

Palabras clave: degradación, dinámica de nutrimentos, rehabilitación, sostenibilidad.

ABSTRACT

In the upper part of Cuitzeo Lake watershed, Michoacan, Mexico, farmers use a traditional short-fallow production system. With this system, land is sown one year, and left without cultivation from one to three years for grazing. This system is used mainly on Andisols and Acrisols, and it is supposed to be associated with soil degradation due to low nutrient recycling level and to excessive tillage during the

* Recibido: Febrero de 2006
Aceptado: Enero de 2007

cultivation year. The objective of this study was to measure soil, nutrient and runoff losses under the traditional short-fallow system (AV), and under two alternatives systems: organic (O), and improved traditional (TM) systems. Research was carried out on an Acrisol in the Cointzio sub-watershed, during three years under rainfed conditions on 1 000 m² runoff plots without replications. Results showed that soil losses under all systems were permissible (< 1.2 t ha⁻¹ year⁻¹), except in TM and O in 2002 when the plant coverage was less than 20%, with a significant increase of runoff and nutrient losses when land was left on fallow due to soil surface bulk density increase. This change did not occurred with the O and TM systems, perhaps due to soil tillage effect. Main nutrient losses in the three treatments were: N, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, and K⁺. Above mentioned results suggests that soil degrading effect, under the AV system, is more intense on soils when they are left on fallow than when those are cultivated. Best practice for reducing water, soil, and nutrient losses were: dense crops such as oats, and the use of crop residue cover (30% cover), the last one was also the best management for decrease evaporation. An analysis of soil losses to sub-basin level showed that erosion can be reduced significantly by using crop residues as mulch during crop production (TM).

Key words: degradation, nutrient loss, rehabilitation, sustainable.

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo por erosión acelerada es un serio problema en regiones tropicales y subtropicales, donde el manejo del suelo se realiza con prácticas tradicionales; la degradación del suelo tiene impactos a corto y largo plazo en la producción de alimentos, calidad del ambiente, político y económico (Lal, 2001). Para responder al problema de erosión, se deben proponerse alternativas de manejo agroecológico del suelo, que propicien una producción sustentable con mínimos riesgos al ambiente (Lal, 2000; Norton *et al.*, 2003).

En Michoacán el maíz se siembra en 525 000 ha, de las cuales 69% son de temporal con rendimiento que varía de 0.99 a 2.47 t ha⁻¹ (Romero *et al.*, 2001). El cultivo en laderas se realiza bajo el sistema tradicional denominado “año y vez”, que consiste en sembrar un año y dejar uno a tres años sin siembra para ser usadas como tierras de pastoreo extensivo. Se ha documentado el efecto negativo que causa la rotación

año y vez en suelos Andosoles y los beneficios de adopción de la labranza de conservación con uso de residuos de cosecha, la cual disminuye considerablemente las pérdidas de suelo y del escurrimiento (Tiscareno *et al.*, 1999; Tapia *et al.*, 2002). Sin embargo, no se cuenta con información del efecto de este sistema agrícola en Acrisoles ni de las ventajas de los sistemas alternativos de manejo de suelo. Además, no se ha probado que los sistemas de manejo que han resultado satisfactorios en Andosoles, sean adecuados para otras clases de suelos.

En la subcuenca de Cointzio perteneciente a la porción alta de la cuenca de Cuitzeo, donde es común la rotación año y vez en Acrisoles o suelos de “Charanda” (33% del área) y donde se presenta la mayor degradación por cárcavas (López *et al.*, 2006). Los escurrimientos de la subcuenca fluyen a la presa Cointzio que suministra de agua potable a la ciudad de Morelia y riego atierras de cultivo en el Valle Morelia-Queréndaro; actualmente la presa cuenta con más de 60 años de servicio por lo que el azolve es considerable (Romero *et al.*, 2001). El objetivo de este trabajo fue determinar las pérdidas de suelo, escurrimiento y nutrimentos en el sistema de rotación año y vez y dos sistemas alternativos: tradicional mejorado (TM) y orgánico (O).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se estableció en una ladera de la subcuenca de Cointzio, en la localidad de la Ciénega 2, municipio de Morelia en el estado de Michoacán, durante tres ciclos de cultivo bajo condiciones de temporal, sin repeticiones en parcelas de escurrimiento de 1 000 m². El sitio experimental se encuentra a una altitud de 2 270 msnm entre los 19° 35' 19.8" latitud norte y 101° 12' 20" latitud oeste (Figura 1). La precipitación media anual oscila entre los 800 y 1000 mm. De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1987), el clima es templado, temperatura media anual entre los 12 y los 18 °C, con poca oscilación térmica; sub-húmedo con lluvias en verano, donde el invierno muestra menos de 5% de las lluvias, presenta sequía intraestival [Cb (w₁) (w) (i')g]. El suelo es un Acrisol (INEGI, 1982) con reacción ácida, textura arcillosa y bajo contenido de nutrientes (Cuadro 1).

Se compararon tres sistemas de manejo agrícola sin repeticiones: a) rotación año y vez, consistió en dejar sin siembra el suelo durante 2002-2004 y se cultivó con avena durante 2003, para lo que se efectuó un barbecho y un paso



Figura 1. Localización del área de estudio.

Cuadro 1. Características del suelo al inicio del experimento en la capa superficial (10 cm).

Físicas		Químicas	
Arena gruesa 2.0-0.2mm (%)	2.4	pH (1:2 en agua)	4.98
Arena fina 0.2-0.02mm (%)	5.7	Materia orgánica (%)	2.2
Limo grueso 0.02-0.005mm (%)	6.1	Nitrógeno total (%)	0.11
Limo fino 0.005-0.002mm (%)	15.9	P-Bray (mg kg ⁻¹)	traza
Arcilla <0.002mm (%)	69.9	K (mg kg ⁻¹)	0.13
Clase textural	Arcillosa	Ca (mg kg ⁻¹)	5.71
Densidad aparente (g cm ³)	1.12	Mg (mg kg ⁻¹)	2.29
		Mn (mg kg ⁻¹)	111.4
		Fe (mg kg ⁻¹)	12.21
		Zn (mg kg ⁻¹)	0.38
		Cu (mg kg ⁻¹)	0.25

de rastra (ambos con tractor); el control de maleza fue con herbicidas, b) tradicional mejorado (TM), incluyó la secuencia haba-avena-maíz-frijol; la labranza para haba fue con un barbecho, rastra, surcado y una escarda; para avena se

usó barbecho y rastra, y para maíz-frijol la labranza consistió en aplicar residuos de cosecha como cobertura del suelo (>30% ≈ 4 t ha⁻¹) y reducir las labores de labranza (barbecho y rastra), el deshierbe fue manual cuando fue requerido y c) orgánico (O) que también incluyó la secuencia haba-avena-maíz-frijol; en todos los cultivos se usaron fuentes de fertilización orgánicas: estiércol bovino (N 161.8, P 22.8 y K 63.8 t ha⁻¹), gallinaza (N 34.6, P 22.4 y K 22.4 t ha⁻¹) y compostas; la labranza para haba y avena fue similar a TM, y para maíz-frijol fue barbecho-rastra-surcado-escarda (Cuadro 2).

Los sistemas de manejo (tratamientos) fueron evaluados en parcelas de escurrimiento de 1 000 m², equipadas con vertedores tipo H (descarga máxima de 56.6 L s⁻¹) y limnigrafos tipo Thalimedes instalados en la salida de cada parcela. La colecta del escurrimiento y los sedimentos se realizó con un sistema de doble tanque; el primer tanque, con una capacidad de almacenamiento de 1 750 L, de forma semicilíndrica metálico, recibió a través de tubos PVC el escurrimiento de los vertedores; el segundo tanque con capacidad de 450 L, retuvo un porcentaje conocido del escurrimiento cuando la cantidad de agua excedió el volumen del primer depósito.

Posterior a cada lluvia se colectaron dos grupos de muestras de 1 L en frascos de plástico de los tanques de almacenamiento; un primer grupo fue utilizado para determinar la concentración de sedimentos (mg L⁻¹) por evaporación en estufa a 105 °C por 24 h. Al segundo grupo se le adicionó cloroformo (1% Vol.) inmediatamente después de colectarlo y almacenado a 4 °C hasta su análisis químico (Gardolinski *et al.*, 2001); el número de muestras fluctuó entre dos y cuatro según ameritó el caso.

Adicionalmente se tomaron muestras de agua de la lluvia y se analizaron para tener un punto de comparación respecto

Cuadro 2. Tratamientos agrícolas y rotaciones de cultivo aplicados en las parcelas experimentales.

Manejo Agrícola	Fertilización N-P (kg ha ⁻¹)/Abonos orgánicos (t ha ⁻¹)			Cultivo		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004
AV	00-00-00	60-40-00	00-00-00	D	A	D
TM	60-96-40	80-40-00 +4 (R)	140-100-00 +4 (R)	H+V	A+V	M+F
O	15 (CF)	15 (C)	10 (C) + 2 (G)	H	A	M+F

CF= estiércol bovino; C= composta; G= gallinaza; R= cobertura de residuos de trigo 4 t ha⁻¹; D= sin siembra; A= avena; H= haba; M= maíz; F= frijol.

al agua del escurrimiento. Los análisis químicos consistieron básicamente en medir las formas solubles de N-NH_4^+ , N-NO_3^- y cationes de intercambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+), de acuerdo con los protocolos de los equipos usados (Technicon Autoanalizador III de Bran+Lubbe y Perkin-Elmer).

La cobertura vegetal se midió periódicamente para explicar la erosión. En 2002 se utilizó un bastidor rectangular equipado con mirillas equidistantes de 10 cm que cubrieron 2 m² de terreno (Stocking, 1988), en los siguientes años se midió usando fotografías a color tomadas con cámara digital y analizadas con un Sistema de Información Geográfica (SIG), ILWIS (The Integrated Land and Water Information System).

El balance de agua se realizó en 2003-2004 para determinar la distribución de agua en el suelo de los manejos agrícolas evaluados; los componentes considerados fueron: lluvia, escurrimiento, evapotranspiración (ET) e infiltración. La entrada (lluvia) se midió con un pluviógrafo equipado con un sistema de almacenamiento de información tipo HOBO; el escurrimiento se midió directamente con el sistema de vertedor-Thalimedes, la evapotranspiración (ET) fue estimada con el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). La infiltración fue estimada como el valor residual de restar el escurrimiento y la *Et al* volumen de agua precipitada.

La productividad de los cultivos se calculó tomando muestras en subparcelas de 13 m² en cada tratamiento; la producción de haba no se evaluó porque presentó un grave daño por ataque de hongos que no permitió realizar una adecuada estimación de la biomasa. Finalmente, para predecir la erosión del suelo a nivel de subcuenca se

evaluaron los manejos AV y TM tomando los resultados de 2004 y aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) dentro del contexto del SIG-ILWIS, según rutina propuesta por Toxopeus (1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lluvia

El 80% de la precipitación se concentró en junio-septiembre y los meses de mayor precipitación ocurrieron en el trimestre julio-septiembre (Cuadro 3). El 75% de los eventos ocurridos fueron de baja intensidad < 25 mm h⁻¹, de acuerdo con la clasificación de lluvias erosivas propuesto por Hudson (1982).

Pérdida de suelo y escurrimiento superficial

En promedio, la rotación menos erosiva fue AV (0.90 t ha⁻¹ año⁻¹) y las más erosivas fueron las secuencias incluidas en TM (4.34 t ha año) y O (4.52 t ha año). Sin embargo, el volumen escurrido fue mayor para AV, respecto de TM y O, (Cuadro 4). Lo anterior sugiere que la rotación AV es poco erosiva, pero aporta volúmenes significativamente mayores de escurrimiento siendo potencialmente más eficiente para generar daños externos como podría ser la formación de cárcavas fuera de parcela. Ziegler *et al.* (2004) documentaron que las áreas en descanso producen incrementos desproporcionados de escorrentía, en comparación con suelos roturados.

Un análisis anual de erosión y escurrimiento mostró que en 2002 el tratamiento AV fue poco erosivo, pero generó un

Cuadro 3. Precipitaciones históricas mensuales (mm) de la estación Cointzio, Michoacán y la ocurrida en La Ciénega 2 durante el período de crecimiento y para el período de estudio.

Meses	Cointzio			Ciénega 2		
	Media, 1940-2004	Máxima histórica, 1958	Mínima histórica, 1946	Año		
				2002	2003	2004
Jun.	146.8	205.5	114.4	185.0	149.5	207.0
Jul.	178.1	322.2	109.6	180.4	205.6	145.6
Ago.	167.3	252	114.5	208.2	176.6	238.6
Sep.	143.9	239.7	91.7	206.4	107.8	201.4
Oct.	61.7	95.0	71.3	63.2	34.3	82.8
Total período	697.8	1114.4	501.5	843.2	673.8	875.4
Total anual	813.4	1392.8	564.6	899.3	725.0	1001.0

Cuadro 4. Pérdidas de suelo, escurrimiento y coeficiente para tres rotaciones de cultivo. Cointzio, Michoacán.

Cultivo-año	Lluvia mm	Tratamientos								
		AV			TM			O		
		PS	E	CE	PS	E	CE	PS	E	CE
H-2002	889.3	0.80a	54 ^a	0.06	12.40b	41b	0.05	12.90b	50b	0.06
A-2003	731.6	0.39ns	38 ^a	0.05	0.56ns	70b	0.09	0.38ns	50c	0.07
MF-2004	1001.0	1.50b	107 ^a	0.11	0.16a	19b	0.02	0.28a	13b	0.01
R (2002-2004)	2621.9	2.70a	199 ^a	0.22	13.12b	130ab	0.16	13.56b	113b	0.14
Promedio		0.90	66.3	0.07	4.37	43	0.05	4.52	38	0.05

PS= pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$); E= escurrimiento (mm); CE= coeficiente de escurrimiento ($mm\ mm^{-1}$). Letras diferentes entre tratamientos (filas) indican diferencia significativa al nivel de 0.05 de probabilidad, Tukey.

escurrimiento significativamente mayor que TM y O, estos últimos estadísticamente iguales en cuanto a la pérdida de suelo y escurrimiento. Los valores altos de pérdida de suelo en TM y O (12.4 y 12.9 respectivamente) se explican porque el cultivo de haba presentó una cobertura vegetal pobre (<20%), originado por el ataque de hongos (en raíz por *Rhizoctonia* sp. y en hojas y tallos por *Phoma* sp. y *Alternaria* sp.) que redujeron drásticamente la biomasa aérea del cultivo de haba. Lo anterior sugiere que estos suelos son fácilmente erosionables cuando presentan una cobertura vegetal escasa.

En 2003, con cultivo de avena, la diferencia en pérdida de suelo entre los tratamientos no fue significativa. Los tres tratamientos disminuyeron apreciablemente la PS con respecto al año precedente. El escurrimiento observado en los tres tratamientos fueron estadísticamente diferente en el siguiente orden de mayor a menor TM>O>AV, explicado por el desarrollo de la cobertura vegetal que también fue estadísticamente diferente, siendo AV el que presentó mayor cobertura. Entre O y TM no se observó diferencia significativa pero fue ligeramente mayor O que en TM. La diferencia en el desarrollo del cultivo probablemente fue causado por el tipo de fertilización. Bolleta *et al.* (2003) encontraron un mayor número de plantas y macollos en avena estadísticamente significativo con fertilización química de N y P que en fertilización orgánica.

En 2004, el tratamiento AV incrementó la PS y el CE, por el contrario, TM y O disminuyeron tanto la PS como el CE. El incremento en pérdida de suelo y escurrimiento en AV durante el último año de la evaluación fue posiblemente causado por el incremento significativo en la densidad

aparente del suelo en los primeros 5 cm, (Cuadro 5). Este resultado sugiere que los Acrisoles tienden compactarse cuando se dejan sin siembra y bajo pastoreo. Rachman *et al.* (2003) reportaron que los suelos arcillosos tienden a aumentar su densidad aparente conforme se reducen las labores de labranza, y observaron la siguiente relación: trigo>maíz>rotación, aunque este efecto es temporal, ya que la densidad se reduce cuando se laboreo el suelo. Resultados similares mencionan Lado *et al.* (2004), en suelos donde predomina la arcilla de tipo esmectica.

Cuadro 5. Densidad aparente del suelo para tres profundidades y tres tratamientos, Cointzio, Michoacán. 2004.

Profundidad (cm)	Tratamiento		
	AV	TM	O
0-5	1.37a	1.15b	1.17b
5-10	1.14 ns	1.18 ns	1.07 ns
10-15	1.16 ns	1.03 ns	1.04 ns

Letras diferentes entre tratamientos (filas) indican diferencias significativas al nivel de 0.05 de probabilidad Tukey.

Los valores de pérdida de suelo y escurrimiento localizados en este estudio fueron en comparación con los reportados para otras regiones de México, excepto para TM y O en 2002, cuando la cobertura vegetal fue menor a 20%. Tapia-Vargas *et al.* (2000) documentaron pérdida de suelo de $2.7\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ y coeficiente de escurrimiento de 0.20 en agricultura tradicional de año y vez en Andosoles de la cuenca de Pátzcuaro, y PS de $0.3\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ y CE de 0.06 para agricultura de conservación con uso de residuos como cobertura al suelo. Ramírez-Cruz

y Oropeza-Mota (2001) reportaron PS de 2.7 t ha⁻¹ año⁻¹ y CE de 0.26 para la agricultura tradicional practicada en la región de La Fraylesca, Chiapas, mientras que en la agricultura de conservación la PS y CE fueron de 0.26 y 0.16, respectivamente. Resultados similares fueron mencionados por Maass *et al.* (1988) en los Tuxtles, Veracruz, donde la PS en agricultura tradicional fue de >40 t ha⁻¹ año⁻¹, sin reportar los coeficientes de escurrimiento. Lo anterior sugiere que las prácticas de conservación de suelos disminuyen la pérdida de suelo y el escurrimiento. Es importante señalar que las diferencias entre los resultados obtenidos comparados con los reportados por otros investigadores, puede ser efecto del tamaño de parcela; todos los trabajos referidos se realizaron en parcelas con dimensiones menores o iguales a 100 m². Se ha observado que la magnitud del escurrimiento y erosión, decrece con el incremento del área, debido a la diferencia del tiempo para que ocurran los procesos de infiltración y depositación (Lal, 2001).

Adicionalmente se analizó un grupo de hidrogramas generados durante una lluvia ocurrida el 26 de junio de 2004, 18 días después de la siembra (Figura 2). La tensión del agua en el suelo fue medida un día antes de la lluvia con un valor de 0 kPa; la lluvia acumulada en los 5 días previos al evento fue de 31.4 mm, que originó la condición de saturación en el suelo. La cobertura vegetal determinada antes del evento fue de 76% para AV, de TM de 56% y O de 24%.

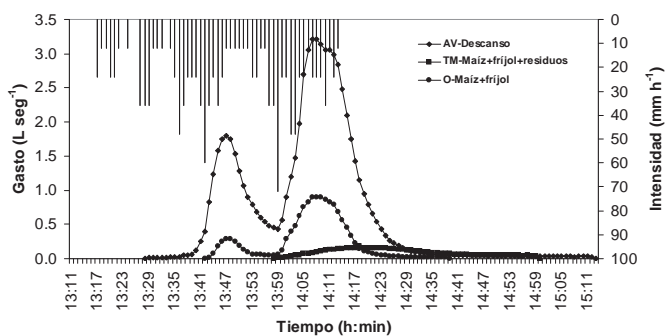


Figura 2. Hidrogramas generados en una lluvia bajo tres manejos de suelo.

En el Cuadro 6 se presentan las características de los hidrogramas. Los resultados comparativos en cuanto a gasto máximo o gasto pico, se refieren únicamente al segundo pico que fue el más importante.

Los resultados anteriores sugieren que el año sin siembra de la rotación AV responde rápidamente en la generación del escurrimiento, 13 min después del inicio de lluvia, fue el que generó mayor escurrimiento (3.9 mm), y mostró alta

Cuadro 6. Características de lluvia del 28-jun-2004 y flujo superficial generado.

Parámetro	Tratamiento		
	AV	TM	O
Lluvia (mm)	-	22	-
Intensidades máximas (mm hr ⁻¹)	-	-	-
I ₅ I ₁₀ I ₁₅ I ₃₀		43.2 34.8 31.2 28.4	
Inicio y final de la lluvia (min:h)	-	13:17-14:13	-
Inicio del escurrimiento (min)	13:29	13:58	13:43
Duración del escurrimiento (min)	103	60	55
Lámina escurrida (mm)	3.9 a	0.4 b	0.8 c
Coefficiente de escurrimiento	0.17	0.02	0.04
Tiempo al pico (min)	38	19	24
Gasto pico (L seg ⁻¹)	3.2	0.2	0.9
Lámina de la curva ascendente (mm)	15.1	1.9	4.4
Lámina de la curva descendente (mm)	33.8	3.5	7.5

Letras diferentes entre tratamientos para la lámina escurrida indican diferencias significativas al nivel de 0.05 de probabilidad para una prueba de Tukey. AV= año y vez; TM= tradicional mejorado; O= orgánico.

sensibilidad a los cambios en la intensidad de lluvia. El manejo del MF sin residuos de cosecha (O) presentó la misma sensibilidad que el año sin siembra (AV) a los cambios de intensidad, pero generó volumen significativamente menor (0.8 mm) y mayor capacidad para retardar el inicio del escurrimiento (26 min después del inicio de lluvia).

El manejo del MF con residuos de cosecha (TM) presentó la menor sensibilidad a cambios en la intensidad de lluvia, retuvo el flujo superficial por mayor tiempo (41 min) y redujo significativamente el volumen escurrido (0.4 mm) con respecto al año de descanso (AV) y O, representando la mejor alternativa de manejo para disminuir la pérdida de suelo y escurrimiento; lo anterior sugiere que el uso de residuos de cosecha juega un papel importante en el flujo de agua superficial; el uso de residuos ha sido ampliamente estudiado en este sistema de "año y vez" en Andosoles y se han visto sus bondades (Tiscareño *et al.*, 1999). Es probable que las ventajas del uso de residuos extrapoladas a una cuenca con este manejo agrícola, reduzcan los riesgos de inundación de las partes bajas, como ocurre en el caso de la ciudad de Morelia.

Balance hídrico

En el Cuadro 7 se muestra el balance de agua para 2003 (cultivo de avena), donde se observó que el escurrimiento representó un porcentaje muy bajo de las salidas de

agua del sistema (<10%), y que la evapotranspiración (ET) fue la forma más importante de salida de agua (34.8%). Por su parte las variaciones en la infiltración (55.2% - 60.1%), dependieron principalmente de las diferencias en la producción del escurrimiento para cada tratamiento.

Cuadro 7. Balance de agua para dos años de estudio y cuatro tratamientos bajo estudio.

	Tratamiento	Lluvia		Escurrecimiento		Evapotranspiración		Infiltración	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
2003	AV			38	(5.1)	256	(34.8)	438	(60.1)
	TM	731.6		70	(9.5)	256	(34.8)	406	(55.7)
	O			50	(6.9)	256	(34.8)	426	(58.3)
2004	AV			107	(10.7)	308	(30.7)	586	(58.6)
	TM	1001.0		19	(1.9)	257	(25.2)	725	(72.9)
	O			13	(1.3)	356	(35.6)	632	(63.1)

El balance de agua para 2004 fue más variable que 2003, causado probablemente por diferencias en el manejo del suelo y vegetación. En general, el escurrimiento fluctuó entre 10.7 y 1.3% del agua precipitada, la evapotranspiración representó entre el 25.2 y 35.6% de ésta, y la infiltración constituyó más de 60% del agua precipitada. Con el descanso (AV) ocurrió el mayor escurrimiento pero se redujo la evapotranspiración en 5%, en relación con MF bajo O y fue ligeramente mayor que en MF con manejo TM; sin embargo, en este caso particular, el factor Kr (factor de corrección de la ET de referencia) del modelo Penman-Monteith, puede no ser el más adecuado, debido a que no se han reportado datos para los tipos de composición florística de terrenos en descanso. El tratamiento TM, presentó los valores más bajos de ET y escurrimiento, lo que sugiere que los residuos de cosecha favorecen la infiltración y reducen la evaporación, comparado con AV y O.

Pérdida de nutrientes

En el Cuadro 8 se muestran los resultados obtenidos del pH del agua de lluvia y de escurrimiento. Los valores medios de pH del escurrimiento fueron ligeramente más ácidos en 2002 con valores de 5.5 y 6.0; en general la variabilidad interanual entre tratamientos del pH fue mínima. Comparado con el pH del agua de lluvia que fue significativamente más ácida, lo que sugiere que el agua de lluvia al entrar en contacto con el cultivo y suelo obtiene sales que neutralizan su pH.

El nitrógeno del agua de escurrimiento y de lluvia, fue medido para 2003 y 2004. Los resultados muestran que el $N-NH_4^+$ y

Cuadro 8. Modificaciones del pH del agua de escurrimiento y lluvia para 2002, 2003 y 2004 y tres tratamientos agronómicos.

Año	Tratamientos			
	AV	TM	O	Lluvia
2002	6.0±0.03 ns	5.5±0.80 ns	6.0±0.80 ns	ND [†]
2003	6.5±0.40 a	6.6±0.10 a	6.7±.26 a	4.9±0.70 b
2004	6.6±0.40 a	6.3±0.31 b	6.1±0.30 a	5.7±0.80 c
Rotación	6.36	6.13	6.26	5.3

[†]ND= no determinado. Letras iguales entre tratamientos (filas) indica que no hay diferencias significativas a un nivel de 0.05 de probabilidad para una prueba de Tuckey. AV= año y vez; TM= tradicional mejorado; O= orgánico.

el $N-NO_3^-$ no varían de manera importante entre tratamientos, teniendo rangos de concentraciones para $N-NH_4^+$ de 0.5 a 0.6 $mg L^{-1}$; 2003 y de 0.9 a 1.4; 2004; respecto al $N-NO_3^-$, los rangos de valores fueron de 0.1 a 0.2 en 2003 y de 0.3 a 0.6 en 2004. Por su parte, las concentraciones en el agua de lluvia fueron dos veces menores que las concentraciones en el agua del escurrimiento, lo que sugiere un lavado de estas formas del N del suelo (Cuadro 9). Durante 2004 los valores mayores de $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, se explican porque se aumentaron las dosis de fertilización de nitrógeno, y también por un aumento en la concentración $N-NH_4^+$ en al agua de lluvia, dichas concentraciones promedio fueron de 0.34 en 2003 y 0.51 en 2004.

La concentración de cationes en al agua de escurrimiento con respecto al agua de lluvia presenta un incremento, principalmente de K^+ y de Ca^{2+} , (Cuadro 9) el catión que presentó menor incremento fue Mg^{2+} , contrario a lo que sucede en bosques de Quercus donde este catión es el que más se pierde y además neutraliza el pH del agua de lluvia (Gallardo-Lancho, 2000). En términos generales, el tratamiento O fue el que mayor concentración de cationes perdió, seguido de TM y AV, respectivamente. Lo anterior sugiere que AV es el que menor concentración de cationes pierde. Sin embargo, AV es el tratamiento con mayor volumen de agua escurrida por lo que la pérdida neta es mayor en este tratamiento que en TM y O. El incremento significativo de cationes en el escurrimiento sugiere un lavado constante de cationes en el suelo, lo que indica poca retención de bases de este suelo y su posible acidificación en suelos que son ácidos.

Rendimientos de grano y forraje

No se obtuvo producción de biomasa del cultivo haba (*Vicia sativa*) en 2002 debido a daños severos ocasionados

Cuadro 9. Concentración de formas solubles (mg L⁻¹) en el agua de escurrimiento y lluvia. (2002, 2003 y 2004).

	2002			2003				2004			
	AV	TM	O	AV	TM	O	LL [†]	AV	TM	O	LL [†]
NH ₄ ⁺	-	-	-	0.6(0.7)	0.6(0.5)	0.5(0.4)	0.3(0.3)	0.9(0.7)	1.2(0.6)	1.4(0.8)	0.5(0.7)
NO ₃ ⁻	-	-	-	0.2(0.2)	0.2(0.2)	0.1(0.1)	0.1(0.1)	0.3(0.2)	0.7(0.3)	0.6(0.2)	0.2(0.1)
Na ⁺	1.4(1.2)	1.5(1.5)	1.7(1.4)	0.05(0.02)	1.4(0.5)	1.7(0.8)	0.5(0.3)	1.0(0.4)	1.9(2.5)	1.1(0.8)	0.4(0.1)
K ⁺	2.0(1.7)	1.6(2.2)	2.3(2.7)	1.3(0.5)	2.0(1.0)	2.3(1.0)	0.3(0.1)	3.0(1.6)	3.5(2.1)	4.0(2.8)	0.1(0.1)
Ca ²⁺	2.8(1.0)	4.2(2.1)	4.3(3.3)	3.9(1.4)	6.5(2.1)	6.9(2.6)	0.3(0.3)	2.5(1.2)	1.9(0.7)	1.7(0.6)	0.8(0.2)
Mg ²⁺	0.8(0.4)	1.2(0.7)	6.1(21)	0.4(0.2)	0.7(0.2)	2.0(0.7)	0.1(0.1)	0.5(0.3)	0.4(0.2)	0.3(0.1)	<.1(<.1)

Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar de los datos. [†]LL= lluvia. AV= año y vez; TM= tradicional mejorado; O= orgánico.

Cuadro 10. Rendimientos de grano y forraje para dos años con los tratamientos bajo estudio.

	2003		2004	
	Paja de avena	Maíz y frijol asociados [†]	Maíz y frijol asociados [†]	Maíz y frijol asociados [†]
AV	9.2b	-	-	-
TM	9.1b	3.4a	9.6a	0.4a
O	8.3a	2.1b	15.7b	0.9b

[†] La tercera columna corresponde a grano de maíz, la cuarta a rastrojo de maíz y la quinta a grano de frijol. Letras iguales entre tratamientos (columnas) indican diferencias no significativas ($p < 0.05$).

por hongos en el cultivo. Para 2003 los resultados de la producción de avena no muestran diferencias significativas entre AV y TM, siendo significativamente menor la producción con el tratamiento O (Cuadro 10). Lo que sugiere una mejor respuesta de la avena a la fertilización química sobre la orgánica. La producción de la avena fue evaluada para paja debido a que el propósito del cultivo fue producir forraje. En el caso de maíz + frijol, los resultados muestran que la mejor producción de grano de maíz fue con TM, comparado con T y O; esto también fue observado por López-Mtz *et al.* (2001), quienes encontraron que el maíz fertilizado de manera química alcanzó mayores rendimientos (6.05 t ha⁻¹ para grano), que aquellos cultivados de manera orgánica usando compostas y estiércoles (<5.66 t ha⁻¹).

Por otra parte, la producción de frijol fue significativamente mayor con el manejo O; esta respuesta posiblemente se deba

a que bajo el tratamiento O, los microorganismos del suelo estén jugando un papel importante en la producción del frijol, considerando que este tratamiento presentó un aumento significativo en algunos indicadores bioquímicos del suelo como son: carbono orgánico del suelo (COS), el nitrógeno total (Nt) y en el nitrógeno de la biomasa microbiana (Nbiom), efecto que no se registró para AV y TM (Gallardo *et al.*, 2005). Los resultados sugieren que hay un mayor impacto de la fertilización química en la producción de grano de maíz, pero la fertilización orgánica induce un mayor rendimiento de forraje de maíz y también de la producción de grano de frijol.

Análisis espacial de la erosión

Para estimar el impacto de una alternativa de manejo para la reducción de la erosión en los Acrisoles bajo temporal de la subcuenca Cointzio, se compararon los tratamientos AV vs TM considerando los resultados de 2004. El factor R (erosividad de la lluvia) calculado para 2004 presentó un valor de 3 294 (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹), la erodabilidad del suelo (K), presentó un valor de 0.04 calculado del nomograma propuesto por Foster (Figueroa *et al.*, 1991); LS fue calculado de acuerdo a Toxopeus (1997), y el factor C fue calculado a partir de la EUPS conociendo la erosión para los tratamientos AV y TM. El factor C para AV fue de 0.027 y de 0.003 para TM. El área total agrícola en la cuenca es de 6 635.6 ha, según López *et al.* (2006).

Bajo un escenario ideal, el cual asume la adopción de la tecnología de residuos de cosecha para la producción de MF (TM) en Acrisoles de la subcuenca de Cointzio, las pérdidas de suelos se reducirían considerablemente, respecto al escenario de descanso (Figura 3). Los resultados muestran que con el descanso (AV) se presentaría mayor erosión en las categorías de 3-5 y >5 t ha⁻¹, las cuales representan el 90.3% del área (Cuadro 11). Por el contrario, al adoptarse el manejo con residuos de cosecha (TM), la mayor área la ocuparían las clases de 1-2 y 2-3 t ha⁻¹, que representan el 94% de la superficie total agrícola de temporal sobre Acrisoles. Estos resultados coinciden con los reportados por Tapia *et al.* (2002), quienes encontraron cambios de las clases 3-4 y >4 t ha⁻¹, cuando compararon la labranza tradicional en la cuenca de Pátzcuaro contra la labranza de conservación con 100% de residuos.

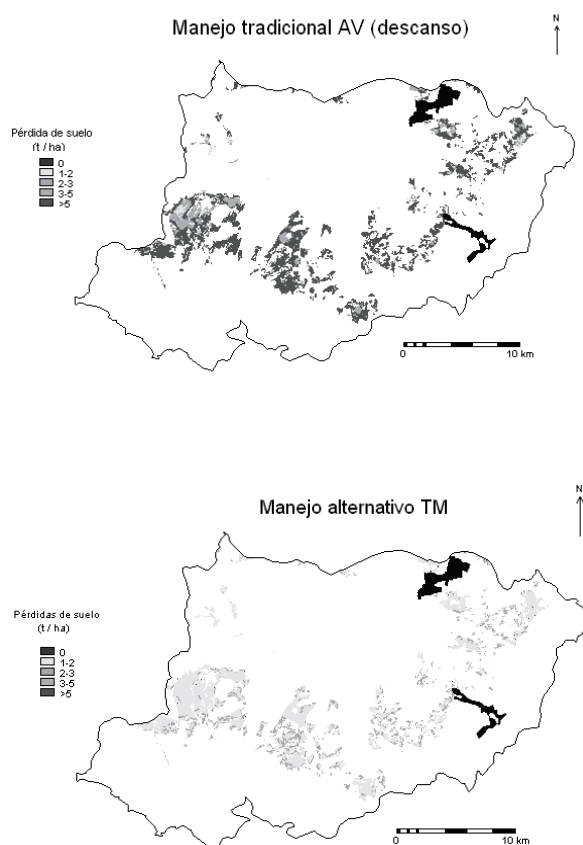


Figura 3. Comparación de pérdida de suelo con manejo tradicional (AV) y tradicional mejorado (TM) 2004, en la subcuenca de Cointzio.

Cuadro 11. Superficies por rango de erosión para los sistemas de manejo comparados.

Pérdida de suelo (t ha ⁻¹)	Tratamiento	
	AV	TM
0	23	23
1-2	312	5199
2-3	301	1045
3-5	999	367
>5	4998	0

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que la rotación AV presentó pérdidas de suelo permisibles (2.7 t ha⁻¹), no así de escurrimiento (199 mm), que fue el que generó mayores volúmenes principalmente en el período de descanso (2004). Este incremento del volumen escurrido fue causado por una mayor compactación del suelo. Las mayores pérdidas de suelo en TM y O fueron causadas durante 2002 cuando presentaron baja cobertura vegetal (<20%), lo que indica la susceptibilidad de estos suelos cuando existe poca cobertura.

Los cultivos en surcos (haba y maíz-frijol), fueron más erosivos que la avena, pero fueron más eficientes para reducir los escurrimientos que cuando no se induce la rugosidad (surcos). Respecto a la concentración de nutrientes disueltos en el escurrimiento, la rotación AV presentó los valores más bajos respecto a TM y O, pero al tener volúmenes mayores de escurrimiento, la pérdida neta de nutrientes fue mayor en AV que en O y TM, siendo el que retiene mayor cantidad de nutrientes este último.

La pérdida de cationes principalmente en AV, sugiere la pérdida del potencial productivo del suelo bajo manejo tradicional. El balance de agua mostró que las salidas vía escurrimiento fueron muy bajas (<11%), la evapotranspiración representó entre 26 y 36% de las salidas de agua de los sistemas agrícolas, y la infiltración representó entre 58 y 73% del agua que entra al sistema. El uso de residuos de cosecha (labranza de conservación), fue una práctica que favoreció la infiltración del agua en el suelo.

Se observó que la adopción de un sistema alternativo como TM, representan una importante contribución a nivel de cuenca en la reducción de los escurrimientos y la erosión, y con ello la mitigación en la degradación del suelo.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, R. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (FAO) (ed), Rome, 300 p. Irrigation and Drainage Paper N° 56.
- Bolleta, A.; Venanzi, S., and Krüger, H. 2003. Respuestas de un cultivo de avena en siembra directa a la fertilización química y biológica en un ambiente marginal. EEA INTA Bordenave, 10 p.
- Colin, J. L. and Jafrezo, J. L. 1990. Solubility of major species in precipitation: factors of variation. *Atmospheric environment* 24A (3): 537-544.
- Gallardo-Lancho, J. F. 2000. Biogeochemistry of mediterranean forest ecosystems, a case study. In: Bollag, J. M. and Stotzky, G. (eds). *Soil biochemistry*. Vol. 10. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Gallardo, J. F.; Bravo, M.; Prat, C.; Medina, L.; Fregoso, L.; Serrato, B.; Mendoza, M.; Pajares, S. y Etchevers, J. D. 2005. Recuperación de agrosistemas degradados en la cuenca del lago de Cuitzeo (Michoacán, México): i. Manejo de suelos. In: Jiménez, B. y Álvarez-González, A. M. (eds.) *Control de la degradación de suelos. II Simposio Nacional*. [CD-ROM]. Madrid, España.
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4ª ed. México D. F. 217 p.
- Gardolinski, P. C. F. C.; Hanrahan, G.; Achterberg, E. P.; Gledhill, M.; Tappin, A.D.; House, W. A.; and Worsfold, P. J. 2001. Comparison of sample storage protocols for the determination of nutrients in natural waters. *Water Research*. IWA. 35(15):3670-3678.
- Hudson, N. 1982. Conservación del suelo. Conservación del suelo. Trad. García, R. D. J. y Martínez, R. J. P. España. Editorial Reverté. 335 p.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI). 1982. Carta edafológica E14A23. Esc: 1:50 000.
- Lado, M.; Ben-Hur, M. and Shaingberg. 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 68:1992-1999.
- Lal, R. 2000. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil science* 165(3):191-207.
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land degradation and development* 12:519-539.
- López, E.; Bocco, G.; Mendoza, M.; Velásquez, A. and Aguirre-Rivera, J. R. 2006. Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural systems* 90:62-78.
- López-Mtz, J. D.; Díaz, A. E.; Martínez, E. R. y Valdez, C. R. D. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra* 19:293-299.
- Maass, M. J. M.; Jordan, C. F. and Sarukan, J. 1988. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *J Applied Ecology* 25:595-607.
- Norton, D. L.; Ventura, E. y Dontsova, K. 2003. Soil degradation as result of water erosion. *Terra* 21:259-265.
- Rachman, A.; Anderson, S. H.; Gantzer, C. J. and Thompson, A. L. 2003. Influence of long-term cropping system on soil physical properties related to soil erodability. *Soil Sci. Soc. Am. J* 67:637-644.
- Ramírez-Cruz, M. E y Oropeza-Mota, J. L. 2001. Eficiencia de dos prácticas productivo conservacionistas para controlar la erosión de las laderas en el trópico. *Agrociencia*. Ensayo 35:489-495.
- Romero, P., J.; Vargas U., G.; Odón, G., G. J.; Pulido, S., J.; Peña P., F.; Rebollar, A. y Rivera, M. D. 2001. Agricultura, Población y Deterioro de Recursos Naturales en Michoacán: Diagnóstico y propuestas. Reyes, R. M. I. (ed) Universidad Autónoma Chapingo. 352 p.
- Stocking, M. A. 1988. Assesing vegetative cover and management effects. 163-185. In: R. Lal (ed). *Soil erosion research methods*. Wageningen. The Netherlands. 244 p.
- Tapia-Vargas, M.; Tiscareño-López., M.; Oropeza-Mota., J. L.; Stone, J. y Velásquez-Valle., M. 2000. Simulación de escurrimiento y salida de sedimentos en cinco prácticas de manejo de suelo. *Agrociencia* 34:663-675.
- Tapia, V. M.; Tiscareño, L., M.; Salinas R., J.; Velásquez V., M.; Vega, P., A. y Guillén, A. H. 2002. Respuesta de la cobertura residual del suelo a la erosión hídrica

- y la sostenibilidad del suelo en laderas agrícolas. *Terra* 20:449-457.
- Tiscareño, L. M.; Baez G., A. D.; Velazquez V., M.; Potter, K. N.; Stone, J.; Tapia V., M. and Claveran, R., A. 1999. Agricultural research for watershed restoration in central Mexico. *J. Soil and Water Conservation* 54:686-692.
- Toxopeus, A. G. 1997. Cibodas: the erosion issue. *In*: van Westen, C.; Saldaña, L., A.; Uría, P., C. and Chávez, A., G. (eds). Chapter 23. 307-322. ILWIS 2.1 for Windows, The Integrated Land and Water Information System. Applications Guide. Enschede, The Netherlands.
- Ziegler, A. D.; Giambelluca, W., T.; Tran, T., L.; Vana, T., T.; Nullet, A., M.; Fox, J.; Vien, D., T.; Pinthong, J.; Maxwell, F., J. and Evett, S. 2004. Hydrological consequences of landscape fragmentation in mountainous northern Vietnam: evidence of accelerated overland flow generation. *J. of Hydrology* 287:124-146.