

RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO Y DE FRACCIONES HÚMICAS EN UN VERTISOL SOMETIDO A SIEMBRA DIRECTA

Soil Organic Carbon and Humic Fraction Stocks in a Vertisol under Non-tillage Management

R. García-Silva¹, D. Espinosa-Victoria^{1,2}, B. Figueroa-Sandoval¹, N.E. García-Calderón² y J.F. Gallardo-Lancho³

RESUMEN

Desde la década de los noventa, se ha intensificado, en el estado de Guanajuato, México, el empleo de la siembra directa (SD) sobre los residuos de cultivo, como una medida para incrementar la materia orgánica del suelo (MOS) y mejorar sus propiedades. Con esta idea, desde 1994 hasta la fecha, se ha desarrollado un experimento con SD en el valle de Santiago. En el ciclo primavera-invierno de 2003, se evaluó el efecto de la SD sobre las reservas de C y de fracciones de MOS en los primeros 15 cm de profundidad y en el perfil de un Haplustert típico (Vertisol). Los tratamientos comparados en este estudio fueron: SD con aporte total de rastrojos de maíz sobre el suelo (SDR) y aporte parcial de dichos rastrojos sobre el suelo tras haberse empacado (SDE); siembra convencional con quema de los residuos (SCQ) y, como referencia, el suelo no cultivado (SNC). Se empleó un diseño experimental de bloques completamente al azar, con cuatro repeticiones. Los parámetros medidos fueron: contenido de arcilla, densidad aparente (DA), pH, N total, relación C/N, reservas de C orgánico edáfico (COS), materia orgánica fresca (MOF), ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y huminas (Hna). Las mayores reservas de COS y fracciones húmicas en la capa de 0 a 15 cm resultaron en SNC; sin diferencia estadística del COS entre SNC y SDE. Los AF alcanzaron 70% en SDR. La SDE ha incrementado la MOS en 1% respecto a SCQ. El manejo convencional del Vertisol ha provocado una disminución significativa de las reservas orgánicas en 33, 57, 35, 47, 38% de COS, MOF, AF, AH, AH+AF, respectivamente, respecto a

SNC, esta reducción del COS representa 1.6% de la MOS. Las reservas de COS del solum del Vertisol (1 m) son 154 Mg ha⁻¹.

Palabras clave: materia orgánica del suelo, residuos de cultivo, ácido húmico, ácido fúlvico, huminas

SUMMARY

Since the decade of the nineties, direct sowing over crop residues or non-tillage management (NT) was intensified in the State of Guanajuato, Mexico, as a means to increase soil organic matter (SOM) and to improve its properties. With this idea, a field experiment with NT was established in 1994 and conducted to date, in Valle de Santiago (Guanajuato, Mexico). The present work was carried out during the fall-winter period of 2003; the main objective was to evaluate the effect of the NT management on soil organic carbon (SOC) and on SOM fraction stocks, referred to the ploughing layer of 0-15 cm and in a Typic haplustert profile (Vertisol). Treatments considered in this study were: a) non-tillage with maize residues on the soil (NTR); b) non-tillage with some of the non-packed crop residues on the soil (NTr); c) conventional tillage with straw burning (CT), and a non-cultivated soil (NCS) as a control. Treatments were established in a completely randomized block experimental design, with four replications. Parameters measured were soil clay content, soil bulk density, pH, SOM and total N content, C/N ratio, and soil stocks of SOC, fresh organic matter (FOM), fulvic acids (FA), humic acids (HA), and humin (Hn). The highest SOC and humic fraction stocks in the 0 to 15 cm layer were found in NCS; with no significant differences between SOC content of the NCS and NTr management. About 70% of the SOC was FA in NTR. NTr increased SOM with 1% in relation to CT. However, reserves of SOC, FOM, FA, HA, and FA+AH of the epipedon of the Vertisol decreased by 33, 57, 35, 47, and 38%, respectively, in relation to NCS; SOC content reduction

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Texcoco, estado de México.

² Autor responsable (despinos@colpos.mx)

³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 México, D.F.

³ Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Apto. P. 257, 37071 Salamanca, España.

represented 1.6% of SOM. SOC reserves of Vertisol solum (1 m) were 154 Mg ha⁻¹.

Index words: soil organic matter, residues, humic acid, fulvic acid, humans.

INTRODUCCIÓN

El uso antrópico del suelo es el principal responsable de la reducción de sus reservas orgánicas; se han estimado pérdidas entre 30 y 50% del carbono orgánico edáfico (COS) en la capa arable, después de 20 a 30 años de cultivo (Roscoe y Buurman, 2003). Sin duda, el laboreo intensivo es la práctica del sistema productivo que más afecta la reducción del COS, al alterar el ciclo de C y, por consiguiente, modificar la calidad del humus y al desproteger la materia orgánica del suelo (MOS) que se encuentra ocluida en pequeños poros de los agregados edáficos tras ser destruidos (sea un suelo arcilloso o limoso) y promover su oxidación (Matus, 1994; Piccolo *et al.*, 1996). Por lo anterior, quizás uno de los más grandes problemas que enfrentan los agricultores al laborear el suelo es la paulatina pérdida de MOS (Crovetto, 1996).

Una disminución de las reservas orgánicas del suelo trae como consecuencia, a corto plazo, una reducción del rendimiento potencial de los cultivos (Manna *et al.*, 2003), una baja actividad biológica, y el encostramiento; a mediano plazo, el suelo se hace vulnerable a la compactación, le origina una deficiente estructuración, lo que causa un inadecuado drenaje y una menor capacidad de retención hídrica y se reduce la capacidad de restauración de nutrimentos, exponiendo el sistema a la acción erosiva (Ghunan y Sur, 2001; Holland, 2004). La disminución del contenido de MOS puede también provocar una reducción de la capacidad de adsorción e inmovilización de bioelementos y una mayor persistencia, por menor degradación de los ingredientes activos de los agroquímicos, etc. (Tamames, 2002; Blaise y Ravindran, 2003).

Los sistemas agrícolas de producción convencionales que se caracterizan por la remoción del suelo y la quema o extracción total de los residuos de cultivo tienen un amplio predominio en la región de El Bajío guanajuatense. Sin embargo, la adopción de la siembra directa (SD) representa una práctica promisoriosa para mejorar el contenido de MOS y las propiedades del suelo, y hacer más sostenibles los sistemas de manejo convencionales (Robertson y Thorburn, 2001; Freixo

et al., 2002); la SD es una modalidad de la labranza de conservación en la cual no se remueve el suelo y se aporta una elevada proporción de los residuos de cultivo sobre la superficie del suelo (Figuerola *et al.*, 2001); con la SD se permite un incremento, a largo plazo, del contenido y de la calidad orgánica de la capa arable (Salinas *et al.*, 2001; Bayer *et al.*, 2002; Deen y Kataki, 2003). Ya desde la década de los noventa se ha intensificado la SD entre los agricultores de esta región; a ello ha contribuido la investigación y la transferencia de tecnología generada, respectivamente, por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Banco de México a través de los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). Para ello, se estableció, desde 1994, un experimento con sistemas de labranza y manejo de los residuos de cultivos en Villadiego, municipio de Valle de Santiago, Guanajuato.

En 2003, se realizó el presente estudio con el objetivo de evaluar el estado actual de las reservas orgánicas de un Vertisol de El Bajío guanajuatense, aumentar el conocimiento de su dinámica y efectos sobre sus propiedades edáficas y comparar los efectos que tiene la SD sobre el contenido de COS y de las fracciones húmicas en la capa de 0 a 15 cm de profundidad, con respecto al manejo convencional, después de 10 años (1994-2003) de aplicar dichos sistemas en el sitio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio se ubica en el Centro de Desarrollo Tecnológico "Villadiego" del FIRA en Valle de Santiago (Guanajuato, México); 20° 24' 25" N y 101° 07' 24" O, a una altitud de 1719 m; el relieve es plano, con pendientes en general inferiores a 3%. El clima es cálido y seco (A)C(w_o)(w)(e)g, con lluvias en verano (García, 1987); la precipitación media anual es 673 mm año⁻¹. El suelo se clasifica como Typic Haplustert (Vertisol) (Soil Survey Staff, 1999); se desarrolló con base en sedimentos basálticos aluviales y cenizas volcánicas, siendo profundo pero con drenaje lento.

En esta región se practica el riego, con dos ciclos de cultivo al año: primavera-verano (P-V), que abarca de mayo a octubre, en el que se siembran predominantemente maíz y sorgo; y otoño-invierno (O-I), que abarca de noviembre a abril, en el que se siembran principalmente cebada y trigo.

Los tratamientos estudiados fueron: a) siembra convencional con fertilización NPK (180-60-0) y quema

total de los residuos de cultivo (SCQ), que consistió en dos rastreos realizados aproximadamente a una profundidad de 15 cm; b) siembra directa con el aporte parcial de los residuos sobre el suelo tras ser removidos mediante el empacado (SDE) en cada ciclo de cultivo, en el año 2003 se añadieron, en promedio, 10.4 y 4.4 Mg ha⁻¹ de residuos de maíz y cebada, con base en peso seco, respectivamente; c) siembra directa con aporte total de los residuos de cultivo sobre el suelo (SDR) en cada ciclo de cultivo; se añadieron durante el año 2003, 12.9 y 7.4 Mg ha⁻¹ de residuos de maíz y cebada, con base en peso seco, respectivamente; en los tratamientos con siembra directa (SD) no se removió el suelo, ni se enterró la paja; se utilizó una sembradora especial, con fertilización similar a la convencional en ambos ciclos de cultivo y un control químico de malezas; y d) suelo no cultivado (SNC) como tratamiento de referencia, con un aporte de residuos orgánicos estimado con base en peso seco de 7.8 Mg ha⁻¹ por año constituido por pasto grama (*Cynodon dactylon*) y, en menor proporción, por herbáceas, como: verbena cimarrona (*Stachytarpheta jamaicensis* L. Vahl); los sitios de referencia se ubicaron a la orilla de los terrenos de cultivo, donde se conserva la formación vegetal de mezquite (*Prosopis glandulosa*), casuarina (*Casuarina cunninghamiana*) y fresno (*Fraxinus ornus*), cercanos al sitio experimental.

Los tratamientos se establecieron en un diseño experimental de bloques al azar, con cuatro repeticiones. La estimación del rastrojo añadido al suelo y del rasante en los sitios de SNC se hizo por triplicado y de manera sistemática en cada repetición, con un tamaño de muestra de 1 m². Cada muestra de material orgánico se pesó con báscula digital y se secó en estufa a 70 °C hasta peso constante.

El 3 de enero de 2003, se recolectaron en zig-zag cinco muestras simples de 0 a 15 cm de profundidad por cada unidad experimental, resultando 80 muestras simples; con éstas se conformaron 16 muestras compuestas (una por unidad experimental).

En los tratamientos de SD, los puntos de muestreo se ubicaron en la hilera de siembra del cultivo anterior, limpiando previamente el mantillo. El muestreo se realizó durante el ciclo O-I (época seca). Las muestras se secaron a temperatura ambiente y a la sombra (alrededor de 22 °C) y, posteriormente, se molieron con un mazo de madera y se tamizaron con Malla 10 (2 mm) para el análisis de rutina y, para el análisis de N y C, se tamizó el suelo con Malla 100 (0.140 mm), y para cuantificación

de las fracciones de MOS se tamizó con Malla 60 (0.25 mm).

La composición granulométrica del suelo (textura) se determinó según Bouyoucos (Aguilera y Martínez, 1996). Para determinar la densidad aparente (DA; en Mg m⁻³) se utilizó el método del terrón parafinado (Kaurichev, 1984). El pH se determinó con potenciómetro en una suspensión suelo:agua 1:2 (Jackson, 1982). El COS se cuantificó con el método Walkley y Black (Jackson, 1982); el N total se analizó mediante el método semimicrokjeldahl (Etchevers, 1988).

El fraccionamiento de las sustancias húmicas (SH) del Vertisol se basó en el empleo de los extractantes alcalinos: Na₄P₂O₇·10H₂O 0.1 M y NaOH 0.5 M (Dabin, 1971). Para separar la MOS poco evolucionada o fresca (MOF), se pusieron en contacto 50 g de suelo con 300 mL de H₃PO₄ 2 M y se agitó durante 30 min; posteriormente, se centrifugó a 3500 rpm durante 8 min. El sobrenadante se decantó a través de un papel de filtro Whatman No. 1, previamente pesado y marcado, colocado sobre un matraz de 500 mL; el papel filtro retuvo la MOF y en el matraz se recogieron pequeñas porciones de AF extraíbles en H₃PO₄ 2 M (primer extracto). El residuo de suelo se lavó cuatro veces con 200 mL de agua destilada cada una, pero sólo el decantado del primer lavado se pasó a través del papel filtro por presentar aún pequeñas cantidades de MOF; el proceso terminó cuando el sobrenadante presentó un pH > 4.

El exceso de H₃PO₄ en el papel filtro se eliminó con agua caliente y éste se secó en un horno a 40 °C durante 24 h. Posteriormente, se pesó el papel filtro seco y por diferencia se obtuvo la MOF. El contenido de C de la MOF se obtuvo con la ecuación:

$$C \text{ de la MOF (mg g}^{-1}\text{)} = [(\text{peso papel filtro} + \text{muestra seca}) - \text{peso papel filtro}] * 0.309$$

Para la extracción de los ácidos AH+AF, al residuo de suelo, después de la separación de la MOF, se agregaron 400 mL de Na₄P₂O₇ 0.1 M a cada muestra, se agitó a 180 oscilaciones por minuto durante 30 min y se dejó reposar toda la noche; posteriormente, se centrifugó a 3500 rpm durante 20 min; se repitió la extracción dos veces con 200 mL de dicho extractante; los sobrenadantes se vertieron en un recipiente de polietileno de boca amplia con capacidad de 4 L por cada unidad experimental. La extracción de dichos ácidos se continuó con 400 mL de NaOH 0.5 M, agitando a 180 rpm durante 30 min; se dejó

reposar toda la noche, luego se centrifugó a 3500 rpm durante 20 min y se continuó lavando la muestra con 200 mL de NaOH 0.5 M hasta que el sobrenadante presentó una tonalidad casi incolora (ocho veces); todos los sobrenadantes se decantaron en el mismo recipiente (AH+AF). Posteriormente, el residuo del suelo se lavó varias veces con 200 mL de agua destilada centrifugando a 10 000 rpm durante 15 min cada vez, hasta que el sobrenadante presentó pH 8. Con excepción del último lavado, los sobrenadantes del extracto (AH+AF) se vertieron al recipiente. Se midió el volumen total mediante aforo con matraz. Para valorar el C de la mezcla AF+AH, se tomó una alícuota de 50 mL de dicho extracto y se vertió en un matraz Erlenmeyer de 500 mL y se desecó a 40 °C en baño maría. La valoración de C de esta fracción alcalinosoluble se realizó a través del método Walkley y Black (Jackson, 1982). Se calculó de la manera siguiente:

$$C_{AF+AH} \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = (\text{mL de K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot \text{N}) - (\text{mL FeSO}_4 \cdot \text{N}) \cdot 0.39/\text{g muestra}$$

donde: g muestra (AF+AH) = mL alícuota · g suelo / vol. total extracto (mL).

Para separar los ácidos húmicos (AH) se tomó una alícuota de 200 mL del extracto AH+AF y se vertió en un frasco de plástico transparente; se agregó H₂SO₄ 1:1 para precipitar los AH (hasta pH 1.5) y se dejó reposar entre 16 y 24 h. Tras la floculación se separaron los AF por decantación. Los AH se lavaron dos veces con 30 mL de H₂SO₄ 0.001 N y se centrifugaron a 2500 rpm durante 20 min, desechando el sobrenadante; al precipitado se le agregó NaOH hasta elevar el pH a 12 agitando y el sobrenadante se centrifugó de nuevo a 10 000 rpm durante 10 min, decantando en un matraz aforado de 50 mL. Para valorar el C de los AH, se tomó una alícuota de 10 mL de dicho volumen y se vertió en un matraz Erlenmeyer de 500 mL y se desecó a 40 °C en baño maría. La cuantificación de C de la fracción de AH se realizó a través del método Walkley y Black (Jackson, 1982) y se calculó de la manera siguiente:

$$C_{AH} \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = (\text{mL K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot \text{N}) - (\text{mL FeSO}_4 \cdot \text{N}) \cdot 0.39/\text{g muestra}$$

donde: g muestra AH = g suelo*200 mL/volumen total extracto (mL).

Para aislar los ácidos fúlvicos (AF) del filtrado recogido en la separación de la MOF (los AF_{H3PO4} del primer extracto), se tomó una alícuota de 100 mL, se vertió en un matraz Erlenmeyer de 500 mL y se desecó a 40 °C en baño maría hasta reducir el volumen aproximadamente en 80%. En este volumen se valoró el C de los AF, según Walkley y Black (Jackson, 1982). El cálculo de C de los AF se realizó de la manera siguiente:

$$C_{AF(H3PO4)} \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = (\text{mL K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot \text{N}) - (\text{mL FeSO}_4 \cdot \text{N}) \cdot 0.39/\text{g muestra}$$

donde: g muestra AF (H₃PO₄) = mL alícuota · g suelo / vol. total del primer extracto (mL)

La cantidad de AF totales puede obtenerse también por diferencia:

$$C_{AF} \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = (C_{AF+AH} - C_{AH}) + C_{AF(H3PO4)}$$

Para aislar las huminas totales (Hna), el residuo de la muestra de suelo, que quedó en el tubo de centrifugación después del último lavado con agua destilada, se colocó en una cápsula de porcelana para desecarlo a 40 °C. El suelo con sólo Hna se trituró en mortero de ágata, se tamizó a 0.140 mm y se pesó en una balanza analítica. El contenido de C en Hna (en mg g⁻¹) se obtuvo directamente en el analizador automático de C (TOCAN 5050 Shimadzu).

Las reservas de COS y de cada fracción húmica del Vertisol se determinaron en cada unidad experimental; para ello, se consideraron la DA del Vertisol, la profundidad del muestreo, la masa del suelo, y se relacionaron el contenido de C (mg g⁻¹) y la masa del suelo (Mg ha⁻¹).

Para conocer el efecto del manejo aplicado al suelo en el sitio experimental sobre las reservas orgánicas estudiadas, se aplicó el ANOVA a las 16 unidades experimentales. También se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey (P = 0.05) para contrastar las medias de los tratamientos (Martínez, 1988). Con el propósito de ver la asociación de ciertas variables de interés, se hizo un análisis de correlación, utilizando los datos de las 16 unidades experimentales. Todos los análisis estadísticos se procesaron con el SAS, de acuerdo con Rebolledo (2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades del Suelo

El contenido de arcilla del Vertisol en el sitio de estudio varió entre 583 g kg⁻¹ en SDR y 693 g kg⁻¹ en SNC, lo cual denota la naturaleza altamente arcillosa de este suelo (Coulombe *et al.*, 1996), siendo del tipo 2:1 (montmorillonita); los valores de arcilla resultaron inferiores en los tratamientos que involucraron cultivo y resultaron estadísticamente diferentes respecto al SNC; esto debe interpretarse como pérdida de arcilla por el arrastre provocado por las intensas lluvias y el tipo de riego por gravedad empleado. A causa de la variación de la arcilla, hubo también variaciones significativas de limo (de 168 a 250 g kg⁻¹) y de arena (de 140 a 180 g kg⁻¹); ambas fracciones resultaron significativamente más abundantes en suelo con manejo antrópico.

Los valores de la DA del suelo resultaron en todo caso altos, dado el excesivo contenido de arcillas, no existiendo diferencias significativas entre tratamientos; el posible efecto positivo de la no remoción del suelo y el aporte de residuos orgánicos se ve perjudicado por el tráfico repetitivo de la maquinaria (siembra, empaqueo y recolección). La DA es también un reflejo de la compactación del suelo; al respecto, Guido *et al.* (2003) indicaron que la SD es incapaz de evitar la compactación inducida por el intenso tráfico de maquinaria pesada. Sin embargo, Zeleke *et al.* (2004) encontraron que, mediante la incorporación de grandes cantidades de residuos de cosecha al suelo más la aplicación de fertilizantes inorgánicos, fue posible disminuir la DA en la superficie del suelo, debido a la alta DA del Vertisol se presentó una porosidad total (Pt) muy baja (< 30% en todos los casos), más acusado donde no se remueve

el suelo (Cuadro 1), menor que 50% (mínimo recomendable).

Se observó que el pH de este Vertisol en su condición natural tiene una reacción ligeramente básica (7.2), lo que coincide con los valores teóricos de 7.0 a 7.5 reportados por Coulombe *et al.* (1996). El cultivo acidificó ligeramente el suelo con diferencias significativas ($P < 0.01$). Es común en los suelos este proceso por la acción acidificante del sulfato amónico y de manera más evidente en las SD. En el caso de que exista quema (SCQ), la reducción del pH obedece a la disolución de las cenizas calcoptásicas (Gallardo, 1999) y a la pérdida de Ca²⁺ y Mg²⁺ intercambiables (Graham *et al.*, 2002)

El contenido de COS del Vertisol es significativamente más alto en el SNC ($P < 0.01$); no hay duda que el cultivo tiene un efecto depresivo sobre el COS. El COS, representado en forma de porcentaje de MOS, varió de mediano (SCQ) a muy rico (SNC).

Es obvio que los aportes nitrogenados (fertilizantes) producen un efecto residual que tiende a nivelar el contenido de N edáfico.

Los valores de C/N son cercanos a 14, con diferencias significativas entre la SCQ y los demás manejos, posiblemente el quemado causa una más intensa mineralización de la MOS. Valores de C/N de esos órdenes fueron encontrados por Coulombe *et al.* (1996) en un Vertisol.

C de las Fracciones Húmicas Respecto al COS y Cantidad de Extracción de Sustancias Húmicas (SH)

En el Cuadro 2, se presentan los porcentajes de C de las fracciones húmicas respecto al COS.

Cuadro 1. Propiedades del Vertisol de Valle de Santiago (Guanajuato, México).

Parámetros edáficos	Arcilla	Densidad aparente	pH (1:2)	Materia orgánica	Nitrógeno	C/N
Manejos [†]	g kg ⁻¹	g cm ⁻³	H ₂ O	%	mg g ⁻¹	
SNC	693 a [†]	1.67 a	7.2 a	4.7 a	1.9 a	14 a
SDE	585 b	1.73 a	6.1 c	4.0 ab	1.6 a	14 a
SDR	583 b	1.75 a	6.1 c	3.5 ab	1.6 a	13 ab
SCQ	590 b	1.64 a	6.7 b	3.1 b	1.5 a	12 b
Desv. Estándar	32.6	0.05	0.2	0.5	0.01	0.8
Significancia	**	NS	**	**	NS	**

[†] SNC = suelo no cultivado; SDR = siembra directa con aportación total de residuos de cosecha. SDE = siembra directa con extracción parcial de residuos mediante el empaqueo; SCQ = siembra convencional con quema de residuos de cosecha. [†] Valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes. ** = altamente significativo ($P < 0.01$), * = significativo ($P < 0.05$), NS = no significativo.

El porcentaje de C en la MOF fue escaso, nunca superior a 3%. Sin embargo, la MOF en el SNC fue mayor significativamente con respecto a los valores encontrados en los sistemas de manejo antrópico del Vertisol. Estos resultados coinciden con Bayer *et al.* (2002) quienes reportaron que la fracción particulada de la MOS es altamente sensitiva al manejo y representa una pequeña proporción del COS, pero siempre superior en suelos no alterados.

Con respecto al contenido de los AF, los cuales resultaron con diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) entre la SDR (más alto porcentaje 70%) y los otros sistemas de manejo.

Los AH resultaron escasos en este suelo, siendo mayor en SNC con 18%; no se encontró diferencia estadística entre los sistemas de manejo.

La eficiencia extractiva de la fracción soluble (AH+AF) con los reactivos alcalinos fue altamente sensible a los sistemas de manejo, observándose el valor mayor en SDR (79%) y disminuyó al reducir los aportes orgánicos (SDE) o, en su caso, donde se quemaron los residuos de cultivo (SCQ) hasta 54%. Por lo tanto, la metodología de fraccionamiento de MOS, propuesta por Dabin (1971), si se califica con base en la eficiencia en la extracción, puede considerarse acertada para el Vertisol.

Las proporciones de las fracciones más evolucionadas conformadas por los AH+Hna se concentraron mayoritariamente en SNC y SCQ, por tal motivo, la MOS en dichos sistemas de manejo se podría considerar más estable.

Reservas de COS

Las reservas de COS del Vertisol en la capa superficial de 0 a 15 cm de profundidad resultaron altamente significativas ($P = 0.01$) a los tratamientos estudiados, resultando mayores en SNC con 66.8 Mg ha^{-1} , sin diferencia significativa con SDE (Cuadro 3). La remoción del suelo y la quema de rastrojos que conlleva el manejo tradicional (SCQ) contribuye a acentuar la disminución de las reservas orgánicas de los epipedones edáficos, para este Vertisol fue de 33% que equivale a 22 Mg ha^{-1} de C, debido a la destrucción de los agregados medianos y grandes del suelo y acelerarse la mineralización (por hacerse más accesible la MOS al ataque microbiano). En este sentido, Chan *et al.* (2002) atribuyeron un mayor efecto de la labranza a la pérdida del COS que a la quema de

rastrojos; sin embargo, estos mismos autores indicaron que la quema afectó la pérdida de COS asociado a la fracción mineral $< 53 \mu\text{m}$ (limo fino más arcilla); por lo expuesto, debido a la utilización continua de SCQ por más de 40 años se ha provocado una reducción del contenido porcentual de MOS en el Vertisol de 1.6%. A este respecto, Freixo *et al.* (2002) encontraron que la fracción arcilla concentra entre 60 y 90% del COS. Esto confirma los resultados obtenidos en el Vertisol del presente estudio, puesto que el SNC presentó el más alto contenido de arcilla (Cuadro 1). Asimismo, McConkey *et al.* (2003) aseveraron que los suelos con textura fina tienen un mayor potencial de incrementar COS con manejo sin labranza, lo cual coincide, en parte, con los resultados del presente estudio. Fyles *et al.* (1991) y Roscoe y Buurman (2003) también encontraron mayores reservas orgánicas en suelos de ecosistemas no perturbados que en aquellos sometidos a manejo antrópico después de 30 años de cultivo, obviamente también influidos por el aporte de residuos orgánicos. Sin embargo, no es necesario igualar o superar la cantidad de las reservas que había en el ecosistema para hacer sostenible el sistema de producción debido a que se corre el riesgo de tener un exceso de nutrimentos e inducir efectos negativos al ambiente (Crohn, 1995).

Las reservas de COS en la SDE superaron al sistema de manejo SCQ en 14 Mg ha^{-1} de C. Este aumento del COS en SDE representó un incremento del contenido de la MOS muy cercano a 1%. Deen y Katagi (2003) señalaron que la concentración de COS depende de la profundidad de operación de labranza y encontraron la tendencia de incremento siguiente: en las capas de 0 a 5, de 5 a 10 y de 20 a 40 cm de profundidad con labranza cero, cincel y aradura, respectivamente. Sin embargo, las reservas de COS con SDE paradójicamente superaron a la SDR (en 5.7 Mg ha^{-1} de C); ello podría obedecer a una disminución temporal de la descomposición de la MOS en la SDR por condiciones de saturación hídrica, creándose condiciones más anaerobias que en la SDE, (Saharawat, 2003), dado que la anaerobiosis causa una mineralización menos acentuada de los restos orgánicos (Flaing *et al.*, 1975; Kononova, 1981). El Cuadro 1 muestra que la DA es mayor (y la Pt menor) con la SDE, pero no parece que existan diferencias significativas con los valores encontrados en el sistema SDR.

Hay que tener en cuenta también que Roscoe y Buurman (2003) señalaron que altos valores de la DA edáfica conducen a una sobrestimación de las reservas

Cuadro 2. Contenido de C orgánico del suelo (COS) y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo (referido a porcentaje sobre COS) sometido a distintos manejos (Valle de Santiago, Guanajuato, 2003).

Fraccionamiento orgánico	COS	MOF [†]	AF [‡]	AH [§]	AH + AF	Hna [#]	AH/AF
Manejo [¶]	mg g ⁻¹	----- % (COS) -----					
SNC	26.5 a ^{††}	2.7 a	50.8 b	17.5 a	68.3 ab	40.0 a	0.36 a
SDE	22.5 ab	1.3 b	45.5 b	8.8 a	54.0 b	26.3 a	0.19 a
SDR	20.3 b	1.3 b	70.5 a	8.8 a	79.3 a	23.0 a	0.13 a
SCQ	18.0 b	1.7 ab	49.0 b	14.3 a	63.3 b	26.0 a	0.32 a
Desv. Estándar	2.9	0.7	13.1	13.4	7.5	29.1	0.07
Significancia	**	*	**	*	**	NS	NS

[†] MOF = materia orgánica fresca; [‡] AF = ácido fúlvico; [§] AH = ácido húmico; [#] Hna = huminas totales; [¶] SNC = suelo no cultivado; SDR = siembra directa con aportación total de residuos de cosecha. SDE = siembra directa con aporte de residuos tras el empacado; SCQ = siembra convencional con quema de residuos de cosecha.

^{††} Valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes. * significativo $P < 0.05$; ** altamente significativo $P < 0.01$; NS = no significativo.

de C en un suelo sometido al cultivo; esto debe tenerse en cuenta a la hora de considerar las diferencias entre manejos del Vertisol estudiado.

Estos resultados se refieren al ciclo O-I; de acuerdo con Deen y Katakai (2003) pudiera haber diferencias en los valores de las reservas si se refirieran al ciclo P-V, pero no en la tendencia, dada la relativa lentitud de los cambios en los procesos en los que está implicada la humificación.

Las reservas de COS en el perfil del Vertisol estudiado resultaron mayores obviamente en la capa superficial de 0 a 20 cm con 69.9 Mg ha⁻¹, éstas son fomentadas por el aporte constante de residuos de cultivo que se realizan ciclo tras ciclo y por la no perturbación del suelo; dichas reservas correspondieron a 45.5% del COS respecto a 1 m de profundidad (Cuadro 4); las reservas de COS de este Vertisol (cifradas en 154 Mg ha⁻¹) se consideran intermedias. Swift (2001) y Wairio y Lal (2003) coincidieron con el resultado anterior

y reportaron una mayor reserva de COS en el horizonte superficial en condición natural y ésta decreció marcadamente con la profundidad. Sin embargo, Swift (2001) señaló que los Vertisoles muestran cantidades muy sustanciales de CO a mayores profundidades, como es el caso de los AF que emigran por lavado; aunque en los horizontes más profundos, el contenido de COS no se visualizaría tan intensamente Deen y Katakai (2003). El contenido de COS referido a 50 cm de profundidad es 75% del referido a 1 m (Cuadro 4).

Fraccionamiento de las Reservas Húmicas

En el Cuadro 3, se observa que, en la condición de SNC, se obtienen las mayores reservas de C de las fracciones de MOS, con diferencia estadísticas con los sistemas de manejo antrópicos, con excepción de AH y Hna en el sistema de manejo tradicional (SCQ), con este manejo se alcanzaron pérdidas de las reservas orgánicas

Cuadro 3. Reservas de C orgánico del suelo (COS) y de fracciones húmicas de un Vertisol sometido a distintos manejos (Valle de Santiago, Guanajuato, 2003).

Manejo/Parámetros edáficos [†]	COS	MOF [‡]	AF [§]	AH [#]	AH + AF	Hna [¶]
	----- Mg ha ⁻¹ -----					
SNC	66.8 a ^{††}	1.83 a	33.2 a	12.0 a	44.5 a	24.0 a
SDE	58.8 ab	0.78 b	26.5 ab	5.1 b	31.0 ab	17.5 b
SDR	53.1 bc	0.70 b	37.5 bc	4.8 b	41.9 ab	17.5 b
SCQ	44.8 c	0.78 b	21.6 c	6.3 b	27.4 b	20.8 ab
Desv. estándar	5.8	0.4	8.5	1.2	8.7	3.4
Significancia	**	*	**	*	**	*

[†] SNC = suelo no cultivado; SDR = siembra directa con aportación total de residuos de cosecha; SDE = siembra directa con aporte de residuos tras el empacado; SCQ = siembra convencional con quema de residuos de cosecha. [‡] MOF = materia orgánica fresca; [§] AF = ácido fúlvico; [#] AH = ácido húmico; [¶] Hna = huminas totales.

^{††} Valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes; * significativo $P < 0.05$; ** altamente significativo $P < 0.01$; NS = no significativo.

Cuadro 4. Reservas de C orgánico del suelo (COS) en un perfil del Vertisol en estudio. Valle de Santiago, Gto. 2003.

Capa	Profundidad	Carbono orgánico	Densidad aparente	Reservas de COS
	cm	g kg ⁻¹	Mg m ⁻³	Mg ha ⁻¹
Ap	0 a 27	20.2	1.65	0 - 20 cm: 69.9
Bss	27 a 60	5	1.7	0 - 50 cm: 115.3
Bss ₂	60 a 73	6.4	1.71	0 - 100 cm: 154.2
BC	73 a 84	2.7	1.46	
C	84 a 98	2.7	1.65	
C ₂	98 a 115	2.7	1.56	

de 57, 35, 47, 38 y 13% de MOF, AF, AH, AH+AF, respectivamente, con respecto al SNC, excepto en Hna. A este respecto, Kononova (1981) indicó que el laboreo del suelo ocasiona pérdidas de reservas de sustancias húmicas (SH), sobre todo si no se reponen con aportaciones orgánicas. La reserva de MOF en el SNC fue de 1.8 Mg ha⁻¹, significativamente superior ($P < 0.01$) (más del doble) respecto a los manejos antrópicos del Vertisol, lo cual coincidió con los resultados obtenidos por Roscoe y Buurman (2003). Labrador (2001) indicó que las SH edáficas predominan sobre la MOF, a no ser que recientemente se hayan realizado importantes aportaciones orgánicas. Las reservas de MOF del Vertisol están influenciadas por el alto contenido de arcilla que caracteriza este tipo de suelo ($r = 0.87$; $P < 0.01$); además, en los manejos con SD, al no mezclarse el rastrojo con el suelo, la MOF edáfica debe ser baja forzosamente. Heal *et al.* (1997) y McCarthy (2001) aseveraron que el comportamiento de la MOF depende del contenido de arcilla del suelo debido, por un lado, a que los coloides arcillosos protegen dicha fracción de la degradación microbiana y, por otro, a que pueden adsorber sustancias orgánicas frescas; en todo caso, promueven la descomposición de la MOF, pero no la mineralización orgánica. Por lo tanto, el manejo y contenido argílico del suelo justifican el bajo contenido de la MOF.

Los AF del SNC superaron en 12 Mg ha⁻¹ de C el manejo tradicional (SCQ), cuyo contenido de C es alrededor de 51% de las reservas de COS, siendo la fracción orgánica más abundante en el suelo en estudio, por lo tanto, la dinámica de las sustancias húmicas estará gobernada por el contenido de los AF. El manejo tradicional ocasionó, pues, una mayor mineralización de los AF, como era de esperarse. Estos resultados también coinciden con lo encontrado por Bayer *et al.*

(2002) en un Acrisol franco arcilloso. Roscoe y Buurman (2003) señalaron que las fracciones poco polimerizadas (como los AF) deberían ser las más sensibles al impacto del manejo edáfico. Se sabe que los AF son relativa y rápidamente mineralizables en el suelo, debido a su alta solubilidad y que, además, pueden perderse fácilmente por lixiviación. Sin embargo, Piccolo *et al.* (1996) encontraron que el mayor contenido de AF correspondió a un suelo cultivado, en relación con los AH. La abundancia de AF en el Vertisol, a pesar de ser un suelo de neutro a ligeramente ácido y contener una elevada proporción de arcillas 2:1 (que caracterizan a los Vertisoles), indica alguna o varias limitaciones para la adecuada humificación de los residuos orgánicos, como puede ser la existencia de un mal drenaje.

Las bajas reservas de AH corroboran una dificultad en la evolución de AF a AH, debido a una inadecuada humificación existente en estos suelos. Sin embargo, el SNC muestra las mayores reservas de AH, con diferencias significativas en relación con los tratamientos de SD; ello indica un mayor dinamismo en el proceso de humificación en condición no alterada y mayor estabilidad de las sustancias húmicas.

En cuanto a las reservas de fracciones alcalinosolubles (AF+AH), éstas resultaron superiores en SNC con 17 Mg ha⁻¹ de C en la capa de 0 a 15 cm, respecto al manejo tradicional (SCQ), aunque Reyes y García (2004) argumentaron que el contenido de dichas fracciones puede variar significativamente con el manejo antrópico del suelo y la profundidad del perfil del suelo.

La mayor reserva de Hna apareció en SNC con 24 Mg ha⁻¹ y, de acuerdo con Duchaufour (1987), representa un valor bajo para un Vertisol, con diferencias significativas con respecto a los demás sistemas de manejo ($P < 0.05$), excepto con SCQ. El bajo contenido de Hna del Vertisol (concomitante a la abundancia de fracciones solubles) puede atribuirse al proceso de hidromorfismo existente en este suelo, principalmente en la época de lluvias y ocasionado por el propio riego. La compactación del suelo restringe el flujo hídrico; es notable el hecho de que dicha compactación edáfica es favorecida por las obligadas operaciones con maquinaria sobre suelo húmedo y esto es evidente en la SD. En este sentido, Soza *et al.* (2003) señalaron que la SD después de cuatro años sucesivos generó mayor compactación del suelo. Este proceso de compactación y la baja permeabilidad edáfica ha sido descritos por McQueen y Shepherd (2002) y Tubeileh *et al.* (2003).

El proceso de hidromorfia ocasiona la reducción de Fe^{3+} de los sesquióxidos (junto con la pérdida de Ca^{2+}) en suelos neutros o poco ácidos, dichos cationes sirven de enlace entre las arcillas y la MOS. La reducción a Fe^{2+} origina una inestabilidad del complejo arcillo-húmico (Duchaufour, 1987), lo cual ocasiona la solubilidad de fracciones orgánicas edáficas; por lo tanto, la proporción de Hna disminuye, contrariamente a lo que cabría esperarse en este tipo de suelos.

Por ello, Tamames (2002) indicó que la fracción Hna puede ser un indicador de la bioestabilidad de la MOS. La presencia de la hidromorfia causa que haya una correlación baja entre el contenido de Hna y de arcillas en estos Vertisoles ($r = 0.57$, $P < 0.05$).

Relación AH/AF y Calidad Húmica

Algunos autores utilizan varios índices de humificación o polimerización [v.g. AH/AF (Canellas *et al.*, 2001; Labrador, 2001)]. En el presente estudio (Cuadro 2), los valores de la relación AH/AF son bajos (< 0.4 en todos los casos); dicha relación fue más alta en el SNC y SCQ con 0.36 y 0.32, respectivamente. La relación AH/AF mostró valores inusualmente bajos en todos los sistemas de manejo en comparación con otros suelos (Gallardo y García, 1973), sin diferencias significativas. Sin embargo, es poco explicable que, en la SDR, la relación AH/AF sea significativamente más baja (0.13), a no ser que sea consecuencia de la alta liberación de sustancias orgánicas solubles que se están lixiviando del rastrojo acumulado sobre el suelo. En todo caso, dicho índice resultó siempre muy inferior a la unidad, lo que confirma que en el Vertisol estudiado existe una baja calidad húmica (Labrador, 2001) y tiende a la degradación.

Schnitzer (2000) señaló que los métodos de extracción de SH edáficas basados en el empleo de soluciones extractoras alcalinas, a pesar de tener las desventajas de ser laboriosos y consumidores de tiempo y, por ello, dificultan el análisis de un número grande de muestras de suelo, son más eficientes y económicos. Flaig *et al.* (1975) indicaron que los resultados del fraccionamiento de la MOS dependen, en grado considerable, del método empleado, debido a las numerosas variaciones que presentan los distintos procedimientos de extracción, por lo que la utilidad del índice AH/AF es más bien cuestionable, al menos en este caso. McCarthy (2001) señaló que, además de

la eficiencia extractiva, la naturaleza y concentración de los extractantes empleados, la temperatura de extracción, el periodo de contacto con la base extractante y las condiciones de aerobiosis o anaerobiosis afectan la composición de las fracciones de la MOS. Además, Gallardo (1999) demostró que una alta extracción en general va asociada a una humificación desfavorable e indicó que la extracción tiene una correspondencia inversa a la calidad húmica. Por lo tanto, todos los resultados obtenidos parecen coincidir con la afirmación de la baja calidad húmica de este Vertisol.

CONCLUSIONES

- Las reservas de C orgánico edáfico (COS) y de fracciones húmicas disminuyeron significativamente a causa del manejo convencional (SCQ) respecto al suelo no cultivado (SNC), donde resultaron los máximos valores de las reservas orgánicas estudiadas. Dicha disminución del COS significó una reducción de 1.6% de la materia orgánica del suelo (MOS) del Vertisol.
- Tras diez años consecutivos de empleo de la siembra directa con aporte de residuos tras el empacado (SDE) se incrementaron las reservas de COS y ácido fúlvico (AF) en 14 y 5 $Mg\ ha^{-1}$ de C, respectivamente, en relación con la SCQ; este aumento del COS representó un incremento de 1% del contenido de MOS. Además, la SDE superó a la SDR en sus reservas de COS en casi 6 $Mg\ ha^{-1}$ de C.
- La eficiencia extractiva de la fracción soluble se incrementó significativamente cuando el suelo fue poco perturbado; así, el incremento de aporte del residuo orgánico correspondió a 79% en la SDR.
- Todos los sistemas de manejo presentaron alta densidad aparente como indicador de la compactación del suelo, por tal motivo, en ningún caso se logró restablecer una porosidad aceptable. Dicha compactación ocasiona hidromorfia (acentuada por el tipo de riego y la presencia de lluvias) y parece ser la causa última de la baja calidad húmica en este Vertisol.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por el financiamiento otorgado a través del Proyecto G33156-B. Al Dr. Jorge Etchevers-Barra, Dra. Claudia Hidalgo-Moreno y M.C. Juliana Padilla-Cuevas por la asesoría y el apoyo otorgados en el análisis químico de suelos.

LITERATURA CITADA

- Aguilera-Contreras, M. y R. Martínez-Elizondo. 1996. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. 4ª edición. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Bayer, C., J. Mielniczuk, L. Martín-Neto y P. R. Ernani. 2002. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no tillage on a subtropical soil. *Plant Soil* 238: 133-140.
- Blaise, D. y C. D. Ravindran. 2003. Influence of tillage and residue management on growth and yield of cotton grown on a Vertisol over 5 years in a semiarid region of India. *Soil Tillage Res.* 70: 163-173.
- Canellas, L. P., A. C. X. Velloso, V. M. Rumjanek, F. Guridi, F. Lopes-Olivares, G. de A. Santos y R. Braz-Filho. 2001. Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of an Ultisol under cultivation of eucalyptus and sugar cane. *Terra* 20: 371-381.
- Chan, K. Y., D. P. Henna y A. Notes. 2002. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil Tillage Res.* 63: 133-139.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding y J. B. Dixon. 1996. Overview of Vertisols: characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.* 57: 289-375.
- Crohn, D. M. 1995. Sustainability of sewage sludge land application to northern hardwood forests. *Ecol. Applications* 5: 53-62.
- Crovetto, C. 1996. Stubble over the soil. The vital role of the plant residue in soil management to improve soil quality. Special Publication 19. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Dabin, B. 1971. Etude d'une méthode d'extraction de la matière humique du sol. *Scie. Sol.* 1: 47-64.
- Deen, W. y P. K. Katak. 2003. Carbon sequestration in a long term conventional versus conservation tillage experiment. *Soil Tillage Res.* 74: 143-150.
- Duchaufour, P. 1987. Edafología, 2 constituyentes y propiedades del suelo. Masson. Madrid, España.
- Etchevers-Barra, J. D. 1988. Análisis químico de suelos y plantas. Volumen 1. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Chapingo, estado de México.
- Figueroa-Sandoval, B., L. E. Chalita-Tovar, R. Valdivia-Alcalá, J. L. Jaramillo-Villanueva y M. Silva-González. 2001. Ecología y desarrollo sustentable: labranza de conservación. Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Flaig, W., H. Beutelspacher y E. Rietz. 1975. Chemical composition and physical properties of humic substances. pp. 1-211. In: Giesecking, J. E. (ed.). *Soil components*. Vol. 1. Organic components. Springer Verlag. New York, NY, USA.
- Freixo, A. A., P. L. de A. Machado, H. P. dos Santos, C. A. Silva y F. de S. Fadigs. 2002. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 64: 221-230.
- Fyles, J. W., I. H. Fyles, W. J. Beese y M. C. Feller. 1991. Forest floor characteristics and soil nitrogen availability on slash burned sites in Coastal British Columbia. *Can. J. For. Res.* 21: 1516-1522.
- Gallardo, J. F. 1999. Relationship between total extractable organic C and some parameters of soils from Western Spain. *Humic Subst. Environ.* 1: 15-20.
- Gallardo, J. F. y A. García. 1973. Estudio del perfil de materia orgánica en suelos de la Región Oeste de España: relaciones y conclusiones finales. *An. Edaf. Agrobiol.* 32: 535-549.
- García, E. 1987. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Ghunan, B. S. y H. S. Sur. 2001. Tillage and residue management effects on soil properties and yields of rainfed maize and wheat in a subhumid subtropical climate. *Soil Tillage Res.* 58: 1-10.
- Graham, M. H., R. J. Haynes y J. H. Meyer. 2002. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Eur. J. Soil Sci.* 53: 589-598.
- Guido, B., D. Sorajuria, H. Rosatto, H. Spain y C. Ferrero. 2003. Perfil de la compactación producida por el tráfico en un suelo bajo siembra directa. *Agro-Ciencia* 19:107-113.
- Heal, O. W., J. M. Anderson y M. J. Swift. 1997. Plant litter quality and decomposition: a historical overview. pp. 3-30. In: Cadisch, G. y K. E. Giller (eds.). *Driven by nature, plant litter quality and decomposition*. CAB International. London, UK.
- Holland, J. M. 2004. Environmental consequences of adapting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence review. *Agric. Ecos. Env.* 103: 1-25.
- Jackson, M. L. 1982. Análisis químico de suelos. 4ª ed. Omega. Barcelona, España.
- Kaurichev, I. S. 1984. Prácticas de edafología. Ed. Mir. Moscú, Rusia.
- Kononova, M. M. 1981. Materia orgánica del suelo, su naturaleza, propiedades y métodos de investigación. Oikos-tau Ediciones. Barcelona, España.
- Labrador-Moreno, J. 2001. La materia orgánica en los agroecosistemas. 2ª edición. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi Prensa. Madrid, España.
- Manna, M. C., P. K. Ghosh y C. L. Acharya. 2003. Sustainable crop production through management of soil organic carbon in semiarid and tropical India. *J. Sustainable Agric.* 21: 87-116.
- Martínez-Garza, A. 1988. Diseños experimentales. Trillas. México, D. F. and tropical India. *J. Sustainable Agric.*
- Matus, F. J. 1994. The distribution of soil organic matter of various aggregates size classes in arable soils. II. Residual organic ¹⁴C, residual ¹⁴N, microbial biomass ¹⁴C and ¹⁴N mineralization rates in a sand and a clay soil. Pp. 99-114. In: Matus, F. J. (ed.). *Crop residues decomposition, residual soil organic matter and nitrogen mineralization in arable soils with contrasting textures*. DLO Research Institute for Agro Biology and Soil Fertility. Wageningen, The Netherlands.
- McCarthy, P. 2001. The principles of humic substances. *Soil Sci.* 166: 738-751.
- McConkey, B. G., B. C. Liang, C. A. Campbell, D. Curtis, A. Moulin, S. A. Brandt y G. P. Lafond. 2003. Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils. *Soil Tillage Res.* 74: 81-90.
- McQueen, D. J. y T. G. Shepherd. 2002. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil

- (Typic Endoaquept) under varying duration of cropping, Manawatu Region, New Zealand. *Soil Tillage Res.* 63: 93-107.
- Mora-Gutiérrez, M., V. Ordaz-Chaparro, J. Z. Castellanos, A. Aguilar-Santelises, F. Gavi y V. Volke-Haller. 1999. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un Vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra* 19: 67-74.
- Piccolo, G., A. Mígherina y R. A. Rosell. 1996. Fracciones de la materia orgánica humificada de un suelo laterítico en el periodo de degradación y recuperación de la fertilidad (Misiones, Argentina). Informe Técnico 64. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul. Misiones, Argentina.
- Rebolledo-Robles, H. H. 2002. Manual SAS por computadora, análisis estadísticos de datos experimentales. Trillas. México, D. F.
- Reyes-Ortigoza, A. L. y N. E. García-Calderón. 2004. Evolución de las fracciones húmicas de suelos en la zona chinampera de la ciudad de México. *Terra* 22: 289-298.
- Robertson, F. A. y P. J. Thorburn. 2001. Crop residue effects on soil C and N cycling under sugarcane. pp. 112-119. *In*: Rees, R. M., B. C. Ball, C. D. Campbell y C. A. Watson (eds.). Sustainable management of soil organic matter. CABI Publishing. New York, NY, USA.
- Roscoe, R. y P. Buurman. 2003. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil Tillage Res.* 70: 107-119.
- Saharawat, K. L. 2003. Organic matter accumulation in submerged soils. *Adv. Agron.* 81: 169-201.
- Salinas-García, J. R., A. D. Baez-González, M. Tiscareño-López y E. Robles-Robles. 2001. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 59: 67-79.
- Schnitzer, M. 2000. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. *Adv. Agron.* 68: 3-58.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy a basic system of soil classification for making an interpreting soil surveys. 2a ed. Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Soza, E., M. Tourn, G. Botta y J. Smith. 2003. Siembra directa y convencional de trigo (*Triticum aestivum* L.): eficiencia de implantación con relación a la compactación del suelo al momento de la siembra. *Agro-Ciencia* 19: 121-128.
- Swift, R. S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.* 166: 858-971.
- Tamames, R. 2002. Agricultura de conservación, un enfoque global. Instituto de Cuestiones Agrarias y Medio Ambientales. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Tubeileh, A., V. Groleav-Renaud, S. Plantureux y A. Guckert. 2003. Effect of soil compactation on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. *Soil Tillage Res.* 71: 151-161.
- Wairio, M. y R. Lal. 2003. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on slopping lands of Kolombangara, Solomon Islands. *Soil Tillage Res.* 70: 19-27.
- Zelcke, T. B., M. C. J. Grevers, B. C. Si, A. R. Mermut y S. Beyene. 2004. Effect of residue incorporation on physical properties of the surface soil in the South Central Rift Valley of Ethiopia. *Soil Tillage Res.* 77: 35-46.