

EFFECTO DE LAS PRACTICAS DE MANEJO DEL SUELO EN LA CAPTURA Y ESTABILIZACION DEL CARBONO

Soraya Alvarado Ochoa¹

RESUMEN

La material orgánica en el suelo es una propiedad dinámica y con capacidad de respuesta a muchos factores. La posibilidad de aumentar el potencial de captura de carbono (C) en el suelo a través de cambios en el uso de la tierra y las prácticas de manejo agrícola ha sido de gran interés en la última década debido a la preocupación que despierta el cambio en el balance global de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico. No obstante, como resultado de la complejidad de la naturaleza de la materia orgánica en el suelo, aún existe la necesidad de desarrollar procedimientos que permitan monitorear la estabilización de la materia orgánica en el suelo tomando en cuenta todos los factores que inciden sobre esta propiedad.

El presente estudio caracteriza los efectos de algunas prácticas de manejo (labranza, fertilización nitrogenada, aplicación de enmienda orgánica, y rotación de cultivos) sobre la estabilización de la materia orgánica del suelo. Se determinó el contenido de C en el suelo y en sus fracciones físicamente separadas; además se utilizó la técnica de la abundancia natural $\delta^{13}\text{C}$ para estudiar la estabilidad de las distintas fracciones de la materia orgánica.

Los resultados indican que las prácticas de manejo afectan el contenido de materia orgánica así como la estabilidad de la misma. Sin embargo, la magnitud de dicho efecto depende del tipo de fracción de materia orgánica, la cual está directamente ligada con la estructura del suelo. El incremento de los niveles de materia orgánica en el suelo estuvo asociado con la labranza cero, fertilización nitrogenada, aplicación de enmienda orgánica y el incremento del cultivo de maíz en la rotación. La distribución del tamaño de agregados en el suelo está determinando la capacidad de almacenaje de C. La proporción de C más recientemente depositado mostró una relación directa y proporcional con el tamaño de los agregados; los micro-agregados dentro de macro-agregados acumularon la mayoría del C recientemente depositado en todos los tratamientos y experimentos evaluados. Estos resultados sugieren que la estabilización de la materia orgánica en el suelo, afectada por las prácticas de manejo agrícola, requiere de una ubicación específica dentro de la matriz de un suelo; lo que implica una clara interrelación de las distintas formas de C y el tamaño y estabilidad de los agregados en un suelo.

Palabras clave: Estabilización del carbono, labranza cero, abundancia natural $\delta^{13}\text{C}$

INTRODUCCION

El suelo juega un rol fundamental en el ciclo del C, siendo una fuente tanto de emisión como de captura de CO₂. El C del suelo se pierde en forma de CO₂ a través del proceso de mineralización; mientras se almacena por medio de las plantas, las cuales fijan CO₂ atmosférico vía fotosíntesis. El C capturado en un suelo agrícola, en forma de materia orgánica, se constituye en un componente fundamental pero transitorio teniendo un impacto directo sobre muchas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Gregorich et al., 1994).

Más de dos tercios de C orgánico capturado en ecosistemas terrestres están en forma de materia orgánica en el suelo (Schlesinger, 1997); sin embargo, los sistemas de cultivo intensivo han contribuido significativamente a la liberación de CO₂ a la atmósfera (Cole et al., 1997). Cambios en el

¹ Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias - INIAP. Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. Estación Experimental Santa Catalina. Quito, Ecuador. Correo electrónico: spalv_2000@yahoo.com

tipo e intensidad del manejo de la tierra han sido ligados con el potencial que los suelos agrícolas tienen para capturar nuevamente algo de este C perdido (Lal, 2004; DeGryze et al., 2004). Por lo que, modificaciones en el manejo del suelo y los cultivos podrían jugar un rol importante en la mitigación del cambio climático.

Las prácticas de manejo de suelo afectan los niveles de materia orgánica alterando el tiempo de degradación y la cantidad de residuos orgánicos presentes en el suelo. Algunos estudios han demostrado que aumentando el aporte de residuos orgánicos (con adiciones de fertilizantes y/o enmiendas orgánicas, inclusión de leguminosas y cultivos de cobertura, y reducción en la frecuencia de los períodos de barbecho) causan una acumulación gradual de materia orgánica en el suelo (Kuo et al., 1997, Rasmussen et al., 1980). Adicionalmente, la labranza es otra práctica agrícola que afecta los niveles de materia orgánica en el suelo. La labranza cero está asociada usualmente con incrementos del nivel de materia orgánica, en contraste con la labranza convencional (Blevins et al., 1977; Blevins et al., 1983; Lamb et al., 1985; Havlin et al., 1990; Paustian et al., 1992; Smith et al., 1998; Díaz-Zorita y Grove, 2002; Amado et al., 2006). Esto ha sido explicado por la reducción en el tiempo de desintegración de los agregados bajo sistemas de labranza cero o reducida, lo que da lugar a la formación de micro-agregados estables y consecuentemente secuestran y estabilizan C por períodos de tiempo más largos (Six et al., 2000a). Sin embargo, la magnitud del cambio que se observa en el contenido de materia orgánica debido al manejo de labranza reducida o cero varía con el tipo de suelo y con otras prácticas de manejo agrícola que sean utilizadas simultáneamente.

La estabilización del C en el suelo ha sido explicada por uno o más de los siguientes mecanismos, dependiendo del tipo de suelo, condiciones medio ambientales y de manejo (Sollins et al, 1996): (1) interacciones órgano-minerales, las cuales están ligadas con el tipo y la cantidad de arcilla; (2) inaccesibilidad, la que está determinada por las características estructurales, tales como tamaño y estabilidad de agregados; y (3) estabilización bioquímica a través de la formación de compuestos recalcitrantes.

Con estos antecedentes y con el afán de caracterizar la capacidad de captura y estabilización del C en suelos agrícolas bajo distintos sistemas de manejo; este estudio se enfocó en tres experimentos de campo que han evaluado por algunos años la fertilización nitrogenada, sistemas de labranza, la aplicación de enmienda orgánica y la rotación de cultivos. Los objetivos específicos, entonces, fueron determinar los efectos de los diferentes sistemas de manejo sobre (1) la capacidad de almacenamiento de C en el suelo y sus fracciones, y (2) la estabilización del C en fracciones de la materia orgánica físicamente separadas.

MATERIALES Y METODOS

Experimentos de campo

Los experimentos de campo estudiados fueron tres, los cuales estuvieron ubicados en la Estación Experimental “Spindletop” de la Universidad de Kentucky, cerca de la ciudad de Lexington, Kentucky, Estados Unidos de Norte América. La temperatura y precipitación anual promedio es de 13°C y 113 cm; respectivamente. El suelo es Franco limoso de la serie Maury con buenas características de drenaje (Typic Paleudalfs), y una mineralogía predominada por la presencia de esmectita-vermiculita, mica, y caolinita (Karathanasis, 1991). Todos los tres experimentos habían estado bajo el cultivo de pasto (*Poa pratensis*, L.) desde 1920 (Blevins et al., 1977).

Experimento de campo 1-Labranza y fertilización nitrogenada

Los efectos de diferentes tipos de labranza y fertilización nitrogenada han sido evaluados en este experimento desde 1983 bajo un diseño experimental de parcelas divididas con cuatro repeticiones.

Los tratamientos muestreados incluyeron dos niveles de nitrógeno (N) (0 and 150 kg N/ha) en dos sistemas de labranza: convencional (MP) y labranza cero (NT).

Experimento de campo 2- Aplicación de enmienda orgánica y fertilización nitrogenada

Este experimento ha evaluado, desde 1992, los efectos de la aplicación de enmienda orgánica y fertilización nitrogenada bajo un sistema de labranza cero, con un diseño experimental de parcelas divididas y tres repeticiones. Los tratamientos muestreados fueron dos niveles de fertilización nitrogenada (0 and 168 kg/ha) en dos regímenes de aplicación de enmienda orgánica: sin gallinaza y gallinaza aplicada en primavera de cada año.

Experimento de campo 3- Rotación de cultivos

Este experimento fue iniciado en 1983 con el objeto de evaluar los efectos de la rotación de cultivos sobre el rendimiento de maíz, bajo un sistema de labranza cero, con diseño experimental de parcelas divididas y cuatro repeticiones. Los tratamientos muestreados incluyeron monocultivo de maíz (ccccc), maíz en trigo/soya-maíz (w/sC), primer año de maíz en pasto-pasto-maíz-maíz-maíz (hhCcc), segundo año de maíz en pasto-pasto-maíz-maíz-maíz (hhcCc), y tercer año de maíz en pasto-pasto-maíz-maíz-maíz (hhccC); todos estas rotaciones bajo un sólo nivel de fertilización nitrogenada (180 kg N/ha).

Muestreo

Los tres experimentos de campo fueron muestreados durante el año 2006, a dos profundidades (0-10 and 10-20 cm). En cada parcela se definieron dos puntos de muestreo, y en cada uno de ellos se tomaron tres muestras a cada profundidad. La primera muestra fue utilizada para determinar densidad aparente y humedad, la segunda muestra fue usada para caracterizar la estabilidad de agregados y otras propiedades físico-químicas; y en la tercera muestra se realizó el fraccionamiento físico (agregados estables en agua). Adicionalmente, se tomaron muestras del área cercana al experimento, cuya vegetación (pasto) no ha alterada los últimos 50 años.

Caracterización de los suelos

Análisis general de suelos

La densidad aparente fue determinada por el método del cilindro (Blake and Hartge, 1986). Los análisis físico-químicos fueron realizados en suelo secado al aire, molido y tamizado por una malla de 2 mm. El pH del suelo fue determinado por potenciometría en una suspensión acuosa (relación suelo:agua de 1:2.5). La textura fue determinada por el método de la pipeta (Sheldrick and Wang, 1993). Nutrientes disponibles (P, K, Ca, Mg, Zn, and Mn) fueron determinados por espectroscopia de plasma inductivamente acoplado utilizando Mehlich III como solución extractante. Los contenidos totales de C y N fueron analizados por combustión seca (Nelson and Sommers, 1982).

Análisis de estabilidad de agregados

La distribución del tamaño de agregados fue determinada utilizando el método de tamizado húmedo (Yoder, 1936) con tamices de 5, 2 y 0.5 mm y un tamaño de muestra de 50 g. Como una medida de la estabilidad estructural del suelo, el peso del diámetro medio (MWD) fue calculado utilizando la siguiente fórmula,

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i W_i$$

donde $i= 1, 2, 3, \dots, n$ corresponde a cada fracción recogida, incluyendo la que pasa el más fino de los tamices; x_i es el diámetro medio de cada fracción y W_i es el peso proporcional de cada fracción de agregados.

Fraccionamiento de agregados estables en agua

Los agregados estables en agua fueron obtenidos como lo describe Elliot (1986), y Angers and Mehuy (1993). Brevemente, 25 g de sub-muestra son tamizados vía húmeda utilizando tres tamices para obtener 4 fracciones: (1) $>2000 \mu\text{m}$ (macro-agregados grandes-LM), (2) $2000-250 \mu\text{m}$ (macro-agregados pequeños-SM), (3) $250-53 \mu\text{m}$ (micro-agregados), y (4) $<53 \mu\text{m}$ (limo y arcilla). El material remanente en cada tamiz y el que resulta de decantar la fracción de tamaño $<53 \mu\text{m}$ son secados a 60°C . Es necesario realizar una corrección por la presencia de partículas primarias o arena ($>53 \mu\text{m}$) en cada fracción de agregados.

Aislamiento de agregados contenidos en macro-agregados (intra-macro-agregados)

Fracciones seleccionadas de macro-agregados estables en agua fueron sujetos a un fraccionamiento densitométrico y de tamizado húmedo, el cual fue modificado a partir de Skjemstand et al. (1990), Golchin et al. (1994), Six et al. (1998), y Sohi et al. (2001) y se sintetiza en la figura 1. Las fracciones resultantes de este procedimiento son: liviana libre, liviana ocluida, $>250 \mu\text{m}_{\text{SM o LM}}$, $250-53 \mu\text{m}_{\text{SM o LM}}$, y $<53 \mu\text{m}_{\text{SM o LM}}$; dichas fracciones fueron pulverizadas para la determinación de contenidos de N y C.

Análisis elemental e isotópico

Cada fracción de agregados estables en agua e intra-macro-agregados fue sujeta a un análisis isotópico de ^{13}C y ^{15}N . Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ fueron calculados de las relaciones isotópicas ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) y ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$); respectivamente, de la muestra (R_1) y el estándar (R_2):

$$\delta^{13}\text{C} \text{ o } \delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = \frac{(R_1 - R_2)}{R_2} \times 10^3$$

Usando la media de los valores de $\delta^{13}\text{C}$, se aplicó el método de la abundancia natural para estimar la proporción de C derivado del cultivo de maíz (C derivado de plantas C_4) bajo los diferentes tratamientos de manejo agrícola (Angers y Giroux, 1996):

$$f = \frac{(\delta_s - \delta_m)}{(\delta_c - \delta_m)}$$

donde f = proporción de C derivado de maíz, $\delta_s = \delta^{13}\text{C}$ de la muestra (las fracciones de agregados), $\delta_m = \delta^{13}\text{C}$ del suelo muestreado en el pasto fuera del experimento de la fracción de agregados correspondiente, y $\delta_c = \delta^{13}\text{C}$ de los residuos de raíces del maíz, el cual fue sumido un valor típico de -12.3‰ .

La cantidad de C derivado de plantas C_4 (C_1) y C derivado de plantas C_3 (C_0) presente en las fracciones de agregados fue calculado como sigue:

$$C_1 = C \times f \text{ y } C_0 = C \times (1 - f)$$

Donde C es la concentración total de C de la fracción de agregados (Zach et al., 2006).

Análisis Estadístico

El programa SAS (1999) fue utilizado para realizar todo el análisis estadístico. Todas las variables fueron evaluadas con el análisis de varianza (ANOVA), utilizando un modelo basado en el diseño de cada experimento de campo del que procedían las muestras. La separación de medias se determinó utilizando el modelo LSD (Saxton, 1998). Adicionalmente, los efectos del tamaño de agregado y el tipo de fracción intra-macro-agregado sobre los contenidos totales de C y N, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, C derivado de plantas C_3 , y C derivado de plantas C_4 se analizaron usando un diseño completamente al azar, el cual fue efectuado separadamente para cada tratamiento de los experimentos de campo.

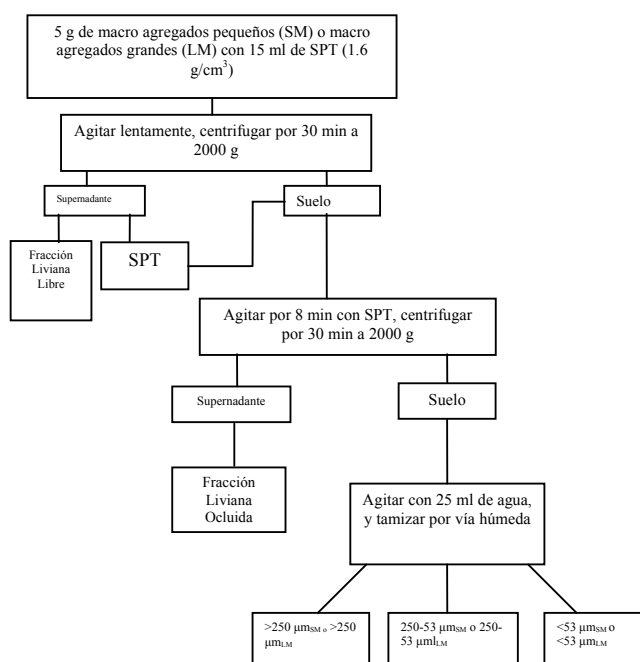


Gráfico 1. Esquema de fraccionamiento de intra-macro-agregados utilizando solución de polytungstato de sodio (SPT) como líquido pesado. Procedimiento modificado a partir de Skjemstand (1990),

RESULTADOS Y DISCUSION

Las propiedades físico-químicas de los suelos estudiados fueron significativamente afectadas por las prácticas de manejo agrícola, y cada uno de los efectos fue específico para cada profundidad en los tres experimentos de campo. La mayoría de los efectos de labranza, aplicación de enmienda orgánica, y rotación de cultivos estuvieron reflejados en la capa superficial del suelo, lo cual ha sido observado en otros estudios (Dick, 1984; Selles et al., 1997; Díaz-Zorita y Grove, 2002). Los resultados también indicaron que la labranza cero, la aplicación de enmienda orgánica y el incremento del cultivo de maíz en la rotación claramente incrementan el contenido de humedad en el suelo. De otra parte, la fertilización nitrogenada y la rotación del cultivo tiene mayor impacto sobre el pH y la densidad aparente; mientras la aplicación de enmienda orgánica tiene un impacto directo sobre el nivel de disponibilidad de nutrientes.

El índice de estabilidad de agregados MWD indicó que esta propiedad decrece como respuesta a la aplicación de N; pero se incrementa bajo el sistema de labranza cero, la aplicación de enmienda orgánica y el incremento del cultivo de maíz en la rotación. En todos los experimentos, la distribución

del tamaño de los agregados estuvo principalmente influenciada por el tipo de labranza. La labranza convencional destruyó especialmente macro-agregados grandes (gráfico 2), lo cual también ha sido documentado por Six et al. (2000a). En su defecto, la labranza cero favoreció la formación de macro-agregados pequeños, con excepción de la combinación de labranza cero e incremento del cultivo de maíz en la rotación; en donde se observó un incremento en el tamaño de la fracción de macro-agregados grandes. Estos resultados concuerdan con aquellos reportados por Wander and Bollero (1999) y Angers et al. (1993a, b) quienes reportan que el MWD de los agregados estables en agua bajo labranza cero es 40% más grande comparado con aquel de labranza convencional. Esto ha sido atribuido al tiempo reducido de desintegración de agregados bajo un sistema de labranza cero, lo cual favorece la formación de micro-agregados estables (Six et al., 2000a).

La capacidad de captura de C en los suelos estudiados estuvo afectada por las prácticas de manejo. La labranza cero incrementó el contenido total de C en la superficie del suelo comparado con la labranza convencional como se muestra en la tabla 1, lo cual ya ha sido documentado en otros estudios (Blevins et al., 1977; Blevins et al. 1983; Deneff et al., 2004). Estos resultados se explican puesto que la labranza convencional promueve la pérdida de materia orgánica a través de la degradación de macro-agregados y exposición del C orgánico a descomposición microbiana (Six et al., 2000a); y favorece la aireación, incrementando los niveles de mineralización (Elliott, 1986). Adicionalmente, la estratificación del C estuvo asociada con la labranza cero en todos los tres experimentos estudiados, mostrando el contenido más alto en la capa superficial, lo cual reforzó el concepto de estratificación de nutrientes asociado con sistemas de labranza cero (Lamb et al., 1985; Díaz-Zorita and Grove, 2002).

De otra parte, la fertilización nitrogenada acrecentó el efecto de la labranza cero en la superficie del suelo; mientras, en la capa sub-superficial (10-20 cm de profundidad), la labranza no tiene efecto sobre la captura de C, pero la fertilización nitrogenada aún favorece niveles altos de C en el suelo independiente del tipo de labranza. Resultados similares han sido reportados por otros autores (Blevins et al., 1977; Blevins et al., 1983; Allmaras et al., 2004) e ilustran la importancia del N en proceso de captura de C en el suelo (Campbell and Zentner, 1993). En cuanto a la aplicación de enmienda orgánica, esta aumentó el contenido de C en las capas superficial y sub-superficial del suelo como también lo reportó Roder et al. (1988). El monocultivo de maíz y la rotación hhCcc incrementaron el contenido superficial de C en el suelo.

Las prácticas de manejo también afectaron los contenidos de C en los agregados estables en agua. Sin embargo, no todas las prácticas de manejo se reflejaron en cada una de las fracciones de agregados estables. La labranza cero y la fertilización nitrogenada aumentaron el contenido de C en todas las fracciones de agregados como se muestra en la tabla 2; mientras la aplicación de enmienda orgánica incrementó el contenido de C en todas las fracciones de agregados con excepción de la fracción de menor tamaño. Dicho resultado no se esperaba considerando que los desechos orgánicos animales poseen material biológicamente procesado (Christensen, 1992), el cual se enriquecería la fracción de arcilla. El aumento del cultivo de maíz en la rotación favoreció el aumento del contenido de materia orgánica sólo en macro-agregados grandes y micro-agregados. Estos resultados sugieren que las prácticas de manejo que aumentan la tasa de retorno de residuos ricos en C al suelo, aumentan el nivel de C en agregados y por lo tanto favorecen la captura de C en el suelo a largo plazo (Kuo et al., 1997). En contraste, la calidad de C de los residuos explicaría el bajo nivel de C observado en los agregados de la rotación w/sC. Al respecto, Martens (2000) reportó que los ácidos húmicos se reducen bajo la presencia de residuos de soya, los cuales son bajos en contenidos de ácidos fenólicos comparados con los residuos de maíz.

El concepto de jerarquía a nivel de agregados (Tisdall and Oades, 1982; Six et al., 2000b) no fue observado entre las tres fracciones más grandes de agregados estables en agua, en todos los tres experimentos estudiados. El incremento en la concentración de C con el aumento del tamaño de agregado era lo esperado, ya que de acuerdo al principio de jerarquía los agregados más grandes están compuestos de agregados más pequeños y agentes aglomerantes orgánicos (Elliott, 1986). No obstante,

la relación decreciente de C/N (datos no mostrados) sugiere que el C orgánico en la fracción de limo y arcilla es más estable y menos disponible comparado con las demás fracciones de agregados. Adicionalmente, la capacidad de captura de C por parte de los agregados estables en agua estuvo determinado por las prácticas de manejo, las cuales controlaron la distribución del tamaño de los agregados (gráficos 3 y 4). La captura de C más alta estuvo asociada con los macro-agregados pequeños y con los micro-agregados en el caso de labranza convencional, con macro-agregados grandes en todas las rotaciones que incluyen el cultivo de maíz, y con macro-agregados grandes y pequeños bajo labranza cero y la aplicación de enmienda orgánica. Estos resultados no son consistentes con Deneff et al. (2004) quienes reportan que 90% de la diferencia en contenidos de C entre labranza convencional y cero se explica por la diferencia de contenido de C en micro-agregados únicamente.

Las prácticas de manejo afectaron también la distribución de masa así como el contenido de C a nivel de las fracciones intra-macro-agregado (tablas 3 y 4). La labranza y la fertilización nitrogenada afectaron la distribución de masa entre las fracciones más gruesas. El efecto de rotación se reflejó en la fracción liviana libre. Sin embargo, la fracción más fina (limo y arcilla) fue la dominante en todas las fracciones de macro-agregados estables en agua para los tres experimentos estudiados. Estos resultados indican que la fracción liviana no es necesariamente la más sensible a las prácticas de manejo como lo sugieren Bremer et al. (1994) y Franzluebbers y Stuedemann (2002). Sin embargo, es importante remarcar que en el presente estudio, la fracción liviana no fue aislada del suelo integro; además, la eficiencia de los fraccionamientos por densidad así como los contenidos de C orgánico en las fracciones aisladas están relacionados directamente con la densidad de los líquidos utilizados en este tipo de fraccionamientos (Ladd and Amado, 1980).

En cuanto a los contenidos de C en las fracciones intra-macro-agregado, los micro-agregados ($250-53 \mu\text{m}_{\text{SM}}$ y $250-53 \mu\text{m}_{\text{LM}}$) mostraron los valores más altos; mientras la fracción liviana ocluida presentó los valores más bajos. Estos resultados son similares a los reportados por Degryze et al. (2004) y Kong et al. (2005), quienes encontraron que la mayoría del C acumulado debido a la incorporación de residuos orgánicos en el suelo fueron preferencialmente guardados en micro-agregados dentro de macro-agregados pequeños. De otra parte, la relación C/N (datos no mostrados) de estas fracciones nos sugiere el siguiente orden creciente del grado de humificación: liviana libre < liviana ocluida < $250-53 \mu\text{m}_{\text{SM}} \text{ ó } \text{LM}$ < $53 \mu\text{m}_{\text{SM}} \text{ ó } \text{LM}$; lo cual es consistente con los resultados de John et al. (2005) y Christensen (1992), quienes reportaron que las fracciones de material orgánico libre o no complejo están compuestas de residuos de plantas y animales en descomposición con una relación C/N relativamente alta; mientras, la fracción pesada, la cual incluye la materia orgánica complejada con la fracción mineral del suelo, mostraba una relación C/N baja.

La estabilidad de la materia orgánica de las fracciones físicamente separadas respondió al tipo de manejo agrícola. La labranza cero, la aplicación de enmienda orgánica, así como el incremento del cultivo de maíz en las rotaciones estudiadas estuvieron asociadas con valores más altos de $\delta^{13}\text{C}$; mientras la contrario ocurrió con la fertilización nitrogenada. En el caso de la labranza cero, los resultados de esta investigación concuerdan con Clapp et al. (2000) y Six et al. (2002a), quienes sugieren la formación de micro-agregados estables bajo sistemas de labranza cero, los cuales son capaces de capturar el C a largo plazo. Es importante recalcar que las proporciones de C recientemente depositado en las rotaciones w/sC y monocultivo de maíz nos indican la importancia de la calidad y composición de los residuos orgánicos como factores para la estabilización del C en el suelo.

Adicionalmente, el enriquecimiento de $\delta^{13}\text{C}$ con el aumento del tamaño de la fracción de agregados indica que la mayoría del C recientemente depositado se acumuló en macro-agregados, mientras la fracción más estable de C está asociada con la fracción de arcilla y limo como nos indican los gráficos 5 y 6, lo cual es consistente con la vida media calculada para estas fracciones (datos no mostrados) y con los resultados de otras investigaciones (Puget et al., 1995; Angers and Giroux, 1996; Angers et al., 1997; Puget et al., 2000, John et al., 2005). Angers and Giroux (1996) reportó el decrecimiento en el

porcentaje de C recientemente depositado con la disminución del tamaño del agregado: 20.5% (>2000 μm), 18.2% (1000-2000 μm), 11.6% (500-1000 μm), 8.2% (250-500 μm), 3.4% (50-250 μm) y 0.3% (<50 μm) de un suelo bajo 15 años de monocultivo de maíz. John et al. (2005) encontró que el 24% de C recientemente depositado en la fracción <53 μm se incrementó al 47% en la fracción >1000 μm . De otra parte, el efecto de las prácticas agrícolas también se extendió para las fracciones intra-macro-agregado (gráfico 7); sin embargo, menor grado de afectación fue observado en las fracciones livianas libre y ocluida. La mayor proporción de C recientemente depositado estuvo asociado con la fracción 250-53 μm en todos los experimentos de campo, siendo consistente con los valores de tiempo de vida media (datos no mostrados). Este resultado concuerda con los contenidos de C total para esta fracción, los cuales también fueron los más elevados entre todas las fracciones intra-macro-agregado. En concordancia con los resultados de este estudio, Angers et al. (1997) luego de desarrollar un experimento usando residuos de trigo marcados con $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ reportó que la fracción (50-250 μm) de agregados estables en agua estaba envuelta directamente en la captura y estabilización de C en el suelo. Degryze et al. (2004) y Kong et al. (2005) sugieren, también, que los micro-agregados (250-53 μm) que están dentro de los macro-agregados pequeños se constituyen en un indicador ideal del potencial de captura de C en agro-ecosistemas sustentables.

Tabla 1. Concentración de C total en el suelo muestreados a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm) en el experimento de campo 1- Labranza (Labranza cero-NT y labranza convencional-MP) y fertilización nitrogenada (0 y 150 kg N/ha).

Labranza	Nivel de N (kg ha ⁻¹)	0-10 cm			10-20 cm		
		C total	N total	C/N	C total	N total	C/N
		C/N (%)			C/N (%)		
NT	0	2.16b†	0.20b†	10.79‡	1.58§	0.16§	10.23a¶
	150	2.73a	0.25a	10.92	1.65	0.17	10.02a
MP	0	1.52c	0.15c	10.16	1.46	0.15	10.09a
	150	1.58c	0.16c	10.19	1.69	0.16	10.52a

† Interacción de labranza y fertilización nitrogenada estadísticamente significativa (P<0.05)
 ‡ Efecto de labranza estadísticamente significativa (P<0.05)
 § Efecto del nivel de N estadísticamente significativa (P<0.05)
 ¶ Interacción labranza y fertilización nitrogenada estadísticamente significativa (P<0.10)
 Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias estadísticamente significativas (P<0.05, LSD Fisher)
 NT (labranza cero); MP (labranza convencional)

Tabla 2. Carbón orgánico asociado con las fracciones de agregados estables en agua en el experimento 1- Labranza (Labranza cero-NT y labranza convencional-MP) y fertilización nitrogenada (0 y 150 kg N/ha).

Labranza	Nivel de N (kg/ha)	Fracción de Agregados (μm)			
		>2000	2000-250	250-53	<53
		(g C/100g fracción)			
NT	0	1.94†B	2.24b§A	2.23‡A	1.16‡C
	150	2.51AB	2.61aA	2.29B	1.20C
MP	0	1.68A	1.57cA	1.52A	0.97B
	150	2.80A	1.72cB	1.56B	0.98C

† Efecto de la fertilización nitrogenada estadísticamente significativa (P<0.05)
 ‡ Efecto de labranza estadísticamente significativa (P<0.05)
 § Efecto de interacción de labranza y fertilización nitrogenada estadísticamente significativa (P<0.05)
 Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes (P>0.05, LSD Fisher)
 Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes (P>0.05, LSD Fisher)

Tabla 3. Distribución del peso de las fracciones intra-macro-agregado en el experimento 1- Labranza (Labranza cero-NT y labranza convencional-MP) y fertilización nitrogenada (0 y 150 kg N/ha).

Labranza	Nivel de N (kg/ha)	Fracción Intra-macro-agregado				
		Libre	Ocluida	>250 (µm)	250-53 (µm)	<53 (µm)
(g de fracción/100 g de macro-agregado)						
NT	0	0.24nsC	0.04nsC	14.04b†B	14.46b†B	71.21‡A
	150	0.33D	0.06D	13.11bC	16.75aB	69.75A
MP	0	0.20C	0.06D	15.68adB	10.34cB	73.72A
	150	0.24D	0.09D	20.18bB	9.88cC	69.61A

† Efecto de interacción de labranza y fertilización nitrogenada estadísticamente significativo ($\alpha = 0.05$)
‡ Efecto de interacción de labranza y fertilización nitrogenada estadísticamente significativo ($\alpha = 0.10$)
ns = Estadísticamente no significativo ($\alpha = 0.10$)
Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$, LSD Fisher)
Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$, LSD Fisher).

Tabla 4. Concentración de C en las fracciones intra-macro-agregado en el experimento 1- Labranza (Labranza cero-NT y labranza convencional-MP) y fertilización nitrogenada (0 y 150 kg N/ha).

Labranza	Nivel de N (kg/ha)	Fracción Intra-macro-agregado				
		Free	Ocluida	>250 (µm)	250-53 (µm)	<53 (µm)
(g C/100 g fracción)						
NT	0	2.29a‡B	0.57¶D	1.59†C	3.46b‡A	1.38§C
	150	2.10abB	0.73D	2.06B	4.31aA	1.52C
MP	0	1.42bB	0.35E	0.79D	2.48dA	1.12C
	150	2.18adB	0.37D	0.86C	2.83cA	1.14C

† Efecto de la fertilización nitrogenada estadísticamente significativo ($\alpha = 0.05$)
‡ Efecto de interacción de labranza y fertilización nitrogenada estadísticamente significativo ($\alpha = 0.05$)
§ Efecto de labranza y fertilización nitrogenada estadísticamente significativo ($\alpha = 0.05$)
¶ Efecto de labranza estadísticamente significativo ($\alpha = 0.05$)
Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$, LSD Fisher)
Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$, LSD Fisher)

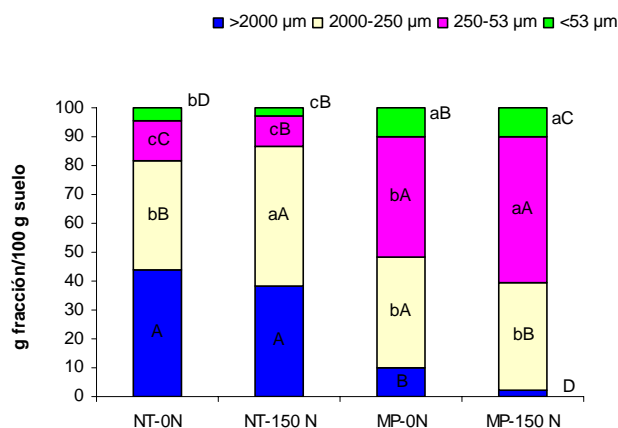


Gráfico 2. Distribución del peso de las fracciones de agregados estables en agua bajo los diferentes tratamientos en el experimento 1-Labranza (Labranza cero-NT y labranza convencional-MP) y fertilización nitrogenada (0 y 150 kg N/ha). Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$, LSD Fisher). Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$, LSD Fisher).

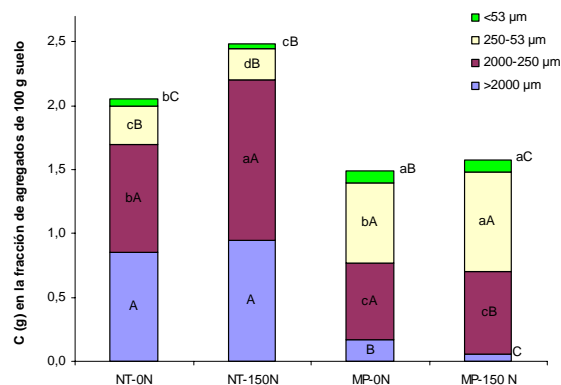


Gráfico 3. Distribución del C orgánico entre los agregados estables en agua en 100 g de suelo para los diferentes tratamientos en el experimento 1-Labranza (Labranza cero-NT y labranza convencional-MP) y fertilización nitrogenada (0 y 150 kg N/ha). Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher). Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher).

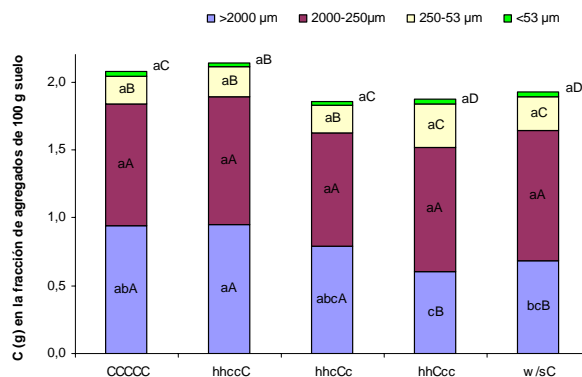


Gráfico 4. Distribución del C orgánico entre los agregados estables en agua en 100 g de suelo para los diferentes tratamientos en el experimento 3-Rotación de cultivos. Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher). Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher).

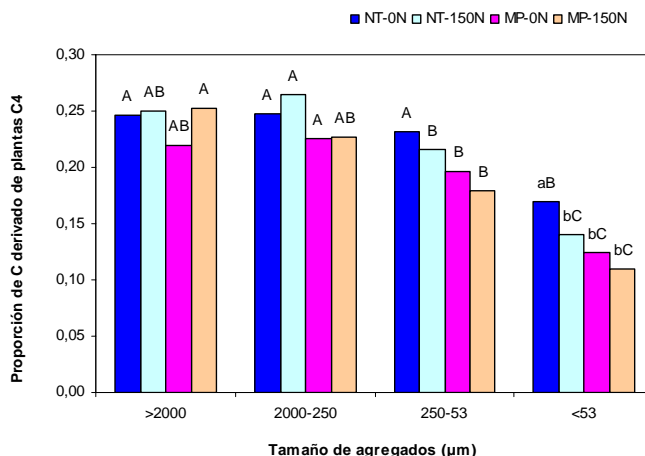


Gráfico 5. Proporción de C orgánico derivado de plantas C₄ en las distintas fracciones de agregados estables en agua para el Experimento 1-(Labranza cero-NT y labranza convencional-MP) y fertilización nitrogenada (0 y 150 kg N/ha). Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher). Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher).

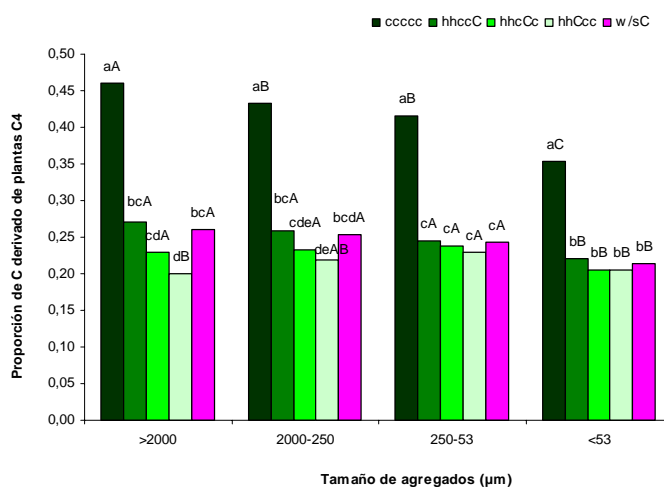


Gráfico 6. Proporción de C orgánico derivado de plantas C₄ en las distintas fracciones de agregados estables en agua para el Experimento 3-Rotación de cultivos. Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher). Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher).

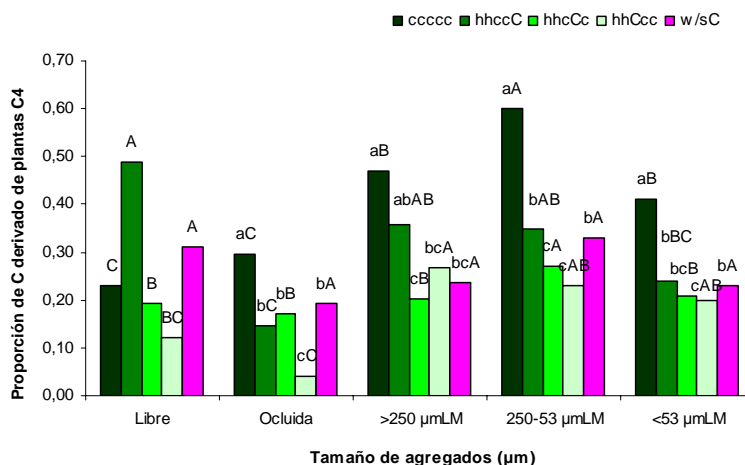


Gráfico 7. Proporción de C orgánico derivado de plantas C₄ en las distintas fracciones de intra-macro-agregados para el Experimento 3-Rotación de cultivos. Los valores medios seguidos por la misma letra minúscula dentro de un mismo tamaño de agregado para cada tratamiento no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher). Los valores medios seguidos por la misma letra mayúscula dentro de un mismo tratamiento para cada tamaño de agregado no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$, LSD Fisher).

CONCLUSIONES

El presente estudio nos indica que las prácticas de manejo definitivamente afectan las propiedades físico-químicas de un suelo y entre ellas la materia orgánica. No obstante, dicha influencia no es homogénea en todo el sistema suelo. Se observaron diferencias de efecto importantes de acuerdo con la profundidad de la capa del suelo, así como entre fracciones físicamente separadas. En general, la labranza cero está asociada con mayor contenido de materia orgánica en la capa superficial comparada con el sistema de labranza convencional. La fertilización nitrogenada, aplicación de enmienda orgánica y el incremento del cultivo de maíz en las rotaciones estudiadas favorecen también la acumulación de materia orgánica. Adicionalmente, la materia orgánica particulada ($>53 \mu\text{m}$) estuvo más enriquecida en C que aquella fracción $<53 \mu\text{m}$. Sin embargo, la capacidad de captura de C de cada fracción estuvo directamente afectada por las prácticas de manejo agrícola, fundamentalmente porque dichas prácticas controlan la distribución del tamaño de los agregados. Finalmente, los micro-agregados dentro de macro-agregados ($250-53 \mu\text{m}_{\text{SM}}$ o $250-53 \mu\text{m}_{\text{LM}}$) representaron a la fracción más enriquecida en material orgánico entre todas las fracciones intra-macro-agregado, aunque dicho enriquecimiento no respondió en forma consistente con las prácticas de manejo entre los tres experimentos de campo estudiados.

La estabilización de la materia orgánica, en las fracciones físicamente separadas e indicada por el método de la abundancia natural $\delta^{13}\text{C}$, es afectada directamente por el manejo agrícola. La labranza cero, la rotación maíz-trigo-soya y el incremento del cultivo de maíz en la rotación pasto-pasto-maíz-maíz-maíz aumentan la proporción de C recientemente depositado; dicho aumento está positivamente relacionado con el tamaño del agregado, especialmente para los experimentos 1 y 3. Estos resultados evidencian que la persistencia de la materia orgánica en el suelo está relacionada con la estructura y específicamente con el tamaño de los agregados; menor persistencia con mayor tamaño de agregado. La mayor parte de C recientemente depositado en macro-agregados está asociado con la fracción de $250-53 \mu\text{m}$, bajo todas las prácticas agrícolas evaluadas en este estudio. Sin embargo, solo la labranza y la rotación de cultivo afectan significativamente al contenido de C en esta fracción. Estos resultados

nos indican que la captura y estabilización de la materia orgánica en el suelo requiere de mucha especificidad en cuanto a la localización que esta alcance dentro de la matriz del suelo.

El fraccionamiento físico de la materia orgánica y el análisis de abundancia natural del ^{13}C muestran que la materia orgánica está asociada con las diferentes fracciones de agregados y tiene distinta edad, dinámica y responde específicamente a cada tipo de práctica agrícola. Sin embargo, se observó que no solamente la protección física sino la cantidad y calidad de los residuos orgánicos incorporados al suelo merecen una atención especial cuando se habla de captura y estabilización de C; consecuentemente, el tiempo de vida media de cada fracción de materia orgánica fraccionada físicamente en este estudio podría estar también representando diferencias en la estructura química.

BIBLIOGRAFIA

- Allmaras, R.R., D.R. Linden, y C.E. Clapp. 2004. Corn-residue transformations into root and soil carbon as related to nitrogen, tillage, and stover management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1366-1375.
- Amado, T.J.C., C. Bayer, P.C. Conceicao, E. Spagnallo, B. Costa de Campos, y M. da Veiga. 2006. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 35:1599-1607.
- Angers, D.A., y G.R. Mehuys. 1993. Chapter 61. Aggregate stability to water. p. 651-657. In M. R. Carter (ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.
- Angers, D. A., N. Bissonnette, A. Legere, y N. Samson. 1993a. Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can J. Soil Sci.* 73:39-50.
- Angers, D. A., N. Samson, y A. Legere. 1993b. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can J. Soil Sci.* 73:51-59.
- Angers, D. A., y M. Giroux. 1996. Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1547-1551.
- Angers, D. A., S. Recous, y C. Aita. 1997. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ -labelled wheat straw in situ. *Eur. J. Soil Sci.* 48:295-300.
- Blake, G. R., y K. H. Hartge. 1986. Bulk Density. En: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Blevins, R. L., G. W. Thomas, y P. L. Cornelius. 1977. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. *Agronomy Journal* 69:383-386.
- Blevins, R. L., G. W. Thomas, M. S. Smith, W. W. Frye, y P. L. Cornelius. 1983. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil Till. Res.* 3:135-146.
- Bremer, E., H. H. Janzen, y A. M. Johnston. 1994. Sensitivity of total, light and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Can. J. Soc. Sci.* 74:131-138.
- Campbell, C. A. y R. P. Zentner. 1993. Soil organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1034-1040.

- Christensen, B. T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in soil science*, Vol. 20. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 1-89.
- Clapp, C. E., R. R. Allmaras, M. F. Layese, D. R. Linden, y R. H. Dowly. 2000. Soil organic carbon and ^{13}C abundance as related to tillage, crop residue, and nitrogen fertilization under continuous corn management in Minnesota. *Soil Till. Res.* 55:127-142.
- Cole, C. V., J. Duxbury, J. Freney, O. Heinemeyer, K. Minami, A. Mosier, K. Paustian, N. Rosenberg, N. Sampson, D. Sauerbeck, y Q. Zhao. 1997. Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 49:221-228.
- DeGryze, S. J., Six, K. Paustian, S. J. Morris, E. A. Paul, y R. Merckx. 2004. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. *Global Change Biol.* 10:1120-1132.
- Denef, K., J. Six, R. Merckx, y K. Paustian. 2004. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1935-1944.
- Díaz-Zorita, M., y J. H. Grove. 2002. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil Till. Res.* 66:165-174.
- Dick, W. A. 1984. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:569-574.
- Elliot, E. T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:627-633.
- Franzluebbers, A. J., y J. A. Stuedemann. 2002. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. *Environ. Pollut.* 116:S53-S62.
- Golchin, A., J. M. Oades, J. O. Skjemstad, y P. Clarke. 1994. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Aust. J. Soil Res.* 32:285-309.
- Gregorich, E. G., M. R. Carter, D. A. Angers, C. M. Monreal, y B. H. Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367-385.
- Havlin, J. L., D. E. Kissel, L. E. Maddus, M. M. Claassen, y J. H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:448-452.
- John B., T. Yamashita, B. Ludwig, y H. Flessa. 2005. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma* 128:63-79.
- Karathanasis, A. D. 1991. Phosphate mineralogy and equilibria in two Kentucky Alfisols derived from Ordovician Limestones. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1774-1782.
- Kong, A. Y. Y., J. Six, D. C. Bryant, R. F. Denison, y C. van Kessel. 2005. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1078-1085.
- Kuo, S., U. M. Sainju, y E. J. Jellum. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:145-152.

- Ladd, J. N., y M. Amado. 1980. Studies of nitrogen immobilization and mineralization in calcareous soils-IV. Changes in the organic nitrogen of light and heavy subfractions of silt- and fine clay-size particles during nitrogen turnover. *Soil Biol. Biochem.* 12:185-189.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1627.
- Lamb, J. A., G. A. Peterson, y C. R. Fenster. 1985. Wheat fallow tillage systems' effect on newly cultivated grassland soils' nitrogen budget. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:352-356.
- Martens, D. A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 32:361-369.
- Nelson, D. W. y L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: A.L. Page, R. H. Miller, D. R. Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*, 2nd ed. ASA-SSSA, Madison, WI.
- Paustian, K., W. J. Parton, y J. Person. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:476-488.
- Puget, P., D. A. Angers, y C. Chenu. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.* 46: 449-459.
- Puget, P., C. Chenu, y J. Balesdent. 2000. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *Eur. J. Soil Sci.* 51:595-605.
- Raimbault, B. A. y T. J. Vyn. 1991. Crop rotation and tillage effects on corn growth and soil structural stability. *Agro. J.* 83:979-985.
- Rasmussen, P. E., R. R. Allmaras, C. R. Rohde, y N. C. Roager Jr. 1980. Crop residue influences on soil carbon and nitrogen in a wheat-fallow system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:596-600.
- Roder, W., S. C. Mason, M. D. Clegg, J. W. Doran, y K. R. Kniep. 1988. Plant and microbial responses to sorghum-soybean cropping systems and fertility management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1337-1342.
- SAS Institute. 1999. Software Version 8. SAS Institute Inc., Carry, NC.
- Saxton, A. M. 1998. A macro for converting mean separation out put to letter groupings in Proc Mixed. En: *Proc.23rd SAS Users Group Intl.*, SAS Institute, Cary, NC, pp. 1243-1246.
- Schlesinger, W. H. 1997. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. 2nd ed. Academic Press Inc., San Diego, CA.
- Selles, F., R. A. Kochhann, J. E. Denardin, R. P. Zentner, y A. Faganello. 1997. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Till. Res.* 44: 23-34.
- Sheldrick, B. H., y C. Wang. 1993. Chapter 47. Particle size distribution. In: M.R. Carter (ed.), *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

- Six, J., E. T. Elliott, K. Paustian, y J. Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1367-1377.
- Six, J., E. T. Elliott, y K. Paustian. 2000a. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32:2099-2103.
- Six, J., K. Paustian, E. T. Elliott, y C. Combrink. 2000b. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1350-1358.
- Skjemstad, J. O., R. P. Le Feuvre, y R. E. Prebble. 1990. Turnover of soil organic matter under pasture as determined by ^{13}C natural abundance. *Aust. J. Soil Res.* 28:267-276.
- Smith, P., D. S. Powlson, M. J. Glendining, y J. U. Smith. 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biol.* 4:679-685.
- Sollins, P., P. Homann, y B. A. Caldwell. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter, mechanisms and controls. *Geoderma* 74:65-105.
- Sohi, S. P., N. Mahieu, J. R. M. Arah, D. S. Powlsen, B. Madari, y J. L. Gaunt. 2001. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1121-1128.
- Tisdall, J. M., y J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Wander, M. M. y G. A. Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:961-971.
- Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agron. J.* 28:337-351.
- Zhang, J. B, C. C. Song, y W. Y. Yang. 2006. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fractions through soil profiles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:660-667.

Agradecimientos

El autor desea expresar su gratitud a todos quienes hicieron posible la realización de esta investigación, de manera especial al Departamento de la Ciencia de Plantas y Suelos de la Facultad de Agricultura de la Universidad de Kentucky-Estados Unidos de Norte América.