

FRACCIONES DE CARBONO ORGÁNICO EN LA CAPA ARABLE: EFECTO DE LOS SISTEMAS DE CULTIVO Y DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

MAXIMILIANO J EIZA*; NATALIA FIORITI; GUILLERMO A STUDDERT y HERNÁN E ECHEVERRÍA

Unidad Integrada Facultad Ciencias Agrarias (UNMP) - EEA INTA Balcarce, C.C. 276, (7620) Balcarce, Argentina.

*Correo electrónico: mjeiza@mdp.edu.ar

Recibido: 18/09/04

Aceptado: 20/05/05

RESUMEN

Nuestro objetivo fue evaluar el efecto de siete sistemas de cultivo (SC) en un experimento de larga duración: pastura permanente (PP), agricultura permanente bajo siembra directa (SD) (SD100) y labranza convencional (LC) (LC100), rotación agricultura pastura (50%-50% del tiempo) bajo SD (SD50) y LC (LC50), rotación agricultura pastura (75%-25% del tiempo) bajo SD (SD75) y LC (LC75) y dos dosis de fertilización nitrogenada: 0 y 120 kg N ha⁻¹, sobre el carbono orgánico total (COT) y particulado (COP), para 0-20 cm en 1994 y para 0-5, 5-20 y 0-20 cm de profundidad en 2003. En 1994, los mayores COP y COT se asociaron a manejos con períodos agrícolas previos cortos. En 2003, se encontraron diferencias entre SC en COT en la capa de 0-5 cm de profundidad, siendo PP, LC50 y SD50 los tratamientos con mayor COT. El COP fue más alto bajo PP, LC50 y SD50 a 0-5 y 0-20 cm de profundidad. A 0-5 cm COP bajo SD fue significativamente mayor que bajo LC. A 5-20 cm de profundidad, las diferencias en COP no fueron claras entre SC aunque, tendió a disminuir con los años bajo agricultura. La fertilización determinó mayor COP a 5-20 y 0-20 cm de profundidad. Las diferencias en la variación entre 1994 y 2003 entre SC fueron significativas para COP y COT. Por otro lado, la variación relativa de COP fue más alta que la de las otras variables. Se concluye que las rotaciones cortas de agricultura-pastura, la SD y la fertilización nitrogenada mejoran el COP y el COT. Para las condiciones de este experimento, COP ha sido un indicador más sensible que COT y sería capaz de detectar los efectos de las prácticas de manejo.

Palabras clave. Manejo de suelos; materia orgánica; materia orgánica particulada; labranzas; rotaciones.

ORGANIC CARBON FRACTIONS IN THE ARABLE LAYER: CROPPING SYSTEMS AND NITROGEN FERTILIZATION EFFECTS

ABSTRACT

In the southeastern Buenos Aires Province (Argentina) unsuitable combination of crop rotation and tillage systems (cropping systems, SC) has reduced soil organic matter content. Our aim was to evaluate the effect of seven SC in a long term experiment (since 1976) started in 1994: permanent pasture (PP), permanent cropping under no tillage (SD) (SD100) and conventional tillage (LC) (LC100), cropping-pasture rotation (50% - 50% of time (3 yr each)) under SD (SD50) and LC (LC50), cropping pasture rotation (75% - 25% of time (6 and 3 yr)) under SD (SD75) and LC (LC75); and two N fertilization rates: 0 and 120 kg N ha⁻¹, on total (COT) and particulate (COP) organic carbon, for 0-20 cm depth in 1994 and for 0-5 cm, 5-20 cm and 0-20 cm depths in 2003. In 1994 COP and COT showed the effect of previous management of different crop rotations under LC, and the shortest the cropping period, the highest COP and COT. In 2003, there were not differences among SC in COT at 5-20 and 0-20 cm depths. At 0-5 cm depth differences were not clear, but PP, LC50 and SD50 (under pasture until sampling) did not differ among them and had COT greater than the other SC. Particulate organic carbon was highest under PP, SD50 and LC50 either at 0-5 and 0-20 cm depths. At 0-5 cm depth there were not differences between SD75 and SD100 nor between LC75 and LC100, although COP under SD was significantly greater than under LC, showing a trend to decrease with cropping years. This difference between tillage systems was not observed at 0-20 cm depth. At 5-20 cm depth, we found unclear differences in COP between SC, although decreasing with cropping years. Total organic carbon was greater at all depths in those plots that had received 120 kg N ha⁻¹, respect to those unfertilized, although not significantly. At 5-20 and 0-20 cm depths, fertilization produced significantly higher COP than without it. Variation between 1994 and 2003 at 0-20 cm depth showed significant differences in COP and COT. There were not differences neither between increases of COP in those SC under pasture in 2003 nor between them and those under SD. On the other hand, relative variation of COP, especially at 0-5 cm depth, was higher than the relative variation of the other variables. It is concluded that short cropping-pasture rotations (50% and 50% of time), SD and N fertilization improve COT and COP and it has been demonstrated the beneficial effect of such practices. For the conditions of this experiment, COP has been a more sensitive indicator than COT, and it would be able to detect management practices effects.

Keywords. Soil management; organic matter; particulate organic matter; tillage; crop rotations.

INTRODUCCIÓN

En el sudeste Bonaerense la combinación inadecuada de la rotación de cultivos con el sistema de labranza condujo a la degradación de las propiedades del suelo (Studdert & Echeverría, 2000b). El sistema de labranza más difundido en la región es el convencional (LC) con utilización de arado de reja y vertedera o de cincel. En los últimos años, no sólo se ha dejado de lado la alternancia de cultivos agrícolas con pasturas, sino que se ha incrementado la frecuencia de cultivos como la soja, lo que puede sumar efectos negativos al funcionamiento del sistema (Studdert & Echeverría, 2000a), debido a su escaso aporte de residuos al suelo. La correcta elección de una combinación de rotaciones y labranzas puede ser una herramienta útil para reducir los riesgos de degradación del suelo y para maximizar la producción con el mínimo compromiso para el ambiente. Las interacciones entre los efectos de corto y largo plazo entre rotaciones, labranzas y otras prácticas son tan estrechas y complejas que es generalmente difícil separarlos y analizarlos individualmente. Por esta razón, es preferible analizar los sistemas de cultivo (SC) más que las prácticas aisladas, ya que este término las incluye junto con sus interacciones dentro del contexto general del sistema de producción (Studdert & Echeverría, 2000b).

La materia orgánica (MO) es un componente fundamental del suelo ya que de ella dependen muchas de sus propiedades químicas, físicas y biológicas. La variación de la fracción orgánica del suelo y la intensidad de laboreo, determinan la condición física del mismo. La labranza, por la acción física directa, destruye los macroagregados y provoca la pérdida de su estabilidad debido a la reducción de los contenidos de MO por exposición de fracciones que se hallaban protegidas dentro de sus estructuras (Tisdall & Oades, 1982; Six *et al.*, 1999).

La implementación de la siembra directa (SD) y de una adecuada fertilización podría reducir los efectos de una agricultura intensiva, a través de la promoción del mantenimiento y la acumulación de la MO (Salinas-García *et al.*, 1997). Asimismo, la elección de la secuencia de cultivos (Studdert & Echeverría, 2000a) y la alternancia de cultivos agrícolas con pasturas (Studdert *et al.*, 1997) influyen sobre la dinámica de la MO del suelo, a través del momento y la cantidad de aporte de residuos vegetales que contribuyen a la recomposición del contenido de MO.

La MO está compuesta por fracciones de diferente labilidad. Las fracciones más lábiles son más sensibles a los cambios producidos por las prácticas de manejo de suelo y de cultivo. Cualquier decisión de manejo que tienda a alterar la dinámica de estas fracciones de la MO, tendrá incidencia sobre el ambiente físico y químico-bioquímico del suelo (Six *et al.*, 1999; Studdert & Echeverría,

2000b). Una fracción lábil de la MO está constituida por restos vegetales y animales y hongos en distintos grados de descomposición y un tamaño de partícula de entre 50 mm y 2.000 µm. Esta fracción que presenta una relación C/N relativamente alta y un rápido reciclo, es llamada MO particulada (MOP) y puede ser separada por tamizado (Cambardella & Elliot, 1992). El seguimiento de la variación del contenido de MOP o de alguna otra fracción similar (p.e. fracción liviana) puede dar indicios tempranos de los efectos producidos por las prácticas de manejo (Janzen *et al.*, 1998; Fabrizzi *et al.*, 2003) a través de la dinámica del C (Alvarez & Alvarez, 2000) y del N en el suelo.

El conocimiento de la dinámica de los parámetros de suelo sensibles al manejo y afectados por distintas rotaciones y sistemas de labranza contribuirá al diagnóstico y a la toma de decisiones respecto a qué prácticas implementar para el logro de una agricultura ambiental, económica y productivamente sustentable.

Las hipótesis presentadas para las condiciones del Sudeste Bonaerense, en la capa arable del suelo son: i) la inclusión de pasturas, de SD y de fertilización nitrogenada en el sistema de producción mejora el contenido de carbono orgánico total (COT) y de carbono orgánico en la fracción particulada de la MO (COP); y ii) el contenido de COP es un indicador temprano capaz de detectar los cambios producidos por las prácticas de manejo. Para probar estas hipótesis se plantearon como objetivos: i) evaluar el efecto de SC contemplando la alternancia agricultura-pastura combinada con LC y SD sobre los contenidos de COT y de COP, y ii) determinar la incidencia de la fertilización nitrogenada para diferentes sistemas de labranza y rotaciones de cultivos sobre los contenidos de COT y de COP.

MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en la Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias - INTA Balcarce (37° 45' S; 58° 18' W) sobre un complejo de Argiudol Típico y Paleudol Petrocálcico de textura franca con 2% de pendiente (sin erosión). Se recolectaron muestras de suelo de las parcelas correspondientes a un ensayo de rotaciones mixtas (cultivos y pasturas) de larga duración iniciado en 1976. Dicho ensayo presenta un diseño en bloques completos aleatorizados con arreglo en parcelas divididas y tres repeticiones.

Desde su inicio y hasta 1993 se implementaron rotaciones mixtas bajo LC, alternando ciclos agrícolas y de pasturas con diferente duración. La descripción de esta fase del experimento es presentada en Studdert *et al.* (1997). A partir de 1994 se definieron seis SC combinando dos sistemas de labranza (SD y LC) y tres rotaciones, y se estableció una pastura permanente. Quedaron así definidos los siguientes SC (Tabla 1): pastura permanente (PP), agricultura permanente bajo SD (SD100) y bajo LC (LC100), 50% del tiempo (3 años) agricultura y 50% del tiempo

Tabla 1. Sistemas de Cultivo (SC) en las parcelas principales del ensayo.
Table 1. Cropping systems (SC) in the experiment mean plots.

Tratamiento* (SC)	Cultivo**										
	Año										
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
PP	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MUESTREO
LC50	P	P	P	M	S	T	P	P	P		
SD50	P	P	P	M	S	T	P	P	P		
LC75	P	P	P	M	S	T	M	S	T		
SD75	P	P	P	M	S	T	M	S	T		
LC100	M	S	T	M	S	T	M	S	T		
SD100	M	S	T	M	S	T	M	S	T		

* PP: pastura permanente; LC: labranza convencional; SD: siembra directa; 50: 50% agricultura-50% pastura; 75: 75% agricultura-25% pastura; 100: 100% agricultura.
 * PP: permanent pasture; LC: conventional tillage; SD: no tillage; 50: 50% cropping-50% pasture; 75: 75% cropping -25% pasture; 100: 100% cropping.
 ** P: pastura; M: maíz, S: soja; T: trigo.
 ** P: pasture; M: corn, S: soybean; T: wheat.

(3 años) pastura bajo SD (**SD50**) y bajo LC (**LC50**), y 75% del tiempo (9 años) agricultura y 25% del tiempo (3 años) pastura bajo SD (**SD75**) y bajo LC (**LC75**). Al momento de realizarse este experimento en estos dos últimos tratamientos habían transcurrido seis años de agricultura luego de pastura (Tabla 1). La secuencia de cultivos establecida para los períodos bajo agricultura es maíz (*Zea mays* L.) - soja (*Glycine max* L. Merr.) - trigo (*Triticum aestivum* L.). Los niveles de fertilización nitrogenada son 0 y 120 kg N ha⁻¹, aplicados anualmente a todos los cultivos en los períodos bajo agricultura. El factor de tratamiento SC se asigna a las parcelas principales, haciendo coincidir parcelas con igual intensidad en el uso agrícola entre ambos arreglos de tratamientos. Por otro lado, el factor de tratamiento fertilización nitrogenada se asigna a las subparcelas que ya tenían ese tratamiento en el esquema anterior del ensayo.

Se tomaron muestras compuestas en el otoño de 1994 y de 2003. En 1994 se utilizó un muestreador cilíndrico de 2,5 cm de diámetro para extraer 15 sub-muestras por unidad experimental a una profundidad de 0-20 cm. En 2003 se utilizó un muestreador cilíndrico de 5,5 cm de diámetro para extraer 5 sub-muestras por unidad experimental a las profundidades de 0-5 cm y 5-20 cm. Para la comparación entre tratamientos se consideró, además, la profundidad de 0-20 cm, a través del promedio ponderado de los resultados de cada una de las variables obtenidos para las capas muestreadas. En las parcelas bajo PP las muestras de 2003 se tomaron en ambas sub-parcelas según la historia previa de fertilización. Al momento del muestreo los tratamientos SD75 y LC75 se encontraban en su sexto año de agricultura, mientras que SD50 y LC50 lo estaban en su tercer año de pastura (Tabla 1).

De cada muestra de suelo extraída en 2003 se tomó el peso húmedo y una alícuota para la determinación de humedad gravimétrica. Con esta información, junto al peso del suelo húmedo y el volumen de cada muestra, se pudo calcular la densidad aparente para cada profundidad de muestreo. Los resultados de estos cálculos

se muestran en la Tabla 2. Para 1994 se utilizó una densidad aparente de 1,2 Mg m⁻³ (Studdert 2003, com. pers.).

Todas las muestras fueron secadas al aire, molidas y tamizadas con tamiz de 2 mm de apertura de malla. Se realizó el fraccionamiento

Tabla 2. Densidad aparente promedio a las profundidades de 0-5 cm, 5-20 cm y 0-20 cm, por efecto de diferentes sistemas de cultivo.

Table 2. Mean Bulk density at 0-5 cm, 5-20 cm and 0-20 cm depth, and cropping systems effect.

Sistemas de Cultivo*	Densidad Aparente por profundidad (cm)		
	0-5	5-15	0-20
	Mg m ⁻³		
PP	1,01	1,17	1,13
LC50	1,15	1,17	1,16
SD50	1,09	1,17	1,15
LC75	1,19	1,20	1,20
SD75	1,13	1,19	1,17
LC100	1,20	1,18	1,18
SD100	1,18	1,25	1,23

* PP: pastura permanente; LC: labranza convencional; SD: siembra directa; 50: 50% agricultura-50% pastura; 75: 75% agricultura-25% pastura; 100: 100% agricultura.
 * PP: permanent pasture; LC: conventional tillage; SD: no tillage; 50: 50% cropping-50% pasture; 75: 75% cropping -25% pasture; 100: 100% cropping.

miento físico de las muestras por tamizado en húmedo para la determinación de los contenidos de COP y de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA) (Cambardella & Elliot, 1992). Se pesaron 10 g de suelo, se les agregaron 30 mL de hexametafosfato de sodio (5 g L^{-1}) y se agitaron durante 15 h en agitador rotacional (50 RPM). Las muestras dispersadas fueron tamizadas en húmedo por tamiz de $53 \mu\text{m}$ de apertura de malla, recuperando la fracción más fina. Dicha fracción fue secada a 60°C , pesada y molida para la posterior determinación de COA.

El contenido de carbono orgánico fue determinado (combustión húmeda según Walkley & Black modificado, Schlichting *et al.*, 1995) en la masa de suelo total (COT) y en la fracción menor que $53 \mu\text{m}$ (COA). El contenido de COP (fracción mayor que $53 \mu\text{m}$) se determinó por diferencia entre COT y COA. y con esta determinación se calculó la masa de carbono por unidad de superficie.

Se calculó la variación porcentual de COP, COA y COT entre el comienzo (1994) y el final del ensayo (2003) para la profundidad de 0-20 cm. Además, para 2003 se calculó la variación relativa de COP y COT de los SC con respecto a LC100 (Morón & Sawchic, 2002), a las profundidades de 0-5, 5-20 y 0-20 cm.

Los datos fueron analizados sobre la base de análisis de varianza habiendo controlado el cumplimiento del supuesto de normalidad y comparaciones múltiples de medias a través de LSD ($P = 0,05$) siempre que el análisis de varianza hubiera resultado significativo ("Fisher's (protected) LSD", Steel & Torrie, 1980).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis realizados sobre las muestras de 1994 no mostraron interacción significativa entre SC y dosis de N, ni efecto de la fertilización nitrogenada, para ninguna variable dependiente. Hubo diferencias entre SC aunque con tendencias no claramente definidas debido a que los resultados de este año representaron los efectos de manejo correspondientes a la fase anterior de este experimento (Studdert *et al.*, 1997). No obstante, los mayores contenidos de COP, COA y COT (Tabla 3) se vieron en aquellos SC que, bajo el planteo previo al año 1994 habían incluido pasturas (según la denominación de esta fase del experimento: PP, LC50, SD50, LC75 y SD75). Los tratamientos LC50 y SD75 mostraron los mayores valores de COT y no se diferenciaron entre sí, como tampoco SD75 de PP, SD50, LC100 y LC75. El menor contenido de COT correspondió a SD100, el cual se diferenció significativamente del resto de los tratamientos (Tabla 3). El ordenamiento para COP fue similar al observado para COT, pero con diferencias menos marcadas entre tratamientos, comportamiento que se repitió en COA con contrastes aún menos significativos (Tabla 3).

En 2003 no hubo interacción significativa entre SC y dosis de N para ninguna variable dependiente, a ninguna de las profundidades. Studdert & Echeverría (2002a) trabajando con suelos similares bajo agricultura continua y LC, reportaron resultados similares. Para COT sólo hubo diferencia significativa entre SC a la profundidad

Tabla 3. Contenido de carbono orgánico particulado (COP), asociado a la fracción mineral (COA) y total (COT) a la profundidad de 0-20 cm, por efecto de diferentes sistemas de cultivo.

Table 3. Content of total (COT), associated (COA), and particulate (COP) organic carbon at 0-20 cm depth, and cropping systems effect.

Sist. de Cultivo*	COP	COA	COT
	Mg ha ⁻¹		
PP	11,08 ab	60,68 cd	71,75 b
LC50	11,75 a	66,44 a	78,19 a
SD50	10,43 ab	61,63 bcd	72,06 b
LC75	9,55 ab	61,98 bc	71,52 b
SD75	8,98 bc	64,68 ab	73,66 ab
LC100	11,05 ab	60,43 cd	71,48 b
SD100	6,63 c	58,54 d	65,16 c
LSD _{sc}	2,72	3,75	4,99

* PP: pastura permanente; LC: labranza convencional; SD: siembra directa; 50: 50% agricultura-50% pastura; 75: 75% agricultura-25% pastura; 100: 100% agricultura. Para cada variable, las letras diferentes corresponden a diferencias significativas ($P < 0,05$).

* PP: permanent pasture; LC: conventional tillage; SD: no tillage; 50: 50% cropping-50% pasture; 75: 75% cropping - 25% pasture; 100: 100% cropping. Different letters within each variable indicate significant differences ($P < 0,05$).

de 0-5 cm (Figura 1c). Las parcelas bajo PP, LC50 y SD50 (todos bajo pastura hasta el momento de muestreo, Tabla 1) presentaron los mayores valores de COT y no se diferenciaron entre sí. Cabe aclarar que, si bien las diferencias no fueron significativas, el ordenamiento de los valores de COT a las profundidades de 5-20 y de 0-20 cm fue LC50 > PP > SD50 > SD75 > LC75 > SD100 > LC100 (rango 56,6 a 49,8 Mg C ha⁻¹ y 79,1 a 66,7 Mg C ha⁻¹ 5-20 y 0-20 cm, respectivamente) que muestra una tendencia del efecto de los SC sobre el COT.

Una pastura de 3 años en la rotación luego de 3 años de agricultura (LC50 y SD50, Tabla 1) permitió alcanzar valores de COT en los primeros 20 cm de suelo similares a los presentes bajo pastura permanente (PP) (Haynes *et al.*, 1991; Studdert *et al.*, 1997), independientemente de cuál hubiera sido el sistema de labranza empleado durante el período agrícola (1997-2000, Tabla 1). Por otro lado, tanto la agricultura continua (LC100 y SD100, Tabla 1) como 6 años de cultivo luego de una pastura (LC75 y SD75, Tabla 1), se asociaron a menores valores

MANEJO DE SUELOS Y MATERIA ORGÁNICA

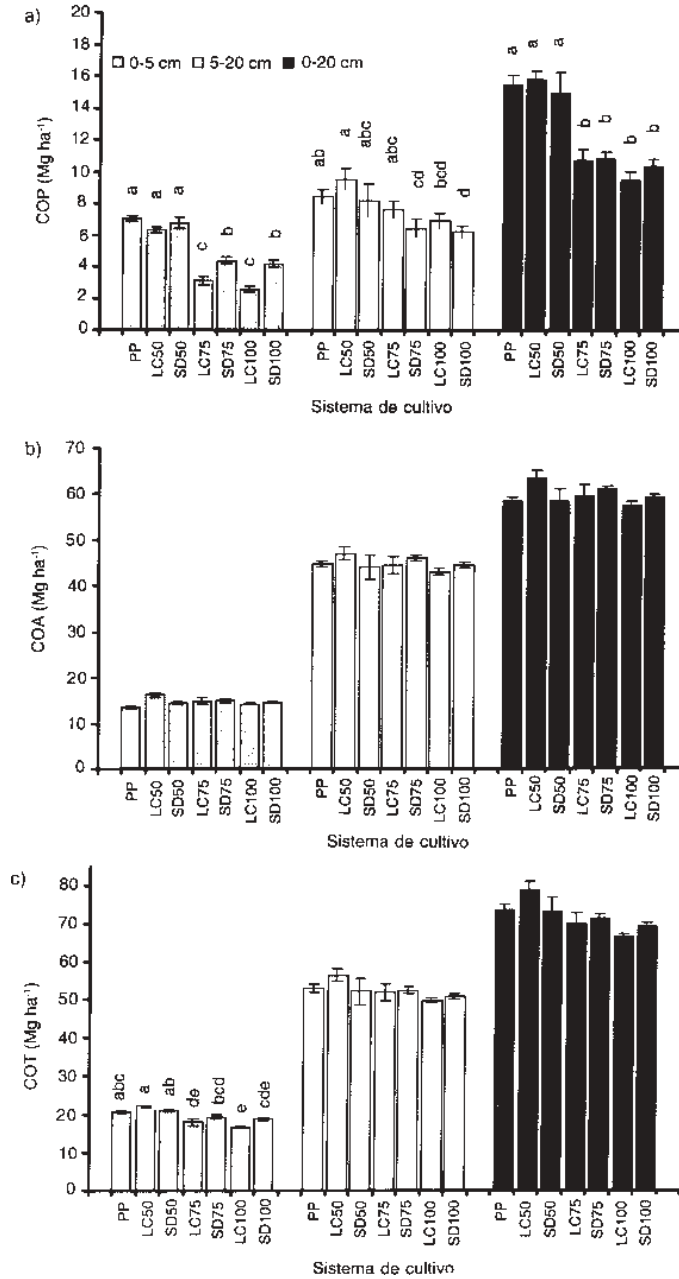


Figura 1. Contenido de carbono orgánico particulado (COP) (a), asociado a la fracción mineral (COA) (b) y total (COT) (c) a las profundidades de 0-5 cm, 5-20 cm y 0-20 cm, por efecto de diferentes sistemas de cultivo. PP: pastura permanente; LC: labranza convencional; SD: siembra directa; 50: 50% agricultura-50% pastura; 75: 75% agricultura-25% pastura; 100: 100% agricultura. Para cada profundidad, letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas (P<0.05). Las líneas verticales en cada barra muestran el error estándar de la media.

Figure 1. Content of total (COT), associated (COA), and particulate (COP) organic carbon at 0-5 cm (a), 5-20 cm (b) and 0-20 cm (c) depth, and cropping systems effect. PP: permanent pasture; LC: conventional tillage; SD: no tillage; 50: 50% cropping-50% pasture; 75: 75% cropping -25% pasture; 100: 100% cropping. Different letters within each depth indicate significant differences (P<0.05). Vertical lines in each bar show the standard error of the mean.

de COT coincidiendo con Studdert *et al.* (1997) y Studdert & Echeverría (2000a) para LC y con Havlin *et al.* (1990) y Allmaras *et al.* (2000) para SD. Asimismo, el sistema de labranza también influyó sobre el COT en los tratamientos bajo agricultura dado que la SD presentó en general mayores valores aunque no siempre significativos, debido a la falta de remoción del suelo y a la presencia de los residuos en superficie (Allmaras *et al.* 2000; Havlin *et al.*, 1990; Janzen *et al.*, 1998). Sin embargo, a pesar de lo contrastante de los SC empleados y de que se observaron tendencias, el COT no respondió claramente al efecto de los SC. No hubo diferencias significativas en COA entre SC a ninguna de las profundidades (Figura 1b), aunque las tendencias fueron similares a las de COT con excepción de la capa superficial (0-5 cm).

Para COP en la capa de 0-5 cm (Figura 1a), PP, SD50 y LC50 también presentaron los mayores valores y no se diferenciaron significativamente entre sí. Por otro lado, no hubo diferencias en COP entre SD75 y SD100, ni entre LC75 y LC100, aunque bajo SD fue significativamente mayor que bajo LC y se observó una tendencia no significativa hacia la disminución con más años de agricultura (Figura 1a, Tabla 1). Estas diferencias estarían explicando las observadas en COT a esa profundidad pero, a diferencia de esta última variable, el COP permitió detectar mejor el efecto de las pasturas y de las labranzas sobre la dinámica de C en el suelo. Esto es coincidente con Janzen *et al.* (1998) y Fabrizzi *et al.* (2003), quienes manifestaron que las fracciones de la MO que mejor representaron las variaciones causadas por las diferentes prácticas de manejo fueron la liviana y el COP, respectivamente. Según Janzen *et al.* (1998), la acumulación o no de C orgánico "joven" en respuesta a los cambios en las prácticas de manejo puede ser atribuida principalmente a las diferencias en acumulación de materiales orgánicos lábiles parcialmente descompuestos o en las tasas de descomposición.

Para la profundidad de 5-20 cm (Figura 1a), se observó que las diferencias en COP entre SC fueron poco definidas, aunque con cierta tendencia hacia la disminución con los años de agricultura. Havlin *et al.* (1990) reportaron que por debajo de los primeros centímetros de suelo, no había diferencias en contenido de MO entre SD y LC. Como se mencionó anteriormente, en esta experiencia no hubo diferencias significativas en COT a esa profundidad. No obstante, como se puede ver en la Figura 1a, los mayores contenidos de COP de 5-20 cm se presentaron bajo pastura (PP, SD50 y LC50) y bajo LC (LC75 y LC100), lo que podría estar asociado al volumen de sustrato aportado por las pasturas (raíces) y a la incorporación de residuos con la LC, situaciones que se presentan en menor magnitud bajo SD. Para la profundidad de 0-20 cm, se observó que PP, LC50 y SD50 tuvieron

significativamente mayor cantidad de COP que el resto de los SC (Figura 1a).

No hubo diferencias significativas entre dosis de fertilización nitrogenada en COT y COA a ninguna de las profundidades (Figura 2). No obstante, el COT fue levemente mayor en aquellas parcelas que recibieron la dosis de 120 kg N ha⁻¹, respecto a las que no lo recibieron, para las profundidades de 5-20 cm y 0-20 cm. Estos resultados coinciden con los de Studdert & Echeverría (2002a) y Studdert & Echeverría (2002b) quienes no hallaron diferencias en COT entre dosis de N a ninguna de las profundidades para otros años de este ensayo. El agregado de N hizo que, para todas las profundidades, COP mostrara valores más altos que en las parcelas en que no se aplicó N aunque, discrepando con otros autores (Varvel 1994; Liebig *et al.*, 2002), estas diferencias fueron significativas sólo para las profundidades de 5-20 y 0-20 cm. Para la capa superficial, si bien la interacción entre SC y dosis de N no alcanzó a ser significativa ($p = 0,0662$), el efecto de los SC puede haber enmascarado la detección de diferencias entre dosis, a través de diferentes patrones de acumulación de residuos en superficie o incorporados (Studdert *et al.*, 1997; Studdert & Echeverría, 2000a).

En cada una de las profundidades el COT está reflejando el efecto de los SC, pero las diferencias observadas no fueron lo suficientemente grandes como para detectarlas estadísticamente. Sin embargo, los cambios en COP causados por modificaciones en el manejo, han permitido diferenciar con mayor facilidad las distintas situaciones. Esto fue así, a pesar de que la claridad con que se detectaron diferencias en COP entre SC fue distinta para cada profundidad.

Previo a este experimento todas las parcelas habían sido sometidas a un sistema de labranza agresivo como la LC, pero bajo distintas rotaciones y secuencias de cultivo (Studdert *et al.*, 1997; Studdert & Echeverría, 2002a y Studdert & Echeverría, 2002b), lo que determinó diferentes situaciones iniciales (Tabla 3).

El análisis de la variación porcentual de cada una de las variables (COP, COA y COT) a la profundidad de 0-20 cm entre 1994 y 2003, no mostró interacción significativa entre SC y dosis de N, como así tampoco efecto significativo de la fertilización sobre ninguna de las variables. Sólo se determinaron diferencias significativas entre SC para COP y COT. No hubo diferencias entre los incrementos del COP de aquellos SC que se encontraban bajo pastura al momento del muestreo en 2003, como así tampoco entre éstos y los dos SC bajo SD (Figura 3).

La incorporación de pasturas en rotaciones cortas (50% del tiempo bajo agricultura y 50% del tiempo bajo pasturas) contribuyó con aportes importantes de las fracciones más lábiles de la MO, similares a los hallados

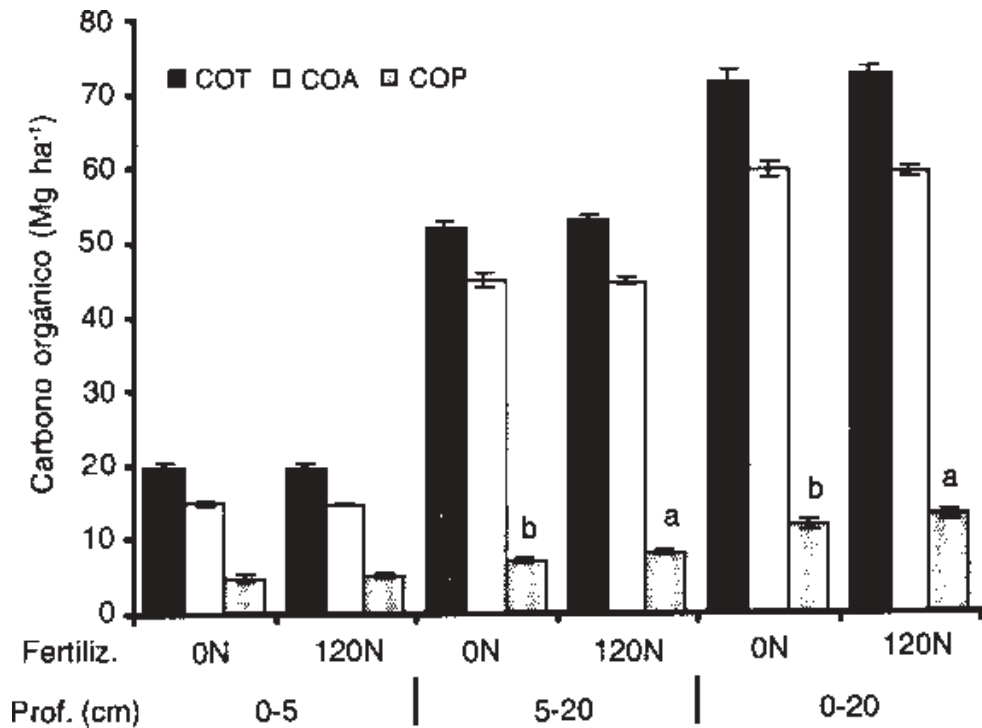


Figura 2. Contenido de carbono orgánico total (COT), asociado a la fracción mineral (COA) y particulado (COP) a las profundidades de 0-5 cm, 5-20 cm y 0-20 cm, por efecto de la dosis de N. Para cada fracción de carbono dentro de cada profundidad, letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$). Las líneas verticales en cada barra muestran el error estándar de la media.

Figure 2. Content of total (COT), associated (COA), and particulate (COP) organic carbon as affected by N rate at 0-5 cm, 5-20 cm and 0-20 cm depths. Different letters for each carbon fraction within each depth indicate significant differences ($P < 0.05$). Vertical lines in each bar show the standard error of the mean.

bajo PP, lo que estaría reafirmando lo dicho para el año 2003 a través de los contenidos absolutos. Por otro lado, bajo planteos de agricultura continua, la SD produjo incrementos significativamente superiores de COP y de COT, respecto a los obtenidos con LC. Sin embargo, las diferencias entre los dos sistemas de labranza en el último año del experimento no fueron significativas (Figura 1), probablemente como consecuencia del menor contenido de COT y sus fracciones bajo SD respecto a LC en 1994 (Tabla 3), o bien por un efecto de dilución en la capa de 0-20 cm de los mayores contenidos de COP (significativo) y de COT (no significativo) observados en la capa de 0-5 cm bajo SD (Figura 1) debido al efecto de estratificación que se produce con este sistema de labranza (Franzluebbers *et al.*, 1999; Needelman *et al.*, 1999; Fabrizzi *et al.*, 2003). No obstante, de continuar con la tendencia de incremento, sería razonable esperar que en

los próximos años se pudiera observar una superioridad de la SD sobre la LC a través de valores significativamente superiores de COP y COT.

Los patrones de diferencias entre tratamientos fueron iguales para ambas variables, pero la magnitud relativa de las variaciones entre el comienzo y el final del período evaluado fue mucho mayor para COP que para COT, lo que sugeriría una mayor sensibilidad de COP para detectar las variaciones de manejo. En la Figura 4 se puede observar la magnitud de la variación relativa de COP y COT de los SC con respecto a LC100. La mayor variación relativa se observó para COP a la profundidad de 0-5 cm seguida por la variación relativa a la profundidad de 0-20 cm. Por otro lado, la variación relativa de COT fue mucho menor que la observada para COP, confirmando la baja sensibilidad de esta variable para mostrar cambios debidos al manejo (Cambardella &

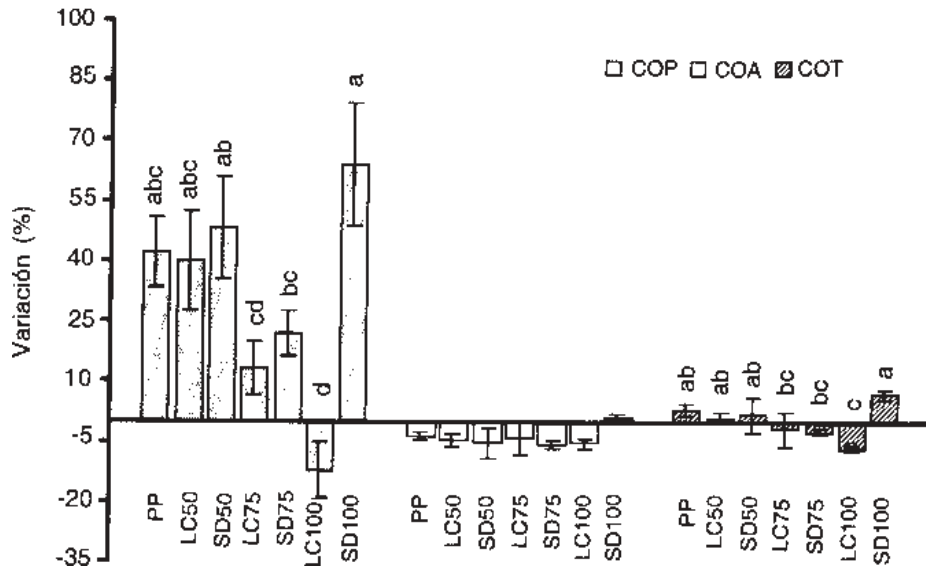


Figura 3. Variación entre 1994 y 2003 en el contenido de carbono orgánico particulado (COP), asociado a la fracción mineral (COA) y total (COT) a la profundidad de 0-20 cm, por efecto de diferentes sistemas de cultivo. PP: pastura permanente; LC: labranza convencional; SD: siembra directa; 50: 50% agricultura-50% pastura; 75: 75% agricultura-25% pastura; 100: 100% agricultura. Para cada fracción de carbono, letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$). Las líneas verticales en cada barra muestran el error estándar de la media.

Figure 3. Variation between 1994 and 2003 of the content of particulate (COP), associated (COA), and total (COT) organic carbon as affected by different cropping systems at 0-20 cm depth. PP: permanent pasture; LC: conventional tillage; SD: no tillage; 50: 50% cropping-50% pasture; 75: 75% cropping -25% pasture; 100: 100% cropping. Different letters for each carbon fraction indicate significant differences ($P < 0.05$). Vertical lines in each bar show the standard error of the mean.

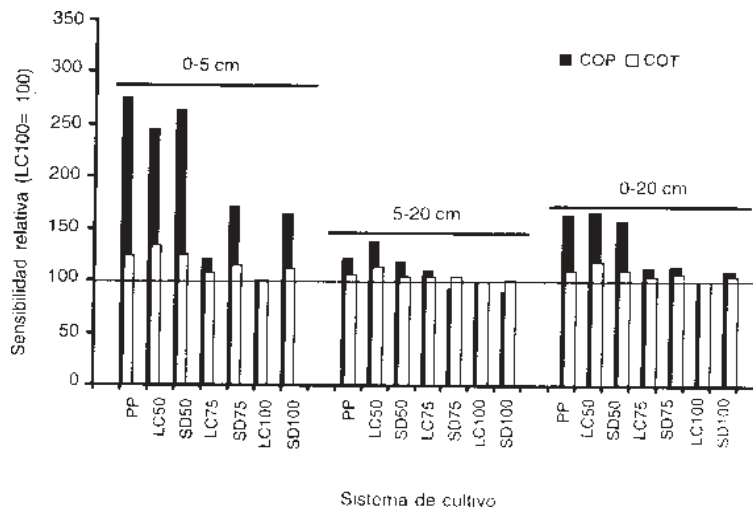


Figura 4. Variación relativa en el contenido de carbono orgánico total (COT) y particulado (COP) en 2003 bajo diferentes sistemas de cultivo (PP: pastura permanente; LC: labranza convencional; SD: siembra directa; 50: 50% agricultura-50% pastura; 75: 75% agricultura-25% pastura; 100: 100% agricultura) con respecto a LC100 (LC100= 100) a las profundidades de 0-5, 5-20 y 0-20 cm.

Figure 4. Relative variation in the content of particulate (COP) and total (COT) organic carbon in 2003 under different cropping systems (PP: permanent pasture; LC: conventional tillage; SD: no tillage; 50: 50% cropping-50% pasture; 75: 75% cropping -25% pasture; 100: 100% cropping) with respect to LC100 (LC100= 100) at 0-5, 5-20 and 0-20 cm depths.

Elliot, 1992; Janzen *et al.*, 1998; Alvarez & Alvarez, 2000; Fabrizzi *et al.*, 2003). Esto se podría relacionar con la baja actividad de COA que representa la mayor proporción del carbono de la MO (Morón & Sawchik, 2002). De esta manera, la mayor sensibilidad relativa de COP, especialmente en los primeros 5 cm de suelo, permite explicar los resultados obtenidos en 2003 (Figura 1), en el sentido de que determinaciones de esa variable en la capa superficial permitirían distinguir claramente distintas situaciones de manejo previo (Franzluebbers *et al.*, 1999; Needelman *et al.*, 1999; Fabrizzi *et al.*, 2003).

Sobre la base de los resultados encontrados para las condiciones de este experimento se podría afirmar que, con relación al incremento de carbono observado en el mediano plazo, la utilización de SD tendría efectos similares a la implementación de un sistema de rotaciones con alternancia de agricultura y pasturas en períodos de 3 años. Para aquellas parcelas en peor situación (agricultura continua), la SD (Studdert & Echeverría 2002a), una adecuada fertilización nitrogenada, o su combinación habrían producido una mejora en su con-

tenido de C orgánico. De la misma manera, la incorporación de pasturas en la rotación (Studdert & Echeverría, 2002b) produjo un efecto similar.

Los resultados de este ensayo permiten concluir que para las condiciones del Sudeste Bonaerense y para una secuencia de 9 años, la inclusión de rotaciones cortas (50% del tiempo bajo agricultura y 50% del tiempo bajo pasturas), de SD y la utilización de fertilización nitrogenada, mejoran los contenidos de COT y de COP, demostrando el efecto benéfico de estas prácticas. Para las condiciones planteadas en este ensayo, el COP demostró ser un indicador más sensible que el COT, para manifestar diferencias por efecto del manejo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto de investigación de la Universidad Nacional de Mar del Plata N° 15/A166. El primer autor es Becario de Iniciación de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

BIBLIOGRAFÍA

- Allmaras, RR; HH Schomberg, CL Douglas, Jr. & TH Dao. 2000. Soil organic carbon. Sequestration potential of adopting conservation tillage in U.S. croplands. *J. Soil Water Cons.* 55:365-373.
- Alvarez, R & CR Alvarez. 2000. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:184-189.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1992. Particulate organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783.
- Fabrizzi, KP; A Morón & FO García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1831-1841.
- Franzluebbers, AJ; GW Langdale & HH Schomberg. 1999. Soil carbon, nitrogen, and aggregation in response to type and frequency of tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:349-355.
- Havlin, JL; DE Kissel; LD Maddux; MM; Claassen & JH Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:448-452.
- Haynes, RJ; RS Swift & RC Stephen. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil Tillage Res.*, 19:77-87.
- Janzen, HH; CA Campbell; RC Izaurralde; BH Ellert; N Juma; WB McGill & RP Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian Prairies. *Soil Tillage Res.* 47:181-95.
- Liebig, MA; GE Varvel; JW Doran & BJ Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:596-601.
- Needelman, BA; MM Wander; GA Bollero; CW Boast; GK Sims & DG Bullock. 1999. Interaction of tillage and soil texture: Biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1326-1334.
- Morón, A & J Sawchik. 2002. Soil quality indicators in a long-term crop-pasture rotation experiment in Uruguay. *En: Symposium n° 32 Paper 1327. 17th World Congress of Soil Science, Thailand. CD.*
- Salinas-García, JR; FM Hons & JE Matocha. 1997. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:152-159.
- Schlichting, E; HP Blume & K Stahr. 1995. *Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studentexte 81, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 295 pp.*
- Six, J; ET Elliott & K Paustian. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1350-1358.
- Steel, GD & JH Torrie. 1980. *Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. Second Edition. McGraw-Hill Book Company, New York, New York, USA. 633 pp.*
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2000a. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1496-1503.
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2000b. Soja, girasol y maíz en los sistemas de cultivo del sudeste bonaerense. Pp. 407-437. *En: F.H. Andrade & V. Sadras (eds.) Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. INTA - Facultad de Ciencias Agrarias (UNMP). Advanta Semillas SAIC.*

- Studdert, GA & HE Echeverría. 2002a. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. *En: Actas de XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Puerto Madryn, Chubut, Argentina. En CD.
- Studdert, GA & HE Echeverría 2002b. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el Sudeste Bonaerense. *En: Actas de XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Puerto Madryn, Chubut, Argentina. En CD.
- Studdert, GA; HE Echeverría & EM Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163.
- Varvel, GE. 1994. Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. *Agron. J.* 86:319-325.