

Reservas de materia orgánica en la Pampa Ondulada: efecto de la secuencia de cultivo y del sistema de labranza en el largo plazo

Alicia Irizar & Adrián Andriulo

INTA EEA Pergamino

En nuestro país y, particularmente, en la región Pampa Ondulada, los sistemas de producción registraron cambios importantes durante la década del '70 del siglo XX: los ciclos de agricultura que tradicionalmente se alternaban con ciclos de pasturas, comenzaron a transformarse en agricultura continua. En efecto, la relación superficie cultivada/superficie con pasturas decreció a razón de 4% anual (Senigagliesi & Ferrari, 1993). En el mismo período, se introdujo la soja (*Glycine max L.*) como único cultivo anual o acompañando al trigo (*Triticum aestivum L.*) en el mismo año, y se intensificó el trabajo del suelo. A principio de la década de los '90, los suelos de la Pampa Ondulada ya habían perdido el 27% de la materia orgánica del suelo (MOS) de la capa arable (Milesi *et al.*, 2013). A mediados de la década de los '90 se produjeron nuevos cambios tecnológicos: aumento exponencial en la adopción de siembra directa (SD), fertilización generalizada de los cultivos de gramíneas, mejoramiento genético de los cultivos e introducción de variedades e híbridos transgénicos, pérdida de cultivos en la rotación e incremento en el uso de productos fitosanitarios. En esta segunda etapa de cambios los suelos perdieron el 13% de su MOS (Milesi *et al.*, 2013). En la actualidad, en esta región, el sistema de producción predominante es la agricultura continua bajo SD, con especies de ciclo primavero-estival, fundamentalmente soja y secundariamente maíz (*Zea mays L.*), ocupando aproximadamente 70 y 15% de la superficie agrícola, respectivamente (SAGPyA, 2006).

Todos estos cambios fueron masivamente adoptados sin una evaluación previa de su posible impacto sobre el estado orgánico del suelo, la calidad del ambiente y la productividad de los cultivos en el largo plazo. Sin embargo, el INTA ha sido precursor de este proceso, comenzando con los primeros estudios hacia fines de la década del '70. A comienzos de los 70' la Estación Experimental Agropecuaria de Pergamino inició un convenio con el INRA de Francia para mejorar el manejo del agua en zonas de secano. Los investigadores locales vislumbraron que se podían utilizar métodos de cultivo menos agresivos que los utilizados por los productores en aquellos momentos (se introdujeron el arado de cincel y otros implementos de corte vertical). En 1979, dos investigadores de la EEA Pergamino iniciaron experimentos de largo plazo para evaluar el efecto de distintas

intensidades de laboreo, incluyendo la SD, bajo diferentes secuencias de cultivo sobre los rendimientos de los cultivos y algunas propiedades del suelo, retomando las experiencias iniciadas por el Ing. Faggioli en 1969 (Ekboir, 2001). En la actualidad, estos ensayos de largo plazo son fuente de conocimiento indispensables y vitales para el entendimiento, el monitoreo y la prueba de los cambios surgidos por el uso de diferentes prácticas de manejo de suelo. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de largo plazo de cuatro secuencias de cultivo y dos sistemas de labranza sobre el estado orgánico del suelo en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada.

Materiales y métodos

Caracterización edafoclimática de la región y descripción de los experimentos

Los experimentos de larga duración se encuentran localizados a 33° 57' de latitud sur y 60° 33' de longitud oeste dentro de la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino de INTA. El clima es templado húmedo, siendo la precipitación media anual del período 1910-2015 de 988 mm y la temperatura media anual del período 1967-2015 de 16,5 °C (Base de datos de la EEA Pergamino de INTA). El suelo corresponde a un Argiudol típico de textura franco limosa serie Pergamino sin fases por erosión con pendiente < 0,5%. La textura del horizonte A es franco limosa con 23% de arcilla y 64% de limo (INTA, 1972).

En un lote de 9 ha se instalaron cuatro ensayos de secuencias de cultivo escalonados en el tiempo (Figura 1). En 1979 se inició la rotación maíz seguido por el doble cultivo trigo/soja (M-T/S). Luego, en 1983, se agregó el doble cultivo trigo/soja (T/S) y en 1987 se incorporaron los monocultivos de soja (S) y de maíz (M). Desde el inicio hasta la actualidad, para cada secuencia de cultivo transcurrieron 37, 33 y 29 años para M-T/S, T/S, S y M, respectivamente. Cada secuencia presenta un diseño de bloques completos aleatorizados. La dimensión de la parcela principal es de 14 m de ancho y 45 m de largo. En las parcelas principales se encuentran aleatorizados los sistemas de labranza: SD (el control de malezas se realiza químicamente), labranza convencional con arado de reja y vertedera (LC), labranza vertical con arado de cincel (LV), labranza superficial con rastra de discos (Su) y labranza combinada (LC para maíz y trigo y SD para soja de 2º), que a partir de 2002 se transformó en SD. A su vez, las parcelas principales se dividieron en subparcelas, en las que se aplicaron dos dosis de fertilizante nitrogenado: 0 kg N ha⁻¹ (NF) y 90 y 100 kg N ha⁻¹ (F) en promedio, para trigo y maíz,

respectivamente. Además, los cultivos de maíz, trigo y soja de 1º se fertilizan a la siembra con 12 kg P ha⁻¹.



Bloques I, II, III y IV en Maíz-Trigo/Soja y III y IV en Trigo/Soja tuvieron pastura desde 1994 hasta 2002. Maíz: monocultivo de maíz; Soja: monocultivo de soja; Trigo/Soja: doble cultivo trigo/soja; Maíz-Trigo/Soja: maíz - doble cultivo trigo/soja; LV: labranza vertical (arado de cincel); SD: siembra directa; Su: labranza superficial con rastra de disco; LC: labranza convencional con arado de reja y vertedera; Lcb: labranza combinada; NF: sin fertilización nitrogenada; F: con fertilización nitrogenada.

Figura 1. Plano de los ensayos de secuencias de cultivo y sistemas de labranza de largo plazo ubicados en la EEA Pergamino de INTA.

En el presente trabajo se analizaron solamente dos sistemas de labranza: SD y LV con aplicación de fertilizante nitrogenado, en todas las secuencias de cultivo con historia agrícola continua. En junio de 2004 se tomaron muestras compuestas de suelo a tres profundidades (0-5, 5-10 y 10-20 cm) en

cuatro sitios seleccionados al azar dentro de cada parcela. Las propiedades de suelo estudiadas fueron:

- *Carbono orgánico (COS) y nitrógeno orgánico (NOS) del suelo*: determinados por combustión seca.
- *C y N orgánico particulado (COP y NOP, respectivamente)*: determinados por tamizado en húmedo por el método de Cambardella & Elliot (1992) modificado y medidos por combustión seca.
- *C y N asociados a la fracción mineral (CAM y NAM, respectivamente)*: se obtuvieron por diferencia entre COS y COP y entre NOS y NOP.
- *Índice de estabilidad de agregados (IEA)*: determinado por tamizado en agua con el método de Douglas & Goss (1982) modificado. La valoración del IEA fue: < 20%: inestable; entre 20 y 40%: moderadamente estable y > 40%: estable.
- *pH en agua*: determinado potenciométricamente, utilizando la relación suelo: agua 1:2,5.
- *Densidad aparente (dap)*: determinada por el método del cilindro (Burke *et al.*, 1986).

Los contenidos de COS, NOS y sus fracciones fueron expresados en Mg ha⁻¹ para una masa de horizonte A de 2500 Mg suelo ha⁻¹ porque existieron diferencias significativas en dap para el espesor 5-10 cm entre SD y LV.

Además, se midió el C y N de los rastrojos sobre *la superficie del suelo* y los rendimientos históricos promedio de los cultivos. A partir de los rendimientos se calculó el aporte de C y N por los residuos de los cultivos utilizando índices de cosecha de 0,50, 0,34 y 0,38 para maíz, trigo y soja, respectivamente (Alvarez & Steinbach, 2006), asumiendo que la biomasa radical, incluyendo rizodepósitos, fue de 30% en relación a la biomasa aérea total (Bolinder *et al.*, 2007), que los residuos contienen 40% de C y que la relación C/N de maíz, trigo y soja es de 57, 64 y 41, respectivamente.

Para evaluar el efecto de las secuencias de cultivo y los sistemas de labranza sobre la MOS y sus fracciones granulométricas se utilizó el procedimiento Proc Mixed de SAS (SAS, 2001; Liebig *et al.*, 2002). Éste permite analizar series de experimentos distintos que no presentan varianzas homogéneas entre sí y que responden al mismo diseño experimental.

Resultados y discusión

Efecto del sistema de labranza

Las diferencias de largo plazo entre sistemas de labranza variaron entre 2,4 y 4,3 Mg COS ha⁻¹ (entre 5 y 10%) y entre 0,2 y 0,45 Mg NOS ha⁻¹ (entre 6 y 11%) (Figura 2 A y B). Estas diferencias, expresadas como promedio anual, fueron de 10 y 17 g C m⁻² año⁻¹ y de 0,8 y 1,8 g N m⁻² año⁻¹ y se encuentran dentro del intervalo reportado por la bibliografía internacional para suelos de clima templado: 31 ± 75 g C m⁻² año⁻¹ y 2,8 ± 7,0 g N m⁻² año⁻¹ (Franzluebbers, 2004). Debido a que no existieron diferencias de rendimiento de cultivo entre sistemas de labranza para todas las secuencias evaluadas, el retorno de C y N no constituyó un factor causante de las diferencias de stocks encontradas (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto de la secuencia de cultivo y del sistema de labranza sobre los rendimientos históricos promedio, expresados en materia seca.

Cultivo	Secuencia de cultivo		M-T/S		T/S		M		S	
	Labranza		SD	LV	SD	LV	SD	LV	SD	LV
	SD	LV								
Maíz	6838a ^(*)	7085a	7014a ^(**)		6909a					
Trigo	2893a	2802a	2762a		2933a					
Soja de 2º	2451a	2338a	2514a		2275a					
Soja de 1º									2965a	3072a

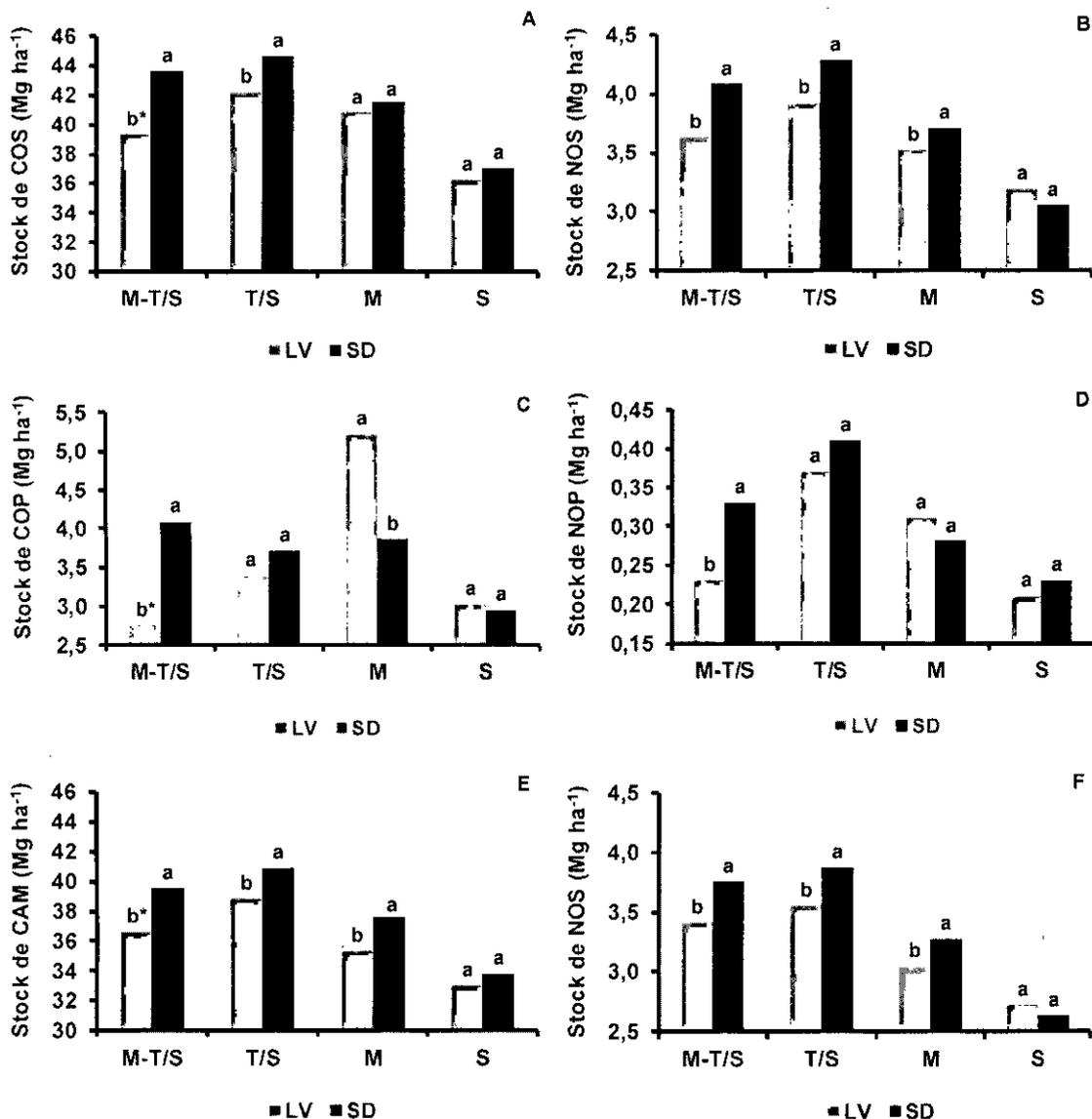
M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa.

(*) letras diferentes en negrita indican diferencias significativas entre sistemas de labranza ($p < 0,05$).

(**) letras diferentes sin negrita indican diferencias significativas entre secuencias de cultivo ($p < 0,05$).

La SD aumentó las reservas de COS y NOS en relación a LV en las rotaciones, presentando M-T/S la mayor diferencia entre sistemas de labranza (Figura 2 A y B). Estos resultados muestran que cuanto mayor es la diversidad de cultivos (en cantidad y calidad) mayor sería la biomasa microbiana y la tasa de descomposición de MOS en los tratamientos laboreados, produciéndose una marcada disminución de las reservas de COS (Luo *et al.*, 2010) y, por ende, un aumento en la diferencia entre sistemas de labranza. No se encontraron diferencias en COS entre sistemas de labranzas en los monocultivos. Resultados similares a estos últimos fueron encontrados por Huggins *et al.* (2007) luego

de 14 años de experimento con monocultivos de maíz y de soja. La misma tendencia se observó para NOS, aunque en el monocultivo de maíz, éste fue ligeramente superior bajo SD que bajo LV.



M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa; COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral.

* letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas de labranza dentro de una misma secuencia de cultivo ($p < 0,05$).

Figura 2. Efecto del sistema de labranza en diferentes secuencias de cultivo sobre las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas, expresadas en stock a 2500 Mg suelo ha⁻¹.

Normalmente, los factores que explican las diferencias en MOS entre sistemas de labranza se resumen en: a) la disrupción periódica de la estructura del suelo, b) la incorporación de la MOS dentro de la matriz del suelo y c) las modificaciones en el clima del suelo (Balesdent *et al.*, 2000). La estabilidad de la estructura fue mayor bajo SD que bajo LV. Esta diferencia fue de entre dos y tres veces para el IEA en el espesor 0-5 cm. En el espesor 5-20 cm, aunque inestable, el IEA resultó un 43% superior bajo SD en todas las secuencias de cultivo (Tabla 2). Bajo SD, el IEA en el espesor 0-5 cm, resultó inestable (< 20%) en el monocultivo de soja, moderadamente estable (20-40%) en el monocultivo de maíz y T/S y estable (> 40%) en M-T/S. Evidentemente, en el monocultivo de soja, la baja estabilidad de los macroagregados bajo SD no permitió proteger la MOS de la biodegradación.

A su vez, la mayor biomasa de residuos sobre el suelo bajo SD favorece la agregación y su estabilidad en los primeros centímetros, dado que los agregados están mejor protegidos del impacto de la gota de lluvia. En este estudio el C y el N de la biomasa de rastrojos fueron 70 y 40% superiores bajo SD, respectivamente (Tabla 2). Adicionalmente, esta mayor cobertura bajo SD condujo a una menor temperatura media en M-T/S, T/S y M y a un mayor contenido de humedad en M (datos no mostrados) que bajo LV. Estas diferencias de humedad y temperatura encontradas en los monocultivos podrían haber provocado una mayor mineralización de la MOS, reduciendo las diferencias entre los sistemas de labranza en estas dos secuencias.

Además, bajo SD el COP y el NOP resultaron más elevados que en LV para la secuencia M-T/S; lo inverso ocurrió en el monocultivo de maíz para el COP solamente y no hubo diferencias entre sistemas de labranza en T/S y en el monocultivo de soja (Figura 2 C y D). La ausencia de labranzas puede provocar un cambio en la distribución relativa de las fracciones de la MOS. La protección física de la MOS por la estructura del suelo representa una contribución muy importante en la disminución de la mineralización de la MOS bajo SD (Oorts *et al.*, 2007). Normalmente, los agregados estables se forman alrededor de materia orgánica de incorporación reciente y de la fracción particulada (Puget *et al.*, 1995, 1999). Cuando el IEA fue estable (M-T/S bajo SD), los stocks de COP y NOP fueron más altos. Sin embargo, en el monocultivo de maíz, la SD condujo a un menor stock de COP e igual stock de NOP que LV (Figura 2 C y D). Esto puede deberse a que los residuos de maíz presentan una elevada relación C/N y bajo SD quedan en pie luego de la cosecha, retrasando su ingreso al suelo y resultando en un compartimento de C lábil de tamaño inferior. En cambio, bajo LV, los residuos ingresan al suelo con las operaciones de labranza, enriqueciendo el compartimento particulado con fracciones de menor grado de transformación. La relación COP/NOP bajo LV fue 18,6 y bajo SD fue

12,6, ésta menor calidad de la fracción particulada bajo LV podría explicar su elevado valor medio, a pesar de la baja protección física dentro de los agregados del suelo (IEA inestable).

Tabla 2. Efecto de la secuencia de cultivo y del sistema de labranza sobre algunas propiedades del suelo y el carbono y nitrógeno de los rastrojos.

Sistema de labranza	Secuencia de cultivo			
	M-T/S	T/S	M	S
	<i>IEA (%) – 0-5 cm</i>			
LV	15,22 b ^(*) a ^(**)	10,02 b a	15,70 b a	8,31 b a
SD	41,08 a a	21,87 a bc	28,85 a b	16,23 a c
	<i>IEA (%) – 5-20 cm</i>			
LV	12,06 b ^(*)	17,58 a ^(†)	16,17 a	14,79 a
SD	17,32 a			10,21 b
	<i>pH – 0-5 cm</i>			
LV	5,96 a	5,63 b	5,64 b	5,83 b
SD	5,77 a			6,35 a
	<i>pH – 5-10 cm</i>			
LV	5,86 a	5,76 a	5,74 a	5,84 a
SD	5,75 a			5,88 a
	<i>pH – 10-20 cm</i>			
LV	5,90 a	5,92 a	5,84 a	6,00 a
SD	5,91 a			5,87 a
	<i>C rastrojos (Mg ha⁻¹)</i>			
LV	2,32 b	3,43 a	2,99 ab	3,51 a
SD	3,95 a			2,60 b
	<i>N rastrojos (Mg ha⁻¹)</i>			
LV	0,05 b	0,08 a	0,07 a	0,04 b
SD	0,07 a			0,05 b

M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa. IEA: índice de estabilidad de agregados; pH: acidez del suelo; C rastrojos: carbono presente en los rastrojos; N rastrojos: nitrógeno presente en los rastrojos.

Interacción significativa entre secuencias de cultivo y sistemas de labranza:

^(*) letras diferentes en negrita indican diferencias significativas entre sistemas de labranza dentro de una misma secuencia de cultivo ($p < 0,05$).

^(**) letras diferentes sin negrita indican diferencias significativas entre secuencias de cultivo dentro de un mismo sistema de labranza ($p < 0,05$).

Interacción no significativa entre secuencias de cultivo y sistemas de labranza:

^(†) letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas de labranza ($p < 0,05$).

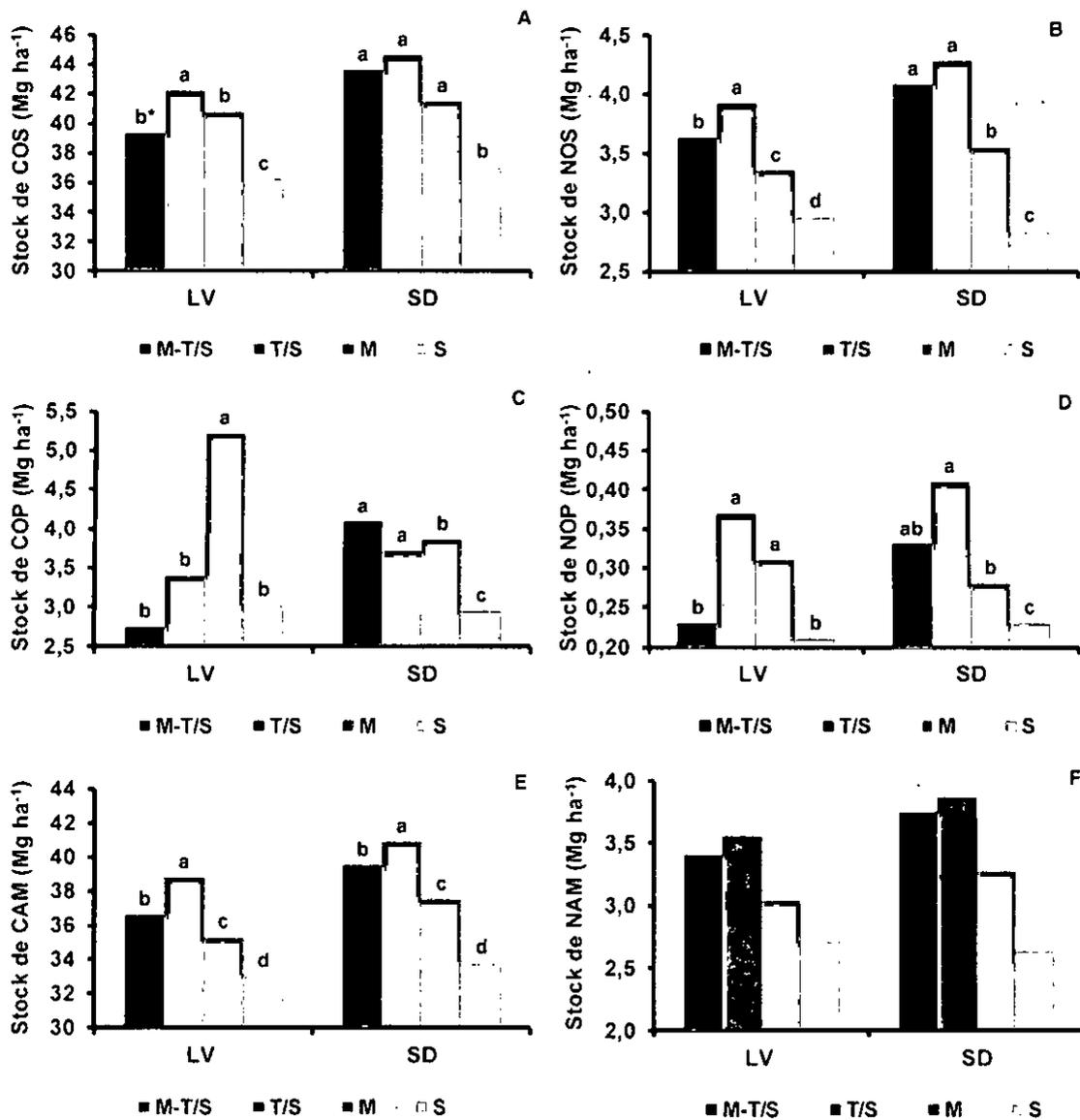
^(‡) letras diferentes indican diferencias significativas entre secuencias de cultivo ($p < 0,05$).

Por otro lado, bajo SD hubo en promedio 2,4 Mg ha⁻¹ más de CAM y 0,3 Mg ha⁻¹ más de NAM en todas las secuencias de cultivo, excepto en el monocultivo de soja, que bajo LV (Figura 2 E y F). Los mayores valores de CAM y NAM obtenidos estarían indicando menor biodisponibilidad de la MOS asociada al complejo órgano mineral bajo SD en las rotaciones y el monocultivo de maíz debido a la formación de metabolitos microbianos y residuos que se estabilizan y acumulan en limos y arcillas por adsorción protectora o irreversible (Hedges & Oades, 1997). En el monocultivo de maíz, si bien hubo un mayor stock de CAM y de NAM bajo SD con respecto a LV, éste no se reflejó sobre el stock de COS, pero sí lo hizo sobre el de NOS. Las diferencias encontradas entre sistemas de labranza en las fracciones más humificadas fueron proporcionalmente menos importantes que las encontradas para las fracciones particuladas: 7 y 9% para CAM y NAM, respectivamente, 48 y 35 % para COP en M-T/S y M, respectivamente y 30% para NOP en M-T/S. Resultados similares fueron reportados por Oorts *et al.* (2006) y Domínguez *et al.* (2009).

Efecto de la secuencia de cultivo

Las diferencias encontradas entre secuencias de cultivo para COS fueron 3 y 6 Mg ha⁻¹ y 4 y 8 Mg ha⁻¹ bajo LV y SD, respectivamente y en NOS fueron de 0,3 y 0,7 Mg ha⁻¹ y 0,7 y 1,2 Mg ha⁻¹, bajo LV y SD, respectivamente (Figura 3 A y B). Estas diferencias se encontraron dentro del intervalo reportado por West & Post (2002) para COS y por Doyle *et al.* (2005) para COS y NOS.

Los factores que explican las diferencias de MOS entre secuencias de cultivo se resumen en: a) cantidad, calidad y periodicidad del aporte de C y N proveniente de los residuos de cultivo retornados al suelo y b) modificaciones de las condiciones ambientales del suelo, a medida que los recursos (agua y nutrientes) son consumidos y que los residuos y raíces son degradados por los microorganismos de suelo, como humedad, temperatura, pH, estabilidad de agregados, entre los más importantes (Huggins *et al.*, 2007).



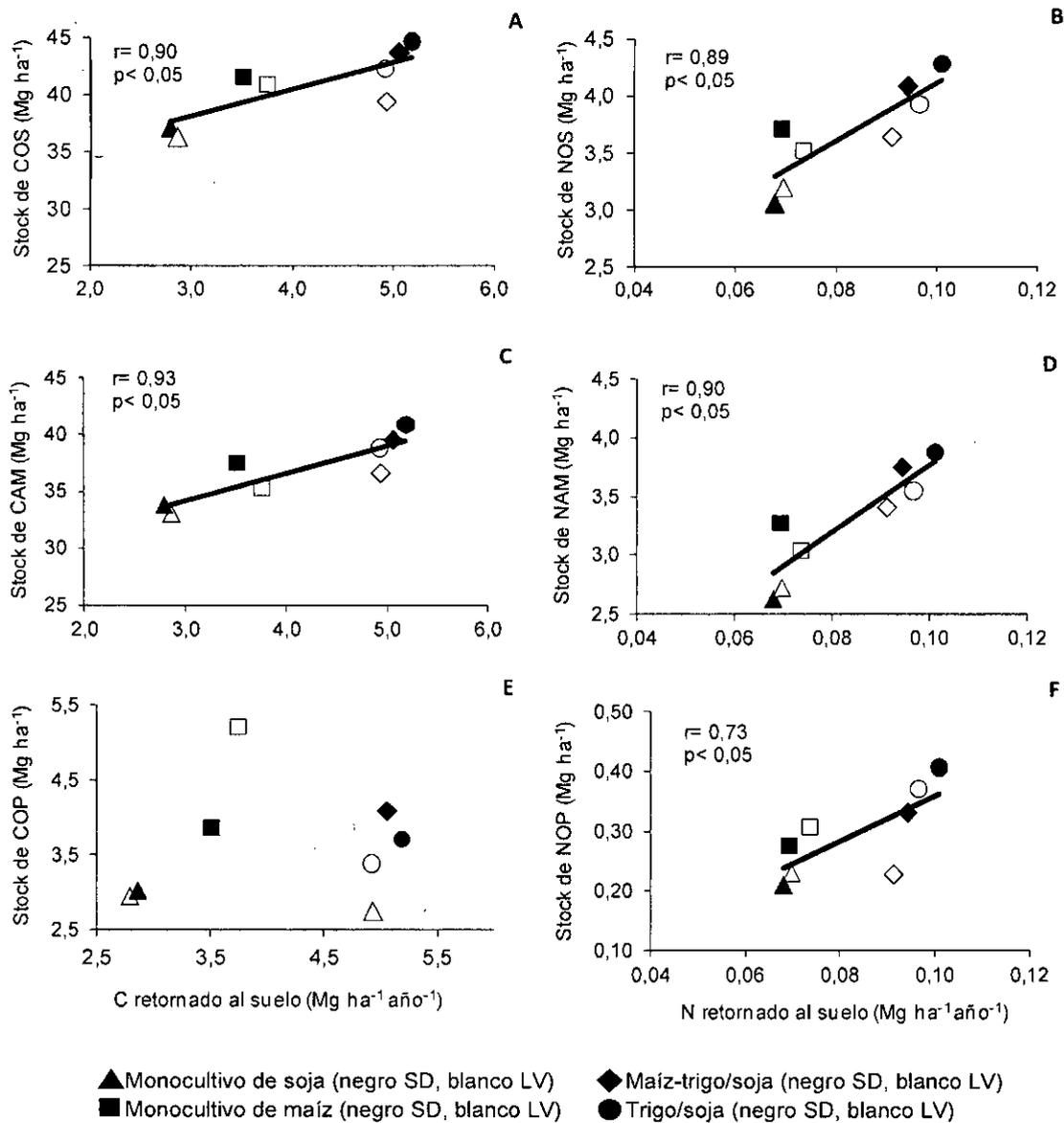
M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa; COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral. * letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas de labranza dentro de una misma secuencia de cultivo ($p < 0,05$).

Figura 3. Efecto de la secuencia de cultivo bajo dos sistemas de labranza sobre las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas, expresadas a 2500 Mg suelo ha⁻¹.

Las diferencias en COS y NOS encontradas entre secuencias de cultivo dentro de cada sistema de labranza pudieron explicarse, en buena parte, a través de las biomásas de C y N anualmente retornadas al suelo por los residuos de los cultivos (Figura 4 A y B). El retorno anual promedio de C para el período completo analizado, siguió la siguiente tendencia: monocultivo de soja ($2,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < monocultivo de maíz ($3,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < T/S ($5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) = M-T/S ($5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y el correspondiente de N: monocultivo de soja ($0,069 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) = monocultivo de maíz ($0,071 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < T/S ($0,099 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) = M-T/S ($0,093 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). El retorno de C en T/S y M-T/S fue 39 y 79% mayor que en los monocultivos de maíz y de soja, respectivamente y en el monocultivo de maíz fue 29% mayor que en el monocultivo de soja. El retorno de N en T/S y M-T/S fue 37 % superior que en los monocultivos.

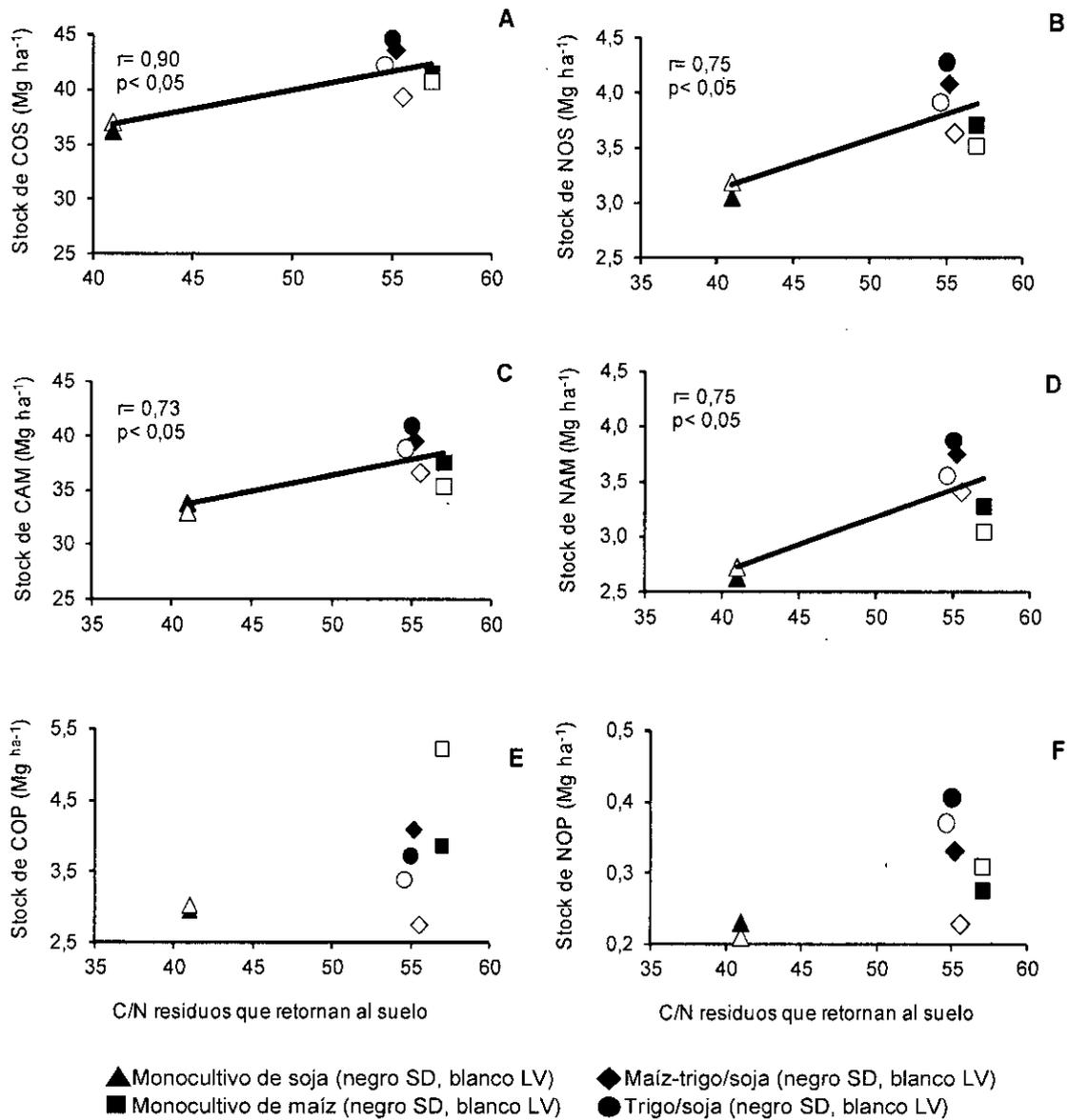
La calidad de los residuos de cultivo producidos por cada secuencia, expresada por medio de la relación C/N, también explicó parte de la variación en el stock de COS y NOS (Figura 5 A y B). En efecto, a medida que disminuyó la calidad de los residuos aportados (mayor C/N) éstos se incrementaron.

A su vez, en el monocultivo de soja se encontró un factor adicional que podría explicar las bajas reservas de COS y NOS: el pH del espesor 0-5 cm del suelo (Tabla 2). Este valor (6,35) difirió significativamente del encontrado en las restantes secuencias estudiadas (5,70), sin que existieran diferencias entre éstas. Evidentemente, la fertilización nitrogenada de las gramíneas en estas secuencias acidificó el suelo, pudiendo retardar la descomposición de los residuos. Por el contrario, debido a que la soja del monocultivo nunca se fertiliza con N y a la descomposición de los productos de la fijación biológica, se produjeron valores de pH cercanos a la neutralidad que podrían estimular la actividad microbiana descomponedora de los residuos en el espesor 0-5 cm. Huggins *et al.* (2007) reportaron un valor de pH muy similar al encontrado en este estudio para el monocultivo de soja (6,4) en el espesor 0-7,5 cm. Otros factores adicionales observados en el monocultivo de soja bajo SD fueron la baja estabilidad de agregados conjuntamente con la mayor temperatura media, lo que también podría estimular la mineralización de la MOS.



COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado.

Figura 4. Relación entre el C y el N retornado al suelo por los residuos de los cultivos con los stocks de COS (A), NOS (B) y sus fracciones granulométricas (C, D, E y F) expresados a una masa de suelo de 2500 Mg ha⁻¹.

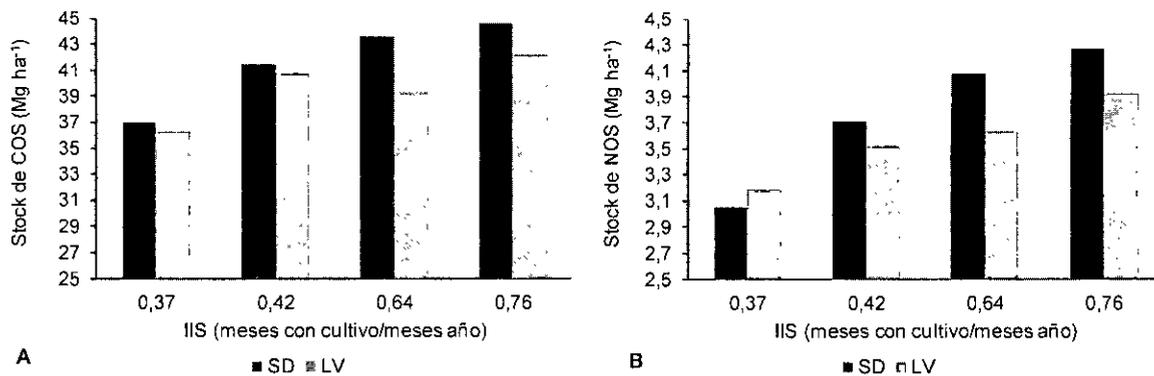


COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado.

Figura 5. Relación entre la relación C/N de los residuos que retornan al suelo con los stocks de COS (A), NOS (B) y sus fracciones granulométricas (C, D, E, F) expresados a una masa de suelo de 2500 Mg ha⁻¹.

Por otro lado, el aumento de la duración de los períodos de barbecho en las secuencias de cultivo también se constituyó en un factor que disminuye los stocks de COS y NOS (Campbell *et al.*, 1991, 2000; Janzen *et al.*, 1998; Paustian *et al.*, 2000). En las secuencias evaluadas, los barbechos son otoño-invernales, período que, para las condiciones edafoclimáticas de la región, se caracteriza por

presentar condiciones favorables para la mineralización de la MOS. Las Figuras 6 A y B muestran que la intensificación de la secuencia de cultivo aumentó las reservas de COS y NOS en los dos sistemas de labranza, en coincidencia con lo reportado por Wright & Hons (2004, 2005). Las relaciones encontradas entre la intensidad de las secuencias y los cambios en la MOS mostraron claramente la importancia de la reducción de los tiempos de barbecho para poder mejorar el estado orgánico del suelo.



COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa; IIS: índice de intensificación de la secuencia, es la fracción de meses del año ocupada por cultivos en el campo (S: 0,37; M: 0,42; M-T/S: 0,64 y T/S: 0,76).

Figura 6. Reservas de COS (A) y NOS (B) expresadas a una masa de suelo de 2500 Mg ha⁻¹ en función del IIS.

Los stocks de COP y de NOP presentaron comportamientos diferentes en las secuencias de cultivo bajo los dos sistemas de labranza (Figura 3 C y D). Bajo LV, el COP presente en el monocultivo de maíz resultó superior que en las secuencias de cultivo restantes, sin diferencias entre ellas. El NOP no presentó diferencias entre T/S y M y fue más elevado que en las otras dos secuencias, sin diferencias entre ellas. Bajo SD, el COP en el monocultivo de soja fue inferior al resto de las secuencias, que no difirieron entre sí. El mismo comportamiento presentó este monocultivo para el NOP, pero además, el monocultivo de maíz y T/S difirieron entre sí. Los valores medios de COP bajo ambos sistemas de labranza no se relacionaron con la cantidad de C retornado al suelo por los residuos de los cultivos (Figura 4 E), mientras que los de NOP sí lo hicieron (Figura 4 F). Las relaciones C/N de las secuencias de cultivo en ambos sistemas de labranza tampoco se relacionaron con los stocks de COP y de NOP (Figura 5 E y F). Bajo LV, el elevado valor de COP obtenido en el monocultivo de maíz radicaría en la introducción de una gran cantidad de residuo de menor calidad. En las rotaciones, los más bajos valores medios de COP podrían atribuirse a una mayor estimulación de la tasa de mineralización de

fracciones lábiles debido a una elevada diversidad de sustratos carbonados que ingresan al suelo por efecto del laboreo sistemático, anulando el efecto de la cantidad de C aportado (Luo *et al.*, 2010). Bajo SD, los menores valores medios de COP y NOP en el monocultivo de soja podrían ser explicados por el mayor pH superficial, la muy baja estabilidad de agregados y la mayor temperatura media.

Los valores medios de CAM entre secuencias de cultivo variaron en el siguiente orden: T/S > M-T/S > M > S. Por su parte, los valores medios del NAM entre secuencias de cultivo tuvieron el mismo comportamiento bajo los dos sistemas de labranza: M-T/S = T/S > M > S. Las diferencias encontradas entre secuencias de cultivo para CAM y NAM pudieron explicarse por la cantidad de C y N retornados al suelo por los residuos de los cultivos (Figura 4 C y D) y por la calidad de estos, expresada por medio de la relación C/N (Figura 5 C y D).

Por último, existieron diferencias significativas entre secuencias de cultivo para la relación COP/NOP (datos no mostrados). Las rotaciones M-T/S y T/S retuvieron más N que los monocultivos en su fracción particulada, y particularmente en T/S. Un resultado inesperado lo constituyó el bajo valor medio de COP/NOP encontrado en T/S (9,4). Esto estaría indicando un mecanismo de protección de la fracción lábil diferente al del resto de las secuencias.

Conclusiones

En el largo plazo la SD produjo cambios en las reservas de MOS con respecto al laboreo vertical con arado de cincel en las secuencias de cultivo más intensificadas (M-T/S y T/S), no así en los monocultivos. La combinación de estas rotaciones con la práctica continua de SD en la Pampa Ondulada puede mejorar el estado orgánico del suelo y prestar un importante servicio ambiental reduciendo las emisiones de CO₂ y las pérdidas de N hacia los sistemas adyacentes.

Consideraciones finales

La existencia de estos experimentos de largo plazo en un sitio representativo de la región, que abarca todo el período de cambios señalados, que controla importantes fuentes de variación y que dispone de una base de datos confiable, permitió cuantificar el posible impacto de la adopción masiva de los sistemas de cultivo en las últimas décadas en la Pampa Ondulada sobre la MOS. El elevado esfuerzo y

costo que requiere el mantenimiento de estos ensayos, hace que su valor científico y práctico sea inconmensurable y que continúe creciendo con los años.

Actualmente, uno de los mayores desafíos para la Pampa Ondulada es implementar un desarrollo agropecuario sostenible, que permita el crecimiento económico del sector, mantenga las cualidades del ambiente y reduzca el riesgo asociado a las variaciones del clima. Para tal fin, resulta necesario adaptar los planteos de producción que presentan estos ensayos. Una alternativa posible sería intensificarlos, incorporando, por ejemplo, cultivos de cobertura, pasturas temporarias y/o perennes. Estos nuevos sistemas de cultivo podrían representar una herramienta eficaz para mejorar la calidad de los suelos y su adopción redundaría en un beneficio ambiental para la región. Sin embargo, resulta necesario evaluar estos sistemas en el tiempo para reducir las fuentes de incertidumbre en el almacenamiento de MOS, tanto a nivel del clima como de prácticas agronómicas.

Por otro lado, estos ensayos pueden usarse para la calibración de modelos de simulación de la dinámica de C y N del suelo de largo plazo y así contribuir a la evaluación de la sustentabilidad ambiental de los sistemas de producción y a su planificación territorial.

Bibliografía

- Alvarez, R & H Steinbach. 2006. Balance de carbono en suelos cultivados. En: Pascale, JA (Ed.). *Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. 55-68 pp. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.
- Balesdent, J; C Chenu & M Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53: 215-230.
- Bolinder, MA ; HH Janzen ; EG Gregorich ; DA Angers & AJ VandenBygaart. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118: 29-42.
- Burke, W; D Gabriela & J Bruma (Eds). 1986. *Soil structure assessment*. Rotterdam, A.A. Balkema. 92 pp.
- Cambardella, CA & ET Elliot. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Campbell, CA; RP Zentner; EG Gregorich; G Roloff; BC Liang & B Blomert. 2000. Organic carbon accumulation in soil over 30 years in a semiarid southwestern Saskatchewan: Effects of crop rotations and fertilizers. *Can J. Soil. Sci.* 80: 179-192.

- Campbell, CA; VO Biederbeck; RP Zentner & GP Lafond. 1991. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 363-376.
- Domínguez, GF; NV Diovisalvi; GA Sttudert & MG Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage system on mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102: 93-100.
- Douglas, JT & MJ Goss. 1982. Stability and organic matter of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil Till. Res.* 2: 155-175.
- Doyle, GL; CW Rice; DE Peterson & J Steichen. 2005. Biologically defined soil organic matter pools as affected by rotation and tillage. *Environ. Manage.* 33: 528-538.
- Ekboir, J. 2001. Sistemas de innovación y política tecnológica: siembra directa en el MERCOSUR. En: Roberto Díaz Rossello (coordinador). *Siembra directa en el Cono Sur*. Pp. 1-18. PROCISUR, Montevideo.
- Franzluebbers, AJ. 2004. Tillage and residue management effects on soil organic matter. En: Magdoff, F & RR Weil (Eds). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Pp. 227-268. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 33431.
- Hedges, JI & Oades JM. 1997. Comparative organic geochemistries of soils in marine sediments. *Org. Geochem.* 27: 319-161.
- Huggins, DR; RR Allmaras; CE Clapp; JA Lamb & GW Randall. 2007. Corn soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 145-154.
- INTA. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Pergamino (3360-32). 106 pp. + anexos.
- Janzen, HH; CA Campbell; RC Izaurralde; BH Ellert; N Juma et al. 1998. Management effects on soil carbon storage on Canadian Prairies. *Soil Till. Res.* 47: 181-195.
- 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.
- Luo, Z ; E Wang & OJ Sun. 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139: 224-231.
- Milesi Delaye, LA; AB Irizar; AE Andriulo & B Bruno. 2013. Effect of Continuous Agriculture of grassland soils of the Argentine Rolling Pampa on soil organic carbon and nitrogen. *Applied Environ. Soil Sci.* Volume 2013. Article ID 487865. 17 pp.
- Oorts, K; B Nicolardot; R Merckx; G Richard & H Boizard. 2006. C and N mineralization of undisrupted and disrupted soil from different structural zones of conventional tillage and no-tillage systems in northern France. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2576-2586.
- Oorts, K; H Bossuyt; J Labreuche; R Merckx & B Nicolardot. 2007. Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *Eur. J. Soil Sci.* 58: 248-259.
- Paustian, K; J Six; ET Elliot & HW Hunt. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochem.* 48: 147-163.
- Puget, P; C Chenu & J Balesdent. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.* 46: 449-459.

-
- Puget, P; J Balesdent & C Chenu. 1999. Dynamics of soil organic matter associated with primary particle size fractions of water-stable aggregates. *Eur. J. Soil Sci.* 51: 595-605.
- SAGPyA. 2006. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. República Argentina. www.sagpya.gov.ar. 06/08/2008.
- SAS Institute Inc. 2001. SAS/STAT User's guide, Version 8.2. 4th edition. Vol. 2. Cary, NC: SAS Institute Inc. 846 pp.
- Senigaglia, C & M Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. En: Buxton, DR, R Shibles, RA Forsberg, BL Blad, KH Asay, GM Paulsen & RF Wilson (Eds). *International Crop Science*. Pp 27-35. Crop Sci. Soc. Am. Madison, WI 53711, USA.
- West, TO & WM Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1930-1946.
- Wright, AL & FM Hons. 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 507-513.
- Wright, AL & FM Hons. 2005. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage a