

## CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO BAJO SISTEMAS DE CULTIVO CONTRASTANTES Y SU RELACIÓN CON LA CAPACIDAD DE PROVEER NITRÓGENO

GUILLERMO ALBERTO STUDDERT<sup>1\*</sup>; MAGALÍ NOÉ DOMINGO<sup>1</sup>; GISELA VANESA GARCÍA<sup>1</sup>; MARÍA GLORIA MONTERUBBIANESI<sup>1</sup> & GERMÁN FRANCO DOMÍNGUEZ<sup>1</sup>

Recibido: 23-02-17

Recibido con revisiones: 17-05-17

Aceptado: 27-05-17

### RESUMEN

Los contenidos de carbono (C) orgánico total (COT) y particulado (COP) del suelo disminuyen con los años bajo agricultura y su variación afecta muchos procesos edáficos que determinan la productividad (e.g. la provisión de nitrógeno (N)). Las variaciones de COT y COP son dependientes del balance entre los aportes y la pérdida de C del suelo. Se hipotetiza que en molisoles del Sudeste Bonaerense: i) los cambios en COT y COP en la capa arable, son más dependientes del aporte carbonado de la secuencia de cultivos utilizada que del sistema de labranza (SL) empleado, ii) el contenido de COP es dependiente de las características de los residuos devueltos por el cultivo antecesor inmediato, y iii) las variaciones de COT y COP se relacionan con la capacidad del suelo de proveer N, independientemente del SL y de la secuencia de cultivos. Se determinaron el COT y el COP de muestras tomadas anualmente de 0-5 y 5-20 cm de un ensayo en Balcarce entre 2005 y 2011. El ensayo comprendió dos SL (convencional (LC) y siembra directa (SD)) y tres Secuencias de cultivos (con tres alternativas (Series) cada una), incluyendo maíz (M), trigo (T) y soja (S): MMT, MST y SST. El M y el T fueron fertilizados con N (FN). Hubo disminuciones diferenciales en COT y COP entre SL (sin disminución bajo SD y con disminuciones de 0,34 y 0,39 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> bajo LC, respectivamente) sólo en la capa de 0-5 cm. En la capa arable completa, aquellas variables disminuyeron con los años de agricultura (0,30 y 0,26 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente), independientemente del SL. No se observó una disminución diferencial de COT ni de COP asociada a las combinaciones de cultivos, independientemente del SL. Tampoco se observó un efecto de las características del cultivo antecesor inmediato sobre el contenido de COP. Asimismo, el COT y el COP presentaron una dinámica similar a la reportada para NAN. No obstante, las relaciones entre NAN y COT y NAN y COP, si bien fueron significativas, presentaron bajos R<sup>2</sup> (0,55 y 0,57 (0-5 cm), 0,09 y 0,10 (5-20 cm), 0,18 y 0,17 (0-20 cm), respectivamente). La FN (frecuencia, dosis) puede haber enmascarado los efectos esperados en la relación del COP y COT con el aporte de C por los residuos y, además, de aquellas con el NAN, por afectar las condiciones de descomposición y transformación de los materiales orgánicos. Las evidencias reunidas no sostuvieron las hipótesis planteadas.

**Palabras clave.** Combinaciones de cultivos, sistemas de labranza, aporte de carbono, materia orgánica particulada, nitrógeno anaeróbico.

### SOIL ORGANIC CARBON UNDER CONTRASTING CROPPING SYSTEMS AND ITS RELATIONSHIP WITH NITROGEN SUPPLY CAPACITY

#### ABSTRACT

Soil total (COT) and particulate (COP) organic carbon (C) contents decrease over the years under cropping. Its variation affects many soil processes that determine soil productivity (e.g. nitrogen (N) supply). COT and COP changes depend on the balance between C input and loss. For mollisols of the southeastern region of Buenos Aires province, it was hypothesized that: 1) COT and COP content decrease in the arable layer and vary as a function of the crop sequence regardless of the tillage system (SL), ii) COP content depends on the immediately preceding crop residue characteristics, and iii) changes in COT and COP are related to the soil N supplying capacity, regardless of the SL and crop sequence. Total organic C and COP were determined in soil samples taken annually at 0-5 cm and 5-20 cm depths in a long-term experiment in Balcarce between 2005 and 2011. The experiment comprised two SL (conventional (LC) and no-till (SD)) and three crop sequences (with three alternatives (Series) for each one), including corn (M), wheat (T) and soybean (S): MMT, MST and SST. Corn and T were fertilized with N (FN). There were differential decreases in COT and COP among SL (no decrease under SD and decreases of 0.34 and 0.39 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> under LC, respectively) only at the 0-5 cm layer. In the whole arable layer COT and COP decreased over the years under cropping (0.30 and 0.26 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively), regardless of the SL. No differential COT nor COP decrease was detected related to crop sequences, regardless of the SL. Neither was there an effect of the immediately preceding crop residue characteristics on COP content. Likewise, COT and COP showed similar dynamics than reported for NAN. Relationships between NAN and COT and NAN and COP were significant although with low R<sup>2</sup> (0.55 and 0.57 (0-5 cm), 0.09 and 0.10 (5-20 cm), 0.18 and 0.17 (0-20 cm), respectively). Frequency and rate of FN may have masked the expected effects of the amount of residue C input on COT and COP and, besides, on the relationship of these two variables and NAN. Nitrogen fertilization affects organic material decomposition and transformation dynamics. The experimentally obtained evidences did not support the posed hypotheses.

**Key words.** Crop rotations, tillage systems, carbon input, particulate organic matter, anaerobic nitrogen.

1. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata

\* Autor de contacto: studdert.guillermo@inta.gov.ar

## INTRODUCCIÓN

La materia orgánica (MO) es el componente del suelo más sensible a la actividad antrópica. Los cambios en el contenido de MO inciden directamente sobre la sustentabilidad del agroecosistema a través de la afectación de la salud del suelo (Quiroga & Studdert, 2014). El logro de una agricultura sustentable está muy ligado a cómo se maneja la variación de la MO (Lal, 2010) a través de prácticas que regulan los mecanismos de entrada y salida del carbono (C) de la MO del suelo y, así, su variación en el tiempo (Quiroga & Studdert, 2014).

La disminución de la MO es inversamente proporcional a la cantidad de material carbonado aportado (Domínguez *et al.*, 2009; Lal, 2014) y directamente proporcional a la agresividad del sistema de labranza (SL) del suelo (Studdert & Echeverría, 2000; Lal, 2014). Por ello, la adopción de sistemas de cultivo que aumenten el retorno de residuos y reduzcan la intensidad del laboreo, podría permitir mejorar la calidad del suelo y la sostenibilidad agrícola. La labranza agresiva (*p.e.* labranza convencional (LC)) incorpora los residuos a la masa del suelo, poniendo sustrato carbonado a disposición de los organismos y distribuido en la profundidad de laboreo, reduciendo la cobertura y favoreciendo la elevación de la temperatura (Triplett & Dick, 2008). Se incrementa el flujo de oxígeno dentro del suelo y se expone la MO protegida dentro de los agregados a una mineralización más intensa (Six *et al.*, 2004) y a la disminución de su contenido, particularmente de las fracciones lábiles. Por otro lado, bajo labranzas conservacionistas (*p.e.* siembra directa (SD)), la transformación de los residuos en MO ocurre mayormente dentro de los primeros centímetros del perfil. Además, menor intensidad de laboreo ayuda a conservar la MO protegida dentro de los agregados (Six *et al.*, 2004). Así, con la SD se tiende a aumentar el contenido de MO en la capa superficial del suelo (Powlson *et al.*, 2014).

Sin embargo, sea cual sea el SL empleado, las variaciones de MO del suelo dependen de la cantidad y la calidad de los residuos devueltos al suelo. Secuencias de cultivos con mayor aporte de C permiten compensar más fácil y rápidamente las salidas de C, que aquéllas con menor aporte (Quiroga & Studdert, 2014). Asimismo, la calidad de los residuos (relación C/N, contenido de lignina, contenido de carbohidratos solubles) influyen la dinámica de la MO del suelo, afectando su tasa de humificación (Mazzilli *et al.*, 2014; Quiroga & Studdert, 2014) y de mineralización

(Casado-Murillo & Abril, 2013; Mazzilli *et al.*, 2014). Por lo tanto, la elección de las especies involucradas en las secuencias de cultivos (Studdert & Echeverría, 2000; Mazzilli *et al.*, 2014) y su rendimiento (Domínguez *et al.*, 2009) influirían sobre la dinámica de la MO del suelo independientemente del SL empleado. Los cambios en la MO asociados con el manejo se manifiestan fundamentalmente a través de la variación de sus fracciones lábiles tales como la MO particulada (MOP) (Six *et al.*, 2004; Domínguez *et al.*, 2009). El seguimiento de la variación de la MOP puede dar indicios tempranos de los efectos de las prácticas de manejo (Gregorich *et al.*, 2006). No obstante, dado su carácter de fracción altamente dinámica, las características del material recientemente devuelto al suelo (*i.e.* cantidad y calidad), podrían provocar cambios de corto plazo en la MOP (Wander & Nissen, 2004).

Uno de los atributos edáficos más afectados por los cambios en el contenido de MO del suelo es la capacidad de proveer nutrientes a las plantas (*p.e.* nitrógeno (N)). La MOP está estrechamente ligada a la capacidad del suelo para mineralizar N (Gregorich *et al.*, 2006; Domínguez *et al.*, 2016). El N incubado anaeróbico (NAN) ha sido propuesto como una alternativa rápida y precisa para estimar la capacidad del suelo de mineralizar N (Echeverría *et al.*, 2000). Se ha informado una estrecha relación del NAN con el contenido de C orgánico (CO) total (COT) y más aún con el de CO en la MOP (COP) (Domínguez *et al.*, 2016). Asimismo, se ha demostrado que el NAN se comporta de manera similar al COT y al COP frente a las prácticas de manejo y, por lo tanto, las variaciones que éstas producen sobre el contenido de CO del suelo, se ven también reflejadas en el NAN (Studdert *et al.*, 2015; García *et al.*, 2016). Sin embargo, estas relaciones se refieren a cambios en el largo plazo como producto de la aplicación de diversas prácticas de manejo (*i.e.* combinaciones de cultivos, SL, fertilización nitrogenada (FN)). García *et al.* (2016) demostraron que las características del material devuelto al suelo, no provocaba cambios en el NAN en el corto plazo. No obstante, no se ha informado si ocurre algo similar con la MOP.

El proceso de agriculturización (Manuel-Navarrete *et al.*, 2009) a que han estado sometidos los suelos agrícolas del Sudeste Bonaerense (SEB), ha provocado la disminución de la MO y la MOP (Sainz Rozas *et al.*, 2011). También se ha informado disminución del NAN (Reussi Calvo *et al.*, 2014; García *et al.*, 2016), afectando la capacidad del suelo de proveer N. En ensayos de larga duración en el SEB se ha

observado disminución de NAN y del contenido de MO con el aumento de los años de agricultura aún bajo SD (Studdert *et al.*, 2010; García *et al.*, 2016). No obstante, bajo SD se han reportado contenidos de MO y NAN más elevados que bajo LC, sólo en la capa más superficial del suelo (0-5 cm). Por otro lado, teniendo cuenta la capa arable completa (0-20 cm), no se han observado diferencias entre sistemas de labranza (Domínguez *et al.*, 2009; Studdert *et al.*, 2010; García *et al.*, 2016).

Sin embargo, hay acuerdo generalizado respecto a que el efecto esperado de la reducción de la intensidad de laboreo sobre la dinámica de la MO asociada con el uso, debe estar forzosamente ligada a la combinación de cultivos empleada (Powlson *et al.*, 2014). El efecto combinado de SL y secuencia de cultivos en el corto y en el largo plazo, no ha sido estudiado para suelos de las características de los del SEB, comparando sistemas de labranza contrastantes en combinación con secuencias con distintos niveles de aporte de C al suelo y distintas calidades de sustrato carbonado aportado.

Para suelos del SEB, se hipotetiza que: i) los cambios en los contenidos de COT y de COP en la capa arable del suelo debidos a la agricultura, son más dependientes del aporte carbonado de la secuencia de cultivos utilizada que del SL empleado, ii) el contenido de COP es dependiente de las características de los residuos devueltos por el antecesor inmediato, y iii) la capacidad del suelo de proveer N se relacionan con los cambios en los contenidos de COT y de COP, independientemente del SL y de la combinación de cultivos utilizados. El objetivo de este trabajo fue evaluar los contenidos de COT y COP para cuantificar el efecto de diferentes secuencias de cultivos con distintos aportes de C y dos sistemas de labranza (LC y SD) sobre su variación en el corto y en el largo plazo, y su relación con el NAN.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo en la Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias - Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce (37°45' S; 58°18' W; 130 m snm) sobre un complejo de Argiudol Típico (Soil Survey Staff, 2014) (serie Mar del Plata, INTA, 1979) y Argiudol Petrocálcico (Soil Survey Staff, 2014) (serie Balcarce, INTA, 1979) de textura franca, con menos de 2% de pendiente (bajo nivel de erosión). Se analizaron muestras de suelo que habían sido tomadas de parcelas de un ensayo de agricultura continua de larga duración y que, luego de haber sido secadas y molidas, fueron almacenadas hasta el momento del análisis.

El ensayo había sido iniciado en 2005 sobre un suelo bajo pastura de gramíneas sin pastoreo durante más de cinco años. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas divididas, con dos repeticiones. Las unidades experimentales fueron de 4,5 x 14,0 m. Los factores de tratamiento y sus niveles fueron: 1) SL: SD y LC, 2) Secuencia de cultivos: a) maíz (M) - maíz - trigo (T) (MMT), b) maíz - soja (S) - trigo (MST), c) soja - soja - trigo (SST), y 3) Año: 2005 (inicio) a 2011. Cada Secuencia de cultivos tuvo, entonces, tres Fases (cada uno de los cultivos que la componen) y al conjunto de las tres Fases se lo denominó Ciclo. Al iniciar el ensayo cada Secuencia de cultivo fue iniciada en cada una de sus Fases (p.e. la secuencia MMT fue iniciada en una unidad experimental en ese orden (M<sub>1</sub>M<sub>2</sub>T), en otra unidad experimental se la inició por la segunda Fase (M<sub>2</sub>TM<sub>1</sub>) y en otra unidad experimental se la inició por la tercera Fase (TM<sub>1</sub>M<sub>2</sub>). Se hizo lo mismo con las otras dos secuencias). Quedaron así definidas nueve combinaciones de cultivos que se denominaron Series: tres Secuencias de cultivos iniciadas en las tres Fases que las componen (M<sub>1</sub>M<sub>2</sub>T, M<sub>2</sub>TM<sub>1</sub>, TM<sub>1</sub>M<sub>2</sub>, MST, STM, TMS, S<sub>1</sub>S<sub>2</sub>T, S<sub>2</sub>TS<sub>1</sub>, TS<sub>1</sub>S<sub>2</sub>) (Fig 1). A las parcelas principales se asignaron los SL y a las sub-parcelas, las Series. Los cultivos de maíz y trigo fueron fertilizados con 120 kg N ha<sup>-1</sup> en los estadíos de 6 hojas totalmente desplegadas (V6) (Ritchie & Hanway, 1982) y macollaje (estado 30) (Zadoks *et al.*, 1974) para maíz y trigo, respectivamente.

Se utilizaron muestras almacenadas (compuestas por 5 submuestras por unidad experimental) que habían sido tomadas con un muestreador tubular de 4,5 cm de diámetro, en otoño (luego de la cosecha de los cultivos) de cada año entre 2005 y 2011 y a dos profundidades (0-5 y 5-20 cm). A cada muestra compuesta se le había tomado el peso fresco y una alícuota para determinar el contenido de agua por el método gravimétrico. Con ello fue posible calcular la densidad aparente según lo indicado por Agostini *et al.* (2014). El resto de cada muestra había sido secado en estufa con circulación forzada de aire a 30 °C y molido hasta pasar por tamiz de 2,0 mm, eliminando el material vegetal identificable que quedaba sobre el tamiz y luego almacenadas hasta su análisis.

Para la determinación del COP se realizó el fraccionamiento físico según Cambardella & Elliott (1992), recuperándose la fracción <50 µm en la que se determinó CO asociado a la fracción mineral (COA). El COT y el COA se determinaron por combustión húmeda con mantenimiento de la temperatura de reacción (120 °C) durante 90 minutos (Schlichting *et al.*, 1995). El COP se determinó por diferencia entre los contenidos de COT y de COA (Cambardella & Elliott, 1992). Los resultados de cada fracción de CO fueron expresados como concentración (g kg<sup>-1</sup>) y como masa de C (Mg C ha<sup>-1</sup>) para las profundidades muestreadas y para el promedio ponderado por espesor hasta 0-20 cm. La capacidad del suelo de proveer N

Secuencia de cultivos	Serie	Año						
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
MMT	M <sub>1</sub> M <sub>2</sub> T	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	T	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	T	M <sub>1</sub>
	M <sub>2</sub> TM <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	T	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	T	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
	TM <sub>1</sub> M <sub>2</sub>	T	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	T	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	T
MST	MST	M	S	T	M	S	T	M
	STM	S	T	M	S	T	M	S
	TMS	T	M	S	T	M	S	T
SST	S <sub>1</sub> S <sub>2</sub> T	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	T	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	T	S <sub>1</sub>
	S <sub>2</sub> TS <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	T	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	T	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
	TS <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	T	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	T	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	T




Figura 1. Esquema de tratamientos del ensayo. M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M: maíz; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> y S: soja; T: trigo.

Figure 1. Experiment treatment scheme. M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> and M: maize; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> and S: soybean; T: wheat.

fue evaluada a partir de datos de NAN de este mismo ensayo tomados de García *et al.* (2016). Brevemente, la determinación del NAN se realizó sobre las mismas muestras de suelo, con el método de incubación anaeróbica corta a 40 °C durante 7 días, según la técnica descrita por Keeney (1982) y las determinaciones N de amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) liberado durante la incubación, se realizaron por destilación por arrastre con vapor (Keeney & Nelson, 1982).

La producción de biomasa (aérea y de raíces) de cada uno de los cultivos fue estimada a partir de los rendimientos en grano de los cultivos. La producción de biomasa aérea se estimó utilizando los índices de cosecha de materia seca indicados por Domínguez & Studdert (2006) (0,45, 0,45 y 0,40 para maíz, trigo y soja, respectivamente). La producción de biomasa de las raíces y rizodeposición hasta 20 cm de profundidad fue estimada (Domínguez & Studdert, 2006) de acuerdo con la relación raíz: parte aérea reportada por Buyanovsky & Wagner (1997) (0,35, 0,48 y 0,38 para maíz, trigo y soja, respectivamente) y la proporción de raíces en la capa de 0-20 cm del suelo informada por Buyanovsky & Wagner (1986) (0,86, 0,86 y 0,80 para maíz, trigo y soja, respectivamente). El contenido de C en el tejido vegetal fue asumido como 43% (Sánchez *et al.*, 1996).

Los resultados fueron analizados mediante análisis de varianza con un modelo lineal mixto (Littell *et al.*, 2006) en que SL, Año y Serie fueron los factores fijos y bloque y sus interacciones con los demás factores, fueron los aleatorios. En el modelo mixto se incorporó la consideración de medidas repetidas en el tiempo a efectos de tener en cuenta las posibles correlaciones entre los errores surgidas de medidas realizadas sobre la misma

unidad experimental a lo largo de los años. Se utilizó el procedimiento PROC MIXED del Statistical Analysis System (SAS) (SAS Institute, 2004) con sus opciones RANDOM y REPEATED (Littell *et al.*, 2006). Se realizaron análisis de regresión lineal simple mediante PROC REG del SAS (SAS Institute, 2004) para determinar relaciones entre el COT y el COP con el NAN y los aportes de C por los residuos de los cultivos y, además, para caracterizar los cambios de COT, COA y COP a lo largo de los años. Para evaluar el efecto de los residuos de los cultivos antecedentes inmediatos sobre COP, se realizaron análisis de varianza por año. Para determinar la significancia de las diferencias y/o de las relaciones entre variables se consideró un nivel de significación de 0,05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La densidad aparente al inicio del experimento (año 2005) fue, en promedio  $1,12 \pm 0,02$ ,  $0,85 \pm 0,01$  y  $0,92 \pm 0,01$  Mg m<sup>-3</sup> para 0-5, 5-20 y 0-20 cm, respectivamente. Durante el experimento (2006 a 2011) se observaron algunos efectos significativos de las variables de clasificación (SL, Serie, Año) y algunas de sus interacciones (datos no mostrados) sobre la densidad aparente en las tres capas. Los promedios generales de densidad aparente entre 2006 y 2011 fueron  $1,21 \pm 0,006$ ,  $1,23 \pm 0,003$  y  $1,22 \pm 0,003$  Mg m<sup>-3</sup> para 0-5, 5-20 y 0-20 cm, respectivamente, sin tendencias distintivas entre niveles de las variables de clasificación. Por lo tanto, los resultados de CO fueron expresados en masa equivalente respecto a masas de sue-

lo de 560, 1275 y 1835 Mg suelo ha<sup>-1</sup> para 0-5, 5-20 y 0-20 cm, respectivamente, calculadas con la densidad aparente al inicio del ensayo.

### Variación en el tiempo del CO del suelo

La Tabla 1 muestra los resultados del análisis de varianza para COT, COA y COP a las tres profundidades analizadas (0-5, 5-20 y 0-20 cm). Si bien hubo efecto significativo de la interacción SL \* Año y efecto significativo de Año sobre los contenidos de COA (Tabla 1, Fig 2), no hubo tendencias claras en su variación a lo largo del tiempo asociadas con el SL. Además, los contenidos de COA se mantuvieron relativamente constantes entre inicio y fin del experimento (en promedio general, 13,7 ± 0,07, 31,1 ± 0,16 y 44,9 ± 0,21 Mg ha<sup>-1</sup> para 0-5, 5-20 y 0-20 cm, respectivamente) y las regresiones lineales de COA vs Año fueron no significativas (datos no mostrados). Por otro lado, algo similar sucedió con la interacción SL \* Serie, dado que no hubo consistencia en las diferencias entre SL para cada Serie. Asimismo, hubo efecto significativo de la Serie a las tres profundidades, pero los valores de COA no mostraron tendencias que pudieran asociarse con las Secuencias de cultivos y las Series dentro de cada una de ellas (datos no mostrados). Los promedios generales de COA fueron 13,9 ± 0,14 (rango 13,1-15,1), 31,6 ± 0,36 (rango 29,4-35,0) y 45,7 ± 0,51 (rango 42,5-50,4) Mg ha<sup>-1</sup> para 0-5, 5-20 y 0-20 cm, respectivamente. Estos resultados no difieren de lo reportado por otros autores en la misma región (Domínguez *et al.*, 2009; Studdert *et al.*, 2010) y confirman que en suelos de este tipo y con baja exposición a la erosión, los cambios en la MO del suelo bajo agricultura, se caracterizan por los cambios en el COT y, principalmente, en el COP (Diovisalvi *et al.*, 2014; Domínguez *et al.*, 2016).

A la profundidad 0-5 cm hubo efecto significativo de la interacción SL \* Año sobre los contenidos de COT y COP (Tabla 1 y Fig 2a). Entre 2006 y 2011, éstos fueron significativamente más altos bajo SD que bajo LC. En los 6 años de agricultura, bajo SD no hubo disminución de COT ni de COP a esta profundidad (Fig 2a) (regresiones COT vs Año y COP vs Año, no significativas). No obstante, en la Figura 2a se ve que, bajo LC, la variación de los contenidos tanto de COT cuanto de COP en función de los años desde el inicio del ensayo (2005), disminuyeron significativamente ( $P < 0,01$ ) (-0,34 Mg COT ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y -0,39 Mg COP ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>,  $R^2 = 0,17$  y  $R^2 = 0,26$ , respectivamente). Cabe recalcar que la mayor parte de dicha disminución ocurrió en el primer año de ensayo, posiblemente por la mezcla de la

capa de acumulación superficial con el resto de la profundidad de laboreo y la pérdida de parte de las fracciones lábiles acumuladas durante la pastura previa. Por otro lado, de 5-20 cm, sólo hubo efecto significativo de Año sobre COT y COP (Tabla 1 y Fig 2b), con disminuciones significativas ( $P < 0,05$ ) de sus contenidos con el aumento de los años de agricultura desde 2005 (-0,30 Mg COT ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y -0,26 Mg COP ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>,  $R^2 = 0,05$  y  $R^2 = 0,07$ , respectivamente), independientemente del SL. Además, no hubo efecto principal del SL sobre los contenidos de COT ni de COP (Tabla 1). Así, en la capa arable (0-20 cm) no hubo efecto significativo de la interacción SL \* Año ni del SL (Tabla 1) sobre los contenidos de COT y de COP, pero sí efecto de los años bajo agricultura (Tabla 1, Fig 2c). Independientemente del SL utilizado, los contenidos de COT (-0,41 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>;  $P < 0,05$ ,  $R^2 = 0,04$ ) y de COP (-0,39 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>;  $P < 0,01$ ,  $R^2 = 0,07$ ) disminuyeron significativamente a lo largo de los años de agricultura desde el inicio del ensayo (Fig 2c).

Las salidas en el balance de CO del suelo pueden ser reguladas a través de la agresividad del SL utilizado. Así, labranzas más agresivas conducirían a mayores tasas de mineralización del CO del suelo (Six *et al.*, 2000), lo que podría conducir a menores contenidos. Por otro lado, la reducción de la agresión por el laboreo hasta el extremo de la SD, sería una forma de atenuar dichas pérdidas e, inclusive, conducir a incrementar el CO del suelo (Triplett & Dick, 2008; Lal, 2010). Bajo este SL, la ausencia de remoción llevaría a preservar mejor los mecanismos de protección del CO del suelo (Six *et al.*, 2004). Sin embargo, la presencia de residuos en superficie conduce a una estratificación del C en el perfil con mayor acumulación cerca de su superficie (Powlson *et al.*, 2014), pero no necesariamente acumulación de CO por debajo de la capa más superficial. Los consistentemente mayores contenidos de COT y COP en la capa de 0-5 cm observados bajo SD (Fig 2a), confirman este fenómeno y coinciden con la bibliografía (Domínguez *et al.*, 2009; Powlson *et al.*, 2014; Studdert *et al.*, 2010; Domínguez *et al.*, 2016). Por otro lado, la ausencia de efecto significativo de los SL y la tendencia declinante del CO en la capa arable (0-20 cm, Fig 2c) con los años de agricultura sin distinción entre LC y SD, es coincidente con lo informado por otros autores para suelos similares con bajo nivel de deterioro (Domínguez *et al.*, 2009; Studdert *et al.*, 2010; Domínguez *et al.*, 2016). Esto indica que, en estos Molisoles, las diferentes tasas de mineralización asociadas con los SL no llegarían a generar diferencias mayores que las provocadas por el efecto de la distribución del sustrato carbonado en la capa arable. No obstante, los bajos  $R^2$  de

Tabla 1. Resultados del análisis de varianza (valor *P*) de carbono orgánico total (COT), asociado a la fracción mineral (COA) y particulado (COP) del suelo a tres profundidades (0-5, 5-20 y 0-20 cm). NS: no significativo ( $P > 0,05$ ); SL: sistema de labranza.

Table 1. Results of the analysis of variance (*P*-value) of soil total (COT), mineral associated (COA), and particulate (COP) organic carbon at three soil depths (0-5, 5-20, and 0-20 cm). NS: not significant ( $P > 0.05$ ). SL: tillage system.

Fuente de variación	COT			COA			COP		
	0-5 cm	5-20 cm	0-20 cm	0-5 cm	5-20 cm	0-20 cm	0-5 cm	5-20 cm	0-20 cm
SL	NS	NS	NS	NS	NS	NS	<0,01	NS	NS
Serie	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	NS	NS
SL*Serie	0,01	0,01	0,01	<0,01	NS	0,01	0,02	NS	NS
Año	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
SL*Año	0,03	NS	NS	NS	0,03	0,03	0,01	NS	NS
Serie*Año	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SL*Serie*Año	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

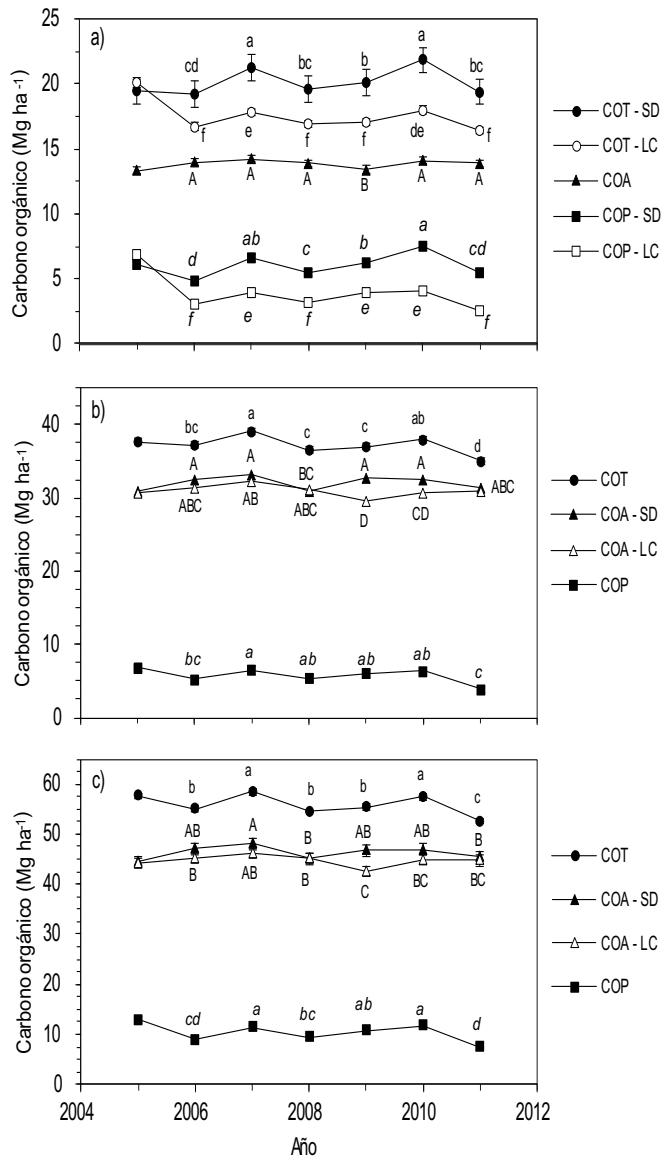


Figura 2. Variación en el tiempo de contenido de carbono orgánico total (COT), asociado a la fracción mineral (COA) y particulado (COP) a tres profundidades: a) 0-5 cm, b) 5-20 cm y c) 0-20 cm. LC: labranza convencional; SD: siembra directa. Letras minúsculas, letras mayúsculas y letras minúsculas cursivas iguales indican diferencias no significativas ( $P > 0,05$ ) entre valores de COT, COA y COP, respectivamente. Las barras verticales en cada punto indican el error estándar de la media. Los datos del año 2005 no fueron incluidos en el análisis de varianza.

Figure 2. Soil total (COT), mineral associated (COA), and particulate (COP) organic carbon content variation along time in three layers: a) 0-5 cm, b) 5-20 cm and c) 0-20 cm. LC: conventional tillage; SD: no-tillage. Equal lower case letters, capital case letters, and italic lower case letter indicate no significant differences ( $P > 0.05$ ) among COT, COA and COP values, respectively. Vertical bars in each dot, indicate standard error of the mean. Yearly data was not included in the variance analysis.

las regresiones lineales relacionando COT y COP con el tiempo bajo agricultura, pueden considerarse indicio de diferencias en estas variables relacionadas con la cantidad y/o la calidad de los residuos aportados por las distintas secuencias de cultivos.

El efecto de la interacción Serie \* Año sobre los contenidos de COT y COP fue no significativo (Tabla 1). Las regresiones lineales de estas variables vs Año para cada Serie fueron no significativas, aunque todas con tendencia a pendiente negativa (datos no mostrados). Esto indica que las variaciones de COT y de COP en el tiempo bajo agricultura no fueron diferenciales entre combinaciones de cultivos. Sin embargo, sí hubo efecto significativo de la interacción SL \* Serie sobre el contenido de COT a las tres profundidades y sobre el de COP a 0-5 cm (Tabla 1). No se observaron tendencias diferenciales relacionadas con el SL sobre el COT a 5-20 cm y 0-20 cm (datos no mostrados) y, por lo tanto, la interacción SL \* Serie a esas profundidades sobre COT no fue tenida en cuenta, analizándose entonces el efecto principal significativo de la Serie (Tabla 1). En la Figura 3 se muestran los contenidos de COT y COP para cada serie bajo SD y LC a 0-5 cm (Fig 3a y 3d) y para cada Serie sin discriminar entre SL para las otras dos capas (Fig 3b, 3c, 3e y 3f). En superficie (0-5 cm), tanto COT cuanto COP fueron significativamente mayores bajo SD para cada serie, coincidiendo con lo mostrado en la Figura 2 y la bibliografía (Domínguez *et al.*, 2009; Studdert *et al.*, 2010; Powlson *et al.*, 2014; Domínguez *et al.*, 2016). En la Figura 3 se muestran también los promedios de contenido de COT y COP de las tres series por cada Secuencia de cultivos (MMT, MST, y SST) a las tres profundidades. Se puede ver que hubo una tendencia consistente asociada con la Secuencia de cultivos (MMT > MST > SST), para ambas fracciones del CO y a las tres profundidades. No obstante, del análisis de las diferencias entre medias de las diferentes Series surge que tales tendencias no son tan claras como las sugeridas al analizar los promedios por Secuencia de cultivos.

Las distintas combinaciones de cultivos en el tiempo aportan diferentes cantidades de C al suelo. Así, según los cultivos involucrados, la dinámica del cambio del CO del suelo será distinta, debido principalmente a la cantidad de C aportado por los residuos (Quiroga & Studdert, 2014). Coincidiendo con Studdert & Echeverría (2000) y Mazzilli *et al.* (2014), mayor frecuencia de cultivos con menores volumen y relación C/N de los rastrojos en la secuencia (*i.e.* soja), condujo a menores contenidos de MO del suelo. Sin embargo, en muchos casos, hubo diferencias significati-

vas entre series dentro de cada Secuencia de cultivos y no las hubo entre Series de secuencias diferentes (Fig 3). Esto sugiere que la incidencia de las condiciones de cada año sobre el comportamiento de los cultivos, puede haber provocado diferencias en la cantidad y la calidad del aporte de C de cada uno, según el orden en que se hubieran presentado en la Serie correspondiente (Domínguez *et al.*, 2009). Asimismo, las condiciones particulares de cada año pueden haber influenciado diferencialmente las dinámicas de descomposición de los residuos y de su transformación en MO, según cuál haya sido el momento de su retorno al suelo (Studdert & Echeverría, 2000).

El efecto principal del SL ( $3,96 \pm 0,25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para LC vs.  $3,86 \pm 0,29 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para SD) y la interacción SL \* Serie sobre los aportes de C fueron no significativos, pero sí hubo efecto principal significativo de la Serie. En la Tabla 2 se presentan los promedios de aporte anual de C de cada Serie. Las tres Series con mayor frecuencia de maíz ( $M_1M_2T$ ,  $M_2TM_1$ ,  $TM_1M_2$ ) tuvieron mayor aporte de C (en promedio, aproximadamente un 100% mayor, Tabla 2) que las tres con mayor frecuencia de soja ( $S_1S_2T$ ,  $S_2TS_1$ ,  $TS_1S_2$ ), mientras que las tres de la secuencia MST (MST, STM, TMS) presentaron, en general, valores intermedios (en promedio, aproximadamente un 52% mayor que las series con mayor frecuencia de soja en promedio, Tabla 2). En la Figura 4 se presenta la relación entre los contenidos

Tabla 2. Promedio anual de aporte de carbono (C) por los residuos de los cultivos ( $\pm$  error estándar de la media) a la profundidad de 0-20 cm, para cada una de las Series.  $M_1$ ,  $M_2$  y M: maíz,  $S_1$ ,  $S_2$ , y S: soja, T: trigo. Letras iguales indican diferencias no significativas ( $P > 0,05$ ) entre Series. Table 2. Mean annual carbon (C) input through crop residues ( $\pm$  standard error of the mean) at 0-20 cm depth for each Series.  $M_1$ ,  $M_2$  and M: maize,  $S_1$ ,  $S_2$ , and S: soybeans, T: wheat. Equal letters indicate no significant differences ( $P > 0.05$ ) among Series.

Serie	Aporte de C	
	Por serie	Por secuencia
	Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> .....	
$M_1M_2T$	4,93 $\pm$ 0,31 ab	
$M_2TM_1$	5,38 $\pm$ 0,18 a	5,28
$TM_1M_2$	5,52 $\pm$ 0,14 a	
MST	3,82 $\pm$ 0,26 c	
STM	4,30 $\pm$ 0,13 b	3,97
TMS	3,80 $\pm$ 0,15 c	
$S_1S_2T$	2,32 $\pm$ 0,08 e	
$S_2TS_1$	2,65 $\pm$ 0,05 de	2,62
$TS_1S_2$	2,88 $\pm$ 0,01 d	

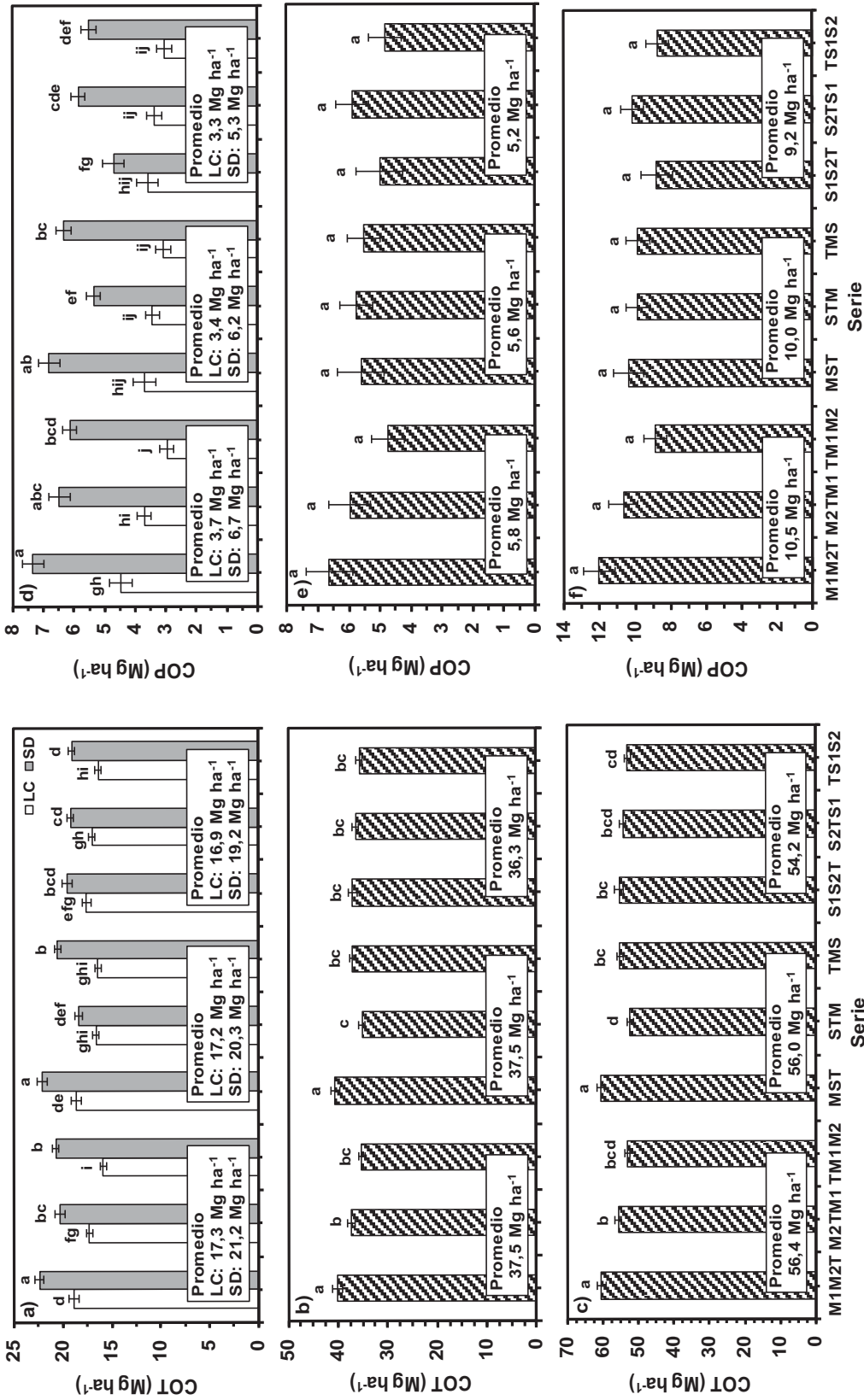


Figura 3. Contenidos de carbono orgánico total (COT) (a, b, c) y carbono orgánico particulado (COP) (d, e, f) a tres profundidades (0-5 cm (a, d), 5-20 cm (b, e) y 0-20 cm (c, f)) bajo diferentes combinaciones de cultivos (Serie) y sistemas de labranza. LC: labranza convencional; SD: siembra directa; M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>: maíz; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>: soja; T: trigo. Las barras verticales en cada columna indican el error estándar de la media. Letras iguales indican diferencias no significativas ( $P > 0,05$ ) entre Sistema de labranza \* Serie (a y d) o Series (b, c, d y f).  
 Figure 3. Soil total (COT) (a, b, c) and particulate (COP) (d, e, f) organic carbon at three soil depths (0-5 cm (a, d), 5-20 cm (b, e) and 0-20 cm (c, f)) under different crop combinations (Serie) and tillage systems. LC: conventional tillage; SD: no-tillage; M<sub>1</sub> and M<sub>2</sub>: maize; S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>: soybeans; T: wheat. Vertical bars in each column indicate standard errors of the mean. Equal letters indicate no significant differences ( $P > 0,05$ ) among Tillage system \* Serie (a and d) or Series (b, c, d, and f).



promedio de COT (Fig 4a) y COP (Fig 4c) a 0-20 cm y el aporte promedio anual de C por cada Serie. Además, se muestra la relación entre la disminución (diferencia entre el inicio del ensayo (año 2005) y el final del período de análisis (año 2011) de los contenidos de COT (Fig 4b) y de COP (Fig 4d) a 0-20 cm y el aporte promedio anual de C por cada Serie. No hubo relación significativa entre los contenidos promedio de COT y COP en la capa arable con el nivel de aporte anual de C por los residuos de cada Serie. Si bien, en la Figura 4a y 4c puede verse una leve tendencia a contenidos promedio mayores cuanto mayor fuera el aporte, el incremento de la cantidad de C ingresado al suelo no satisfizo plenamente el efecto esperado respecto al nivel general de MO. Aspectos de calidad del material carbonado retornado al suelo podrían haber provocado diferencias en la relación entre la cantidad de C aportado y su transformación en MO.

La FN puede incidir sobre la variación de CO del suelo a través de la magnitud del incremento del C aportado por los residuos. No obstante, el agregado de N de manera continuada y con dosis elevadas podría producir una aceleración de la tasa de mineralización del CO del suelo por los microorganismos, al disminuir la relación C/N del sistema y/o de los residuos devueltos al suelo (Khan *et al.*, 2007; Casado-Murillo & Abril, 2013; Melchiori *et al.*, 2014). El mejoramiento de la disponibilidad de N bajo condiciones de abundancia de C y limitantes en N, llevaría al incremento extraordinario de la actividad microbiana y, con ello, a una extra-mineralización del CO del suelo más elevada. Se produciría así un “*efecto priming*” de mayor magnitud sobre el CO del suelo, es decir, un fuerte cambio de éste en un corto plazo relacionado con el agregado de N mineral a través de fertilizantes y su efecto sobre la relación C/N del ambiente edáfico (Kuz'yakov *et al.*, 2000).

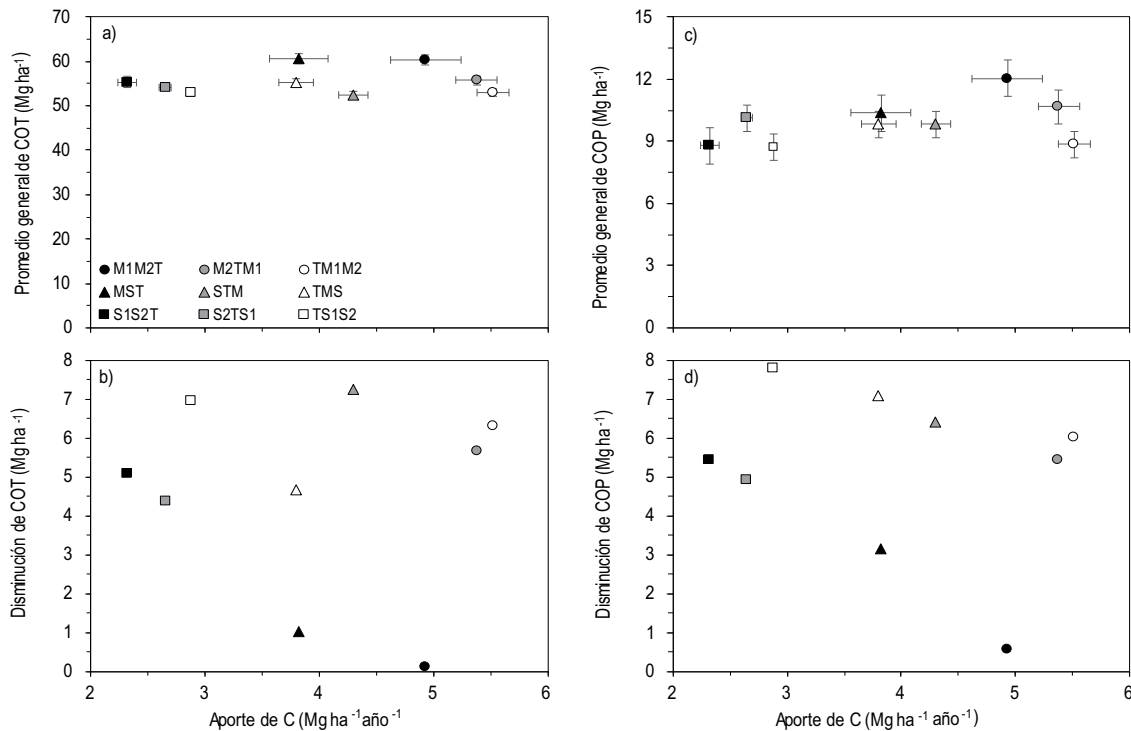


Figura 4. Promedio general de contenidos de carbono (C) orgánico total (COT) (a) y particulado (COP) (c) del suelo y disminución de COT (b) y de COP (d) (diferencia entre inicio y fin del ensayo) a 0-20 cm en función del aporte anual promedio de C por los residuos de diferentes combinaciones de cultivos (Series). M, M1 y M2: maíz; S, S1 y S2: soja; T: trigo. Las barras verticales en cada punto de a) y c) indican error estándar de la media de contenidos de COT y COP, respectivamente, y las horizontales indican error estándar de la media de aporte de C.

Figure 4. Overall soil total (COT) (a) and particulate (COP) (c) organic carbon (C) content average and COT (b) and COP (d) (difference between the beginning and the end of the experiment) decrease at 0-20 cm as a function of annual mean C input through different crop combinations (Series). M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M: maize, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, y S: soybeans, T: wheat. Vertical bars in each dot of a) and c) indicate standard error of the mean of COT and COP contents, respectively, and the horizontal bars indicate standard error of the mean of C input.

Las tres Series con mayor proporción de maíz ( $M_1M_2T, M_2TM_1, TM_1M_2$ ) fueron las que tuvieron una mayor frecuencia de FN con elevada dosis (todos los años), las tres de la secuencia MST (MST, STM, TMS) fueron fertilizadas 4 de los 6 años considerados, y las tres con mayor proporción de soja ( $S_1S_2T, S_2TS_1, TS_1S_2$ ) lo fueron sólo 2 de los 6 años. Se esperaba que la secuencia MMT provocara mayores contenidos de COT y COP, dado que es la que aporta una mayor cantidad de residuos (Tabla 2) y con una relación C/N alta. No obstante, la mayor frecuencia de FN en esta secuencia y su posible efecto sobre la tasa de mineralización del CO, puede haber sido la causa por la cual no se manifestó el efecto esperado, debido, posiblemente, al efecto de este fenómeno sobre el balance entre ingresos y egresos de C al suelo. Sin embargo, las disminuciones promedio de COT (4,02, 4,29 y 5,46  $Mg\ ha^{-1}$  para las secuencias MMT, MST y SST, respectivamente, Fig 4b) y de COP (4,00, 5,53 y 6,04  $Mg\ ha^{-1}$  para las secuencias MMT, MST y SST, respectivamente, Fig 4d) en la capa de 0-20 cm, parecerían mostrar una relación positiva con el nivel de aporte de C de cada secuencia (Tabla 2). Sin embargo, las regresiones lineales de las disminuciones de COT y de COP vs. el promedio anual de aporte de C por Serie, fueron todas no significativas. Esto fue posiblemente debido a las grandes diferencias observadas entre series dentro de cada Secuencia para ambas variables (Fig 4b y d). Los contenidos de COT y de COP en 2011 (fin del ensayo) fueron determinados luego de distintos antecesores inmediatos entre las Series, lo que podría haber generado diferencias asociadas con la dinámica de descomposición de residuos y su transformación en MO relacionadas con sus características.

### Antecesor inmediato y CO del suelo

En la Tabla 3 se muestran los resultados del análisis de varianza de los aportes de C del cultivo antecesor inmediato de 0-20 cm año por año del ensayo. En general, no hubo interacción significativa SL \* Serie ni efecto principal significativo del SL. No obstante, los aportes de C por los cultivos tendieron a ser, en general, menores bajo SD que bajo LC, debido a menores rendimientos (datos no mostrados). Sólo hubo efecto principal significativo de la Serie en casi todos los años. De acuerdo con lo esperado, en términos generales, el maíz como antecesor inmediato hizo un significativamente mayor aporte de C que el trigo y la soja, siendo la diferencia entre éstos dependiente del año (Tabla 3).

Dadas las diferencias observadas en aportes de C entre los distintos antecesores y secuencias de cultivos, sería de

esperar que éstas hubieran influenciado los contenidos de COP en la capa arable (0-20 cm). En el análisis del contenido de COP por año (Tabla 4), no hubo efecto significativo de la interacción SL \* Serie ni, en general, efecto principal significativo del SL ni de la Serie (sólo fue significativo el efecto de SL en 2008 y el de Serie en 2011). Hubo una leve tendencia a mayores contenidos de COP bajo SD respecto a LC (significativo sólo en 2008, datos no mostrados). Asimismo, no hubo tendencias claras en los contenidos de COP en relación al cultivo antecesor inmediato ni a la Serie. No hubo relación significativa entre los contenidos de COP a 0-20 cm con los aportes de C por el antecesor inmediato ni en general ni en ninguno de los años. A pesar de las diferencias observadas en los aportes de C y de las ya conocidas diferentes composiciones químicas de los residuos, no se encontraron diferencias significativas en los contenidos de COP salvo en 2011. En este año el efecto significativo entre antecesores pareció estar más relacionado con la Secuencia de cultivos que con el antecesor inmediato (comparaciones entre los mismos cultivos antecesores en distintas Secuencias de cultivos). Esto indica que en las condiciones en las que se realizó este ensayo, la cantidad y la calidad de los residuos de los cultivos antecesores inmediatos no tuvieron influencia directa sobre el contenido de COP.

Los residuos de los cultivos difieren en cantidad y composición. La tasa de descomposición del material vegetal disminuye con el incremento de la relación C/N (Kumar & Goh, 2000) y esto podría afectar los contenidos de fracciones lábiles de la MO en el corto plazo (Wander & Nissen, 2004). Los cultivos de maíz y trigo aportan una gran cantidad de residuos con alta relación C/N (> 60), mientras que el cultivo de soja aporta una menor cantidad de residuos con una relación C/N baja (< 30) (Studdert & Echeverría, 2000). Por tanto, los residuos de maíz y trigo presentan una menor tasa de descomposición que los residuos de soja cuando son devueltos al suelo. Asimismo, cuanto más elevado sea el contenido de carbohidratos solubles y/o más baja la relación C/N de los materiales devueltos, debería esperarse un "efecto priming" más intenso (Kuzyakov *et al.*, 2000). Por otro lado, el mejoramiento de la disponibilidad de N (por ejemplo, por fertilización) bajo condiciones en que la cantidad de C disponible para ser descompuesto no sea limitante, produciría un efecto similar en el suelo (Kuzyakov *et al.*, 2000) y, además, la reducción de la relación C/N de los residuos de los cultivos que fueron fertilizados (Melchiori *et al.*, 2014). Posiblemente, el efecto de la FN aplicada a los cultivos de maíz y trigo pueda ha-

Tabla 3. Resultados del análisis de varianza de los aportes de carbono (C) de los cultivos antecesores inmediatos (Ant.) a la profundidad de 0-20 cm y sus promedios año a año del ensayo. NS: no significativo ( $P>0,05$ ); SL: sistema de labranza; M, M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub>: maíz; S, S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub>: soja; T: trigo. Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media. Letras iguales junto a los aportes de C dentro de cada año indican diferencias no significativas ( $P>0,05$ ). Las celdas grisadas indican interacción significativa ( $P>0,05$ ) SL \* Serie.

Table 3. Results of the analysis of variance of carbon (C) input at 0-20 cm through preceding crop (Ant.) residues and their means year by year of the experiment. NS: not significant ( $P>0.05$ ); SL: tillage system; M, M<sub>1</sub> and M<sub>2</sub>: maize; S, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>: soybeans; T: wheat. Values between brackets indicate standard error of the mean. Equal letters next to C inputs within each year indicate no significant differences ( $P>0.05$ ). Grayed cells indicate significant ( $P>0.05$ ) SL \* Series interaction.

Análisis de varianza													
Fuente de variación	Año												
	2006		2007		2008		2009		2010		2011		
	Valor P												
SL	<0,01		<0,01		NS		NS		NS		NS		
Serie	<0,01		<0,01		<0,01		<0,01		NS		<0,01		
SL * Serie	NS		<0,01		NS		NS		NS		NS		
Aporte de C por series de cultivos													
Serie	Año												
	2006		2007		2008		2009		2010		2011		
	Ant.	Aporte	Ant.	Aporte	Ant.	Aporte	Ant.	Aporte	Ant.	Aporte	Ant.	Aporte	
	Mg C ha <sup>-1</sup>												
M <sub>1</sub> M <sub>2</sub> T	M <sub>1</sub>	7,76 a (0,27)	M <sub>2</sub>	4,85 a (0,24)	T	2,36 bcd (0,36)	M <sub>1</sub>	2,91 ab (0,18)	M <sub>2</sub>	6,20 a (-)	T	3,10 bc (0,32)	
M <sub>2</sub> TM <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	7,45 a (0,27)	T	3,19 b (0,24)	M <sub>1</sub>	8,16 a (0,36)	M <sub>2</sub>	3,23 a (0,18)	T	3,45 d (-)	M <sub>1</sub>	6,83 a (0,32)	
TM <sub>1</sub> M <sub>2</sub>	T	2,79 b (0,27)	M <sub>1</sub>	5,15 a (0,24)	M <sub>2</sub>	9,07 a (0,36)	T	3,01 a (0,18)	M <sub>1</sub>	5,75 ab (2,54)	M <sub>2</sub>	7,35 a (0,32)	
MST	M	7,71 a (0,27)	S	2,55 c (0,24)	T	2,23 cd (0,36)	M	2,67 b (0,18)	S	4,20 b (-)	T	3,54 b (0,32)	
STM	S	2,09 bc (0,27)	T	3,42 b (0,24)	M	8,29 a (0,36)	S	0,79 c (0,18)	T	3,67 c (0,67)	M	7,57 a (0,32)	
TMS	T	2,86 b (0,27)	M	4,73 a (0,24)	S	3,19 bc (0,36)	T	3,13 a (0,18)	M	5,77 ab (1,57)	S	3,14 bc (0,32)	
S <sub>1</sub> S <sub>2</sub> T	S <sub>1</sub>	2,10 bc (0,27)	S <sub>2</sub>	2,30 c (0,24)	T	1,95 d (0,36)	S <sub>1</sub>	0,71 c (0,18)	S <sub>2</sub>	3,52 cd (1,46)	T	3,40 b (0,32)	
S <sub>2</sub> TS <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	1,68 c (0,27)	T	3,58 b (0,24)	S <sub>1</sub>	2,90 bcd (0,36)	S <sub>2</sub>	0,95 c (0,18)	T	3,61 c (0,81)	S <sub>1</sub>	3,16 bc (0,32)	
TS <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	T	2,76 bc (0,27)	S <sub>1</sub>	2,42 c (0,24)	S <sub>2</sub>	3,35 b (0,36)	T	3,17 a (0,18)	S <sub>1</sub>	3,23 d (1,3)	S <sub>2</sub>	2,38 c (0,32)	

Tabla 4. Resultados del análisis de varianza de los contenidos de carbono (C) orgánico particulado (COP) a la profundidad de 0-20 cm y sus promedios año a año del ensayo. Ant.: cultivo antecesor inmediato; NS: no significativo ( $P>0,05$ ); SL: sistema de labranza; M, M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub>: maíz; S, S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub>: soja; T: trigo. Los valores entre paréntesis indican error estándar de la media. Letras iguales junto a los contenidos de COP dentro de cada año indican diferencias no significativas ( $P>0,05$ ).

Table 4. Results of the analyses of variance of particulate (COP) organic carbon (C) contents at 0-20 cm and their means year by year of the experiment. Ant.: preceding crop; NS: not significant ( $P>0.05$ ); SL: tillage system; M, M<sub>1</sub> and M<sub>2</sub>: maize; S, S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>: soybeans; T: wheat. Values between brackets indicate standard error of the mean. Equal letters next to COP contents within each year indicate not significant differences ( $P>0.05$ ).

Análisis de varianza												
Fuente de variación	Año											
	2006		2007		2008		2009		2010		2011	
Valor P												
SL	NS		NS		<0,01		NS		NS		NS	
Serie	NS		NS		NS		NS		NS		NS	
SL * Serie	NS		NS		NS		NS		NS		NS	
COP												
Serie	Año											
	2006		2007		2008		2009		2010		2011	
Mg C ha <sup>-1</sup>												
M <sub>1</sub> M <sub>2</sub> T	M <sub>1</sub>	10,49 a (1,36)	M <sub>2</sub>	12,12 a (1,66)	T	13,52 a (1,92)	M <sub>1</sub>	12,60 a (2,07)	M <sub>2</sub>	11,32 a (2,67)	T	12,05 a (1,96)
M <sub>2</sub> TM <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	9,25 a (1,18)	T	10,96 a (1,46)	M <sub>1</sub>	9,36 a (1,80)	M <sub>2</sub>	11,19 a (1,88)	T	15,23 a (2,40)	M <sub>1</sub>	8,37 abc (1,85)
TM <sub>1</sub> M <sub>2</sub>	T	7,59 a (0,96)	M <sub>1</sub>	9,57 a (1,28)	M <sub>2</sub>	9,11 a (1,68)	T	9,15 a (1,54)	M <sub>1</sub>	11,09 a (1,96)	M <sub>2</sub>	6,58 bcd (1,71)
MST	M	9,38 a (1,36)	S	11,01 a (1,66)	T	10,03 a (1,92)	M	11,32 a (2,07)	S	10,86 a (2,77)	T	9,48 ab (1,96)
STM	S	8,92 a (0,96)	T	12,14 a (1,28)	M	8,14 a (1,64)	S	11,96 a (1,54)	T	11,59 a (1,96)	M	6,21 bcd (1,71)
TMS	T	10,12 a (0,96)	M	10,40 a (1,28)	S	10,26 a (1,64)	T	9,80 a (1,54)	M	12,88 a (1,96)	S	5,52 cd (1,71)
S <sub>1</sub> S <sub>2</sub> T	S <sub>1</sub>	6,62 a (1,36)	S <sub>2</sub>	13,77 a (1,66)	T	7,36 a (1,92)	S <sub>1</sub>	8,83 a (2,07)	S <sub>2</sub>	8,83 a (2,77)	T	7,18 bcd (1,96)
S <sub>2</sub> TS <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	8,74 a (0,96)	T	12,14 a (1,28)	S <sub>1</sub>	7,77 a (1,64)	S <sub>2</sub>	12,51 a (1,54)	T	11,96 a (1,96)	S <sub>1</sub>	7,68 bcd (1,71)
TS <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	T	8,74 a (0,96)	S <sub>1</sub>	9,98 a (1,28)	S <sub>2</sub>	8,46 a (1,64)	T	9,11 a (1,54)	S <sub>1</sub>	11,22 a (1,96)	S <sub>2</sub>	4,83 d (1,71)

ber influenciado la calidad de los residuos a través de una disminución de su relación C/N y la del ambiente edáfico, tal como fue mencionado anteriormente. La FN podría estar así interviniendo en la dinámica del CO del suelo, enmascarando la expresión del efecto puro de los cultivos antecesores. Estos resultados respecto a la relación del conte-

nido de COP con los aportes de C de las diferentes Series y de los antecesores inmediatos coinciden con los informados para NAN por García *et al.* (2016). Asimismo, estos autores también mostraron cambios en el NAN coincidentes con las variaciones de COP y COT mostradas en la Figura 2.

### Relación entre NAN y CO del suelo

Para este mismo ensayo, García *et al.* (2016) reportaron una disminución del NAN con los años de agricultura en las tres profundidades analizadas. Asimismo, el análisis estadístico realizado por estos autores para NAN arrojó resultados similares a los mostrados para COT y COP en la Tabla 1, aunque sin diferencias significativas en NAN entre Series a ninguna de las profundidades. Se reafirma así lo informado por otros autores para suelos similares a los de este ensayo (Studdert *et al.*, 2010; Domínguez *et al.*, 2016) y para otros suelos de la provincia de Buenos Aires (Reussi Calvo *et al.*, 2014) respecto a la relación de NAN con COT y COP.

Regresiones lineales simples mostraron que el NAN varió de manera directamente proporcional y altamente significativa con los niveles de COT y de COP, pero con  $R^2$  bajos (Fig 5). Coincidiendo con otros autores (Domínguez *et al.*, 2016), las relaciones entre NAN y COT, y NAN y COP mostraron un mejor ajuste en la capa de 0-5 cm (Fig 5a y d, respectivamente). Por otro lado, a esta profundidad hubo una diferencia en las relaciones de NAN con COT entre LC (pendiente = 11,4 mg NAN kg<sup>-1</sup>/Mg COT ha<sup>-1</sup>,  $R^2 = 0,52$ ,  $P < 0,01$ ) y SD (pendiente = 6,66 mg NAN kg<sup>-1</sup>/Mg COT ha<sup>-1</sup>,  $R^2 = 0,24$ ,  $P < 0,01$ ) y de NAN con COP (pendiente = 12,5 mg NAN kg<sup>-1</sup>/Mg COP ha<sup>-1</sup>,  $R^2 = 0,55$ ,  $P < 0,01$  bajo LC, y pendiente = 8,15 mg NAN kg<sup>-1</sup>/Mg COP ha<sup>-1</sup>,  $R^2 = 0,26$ ,

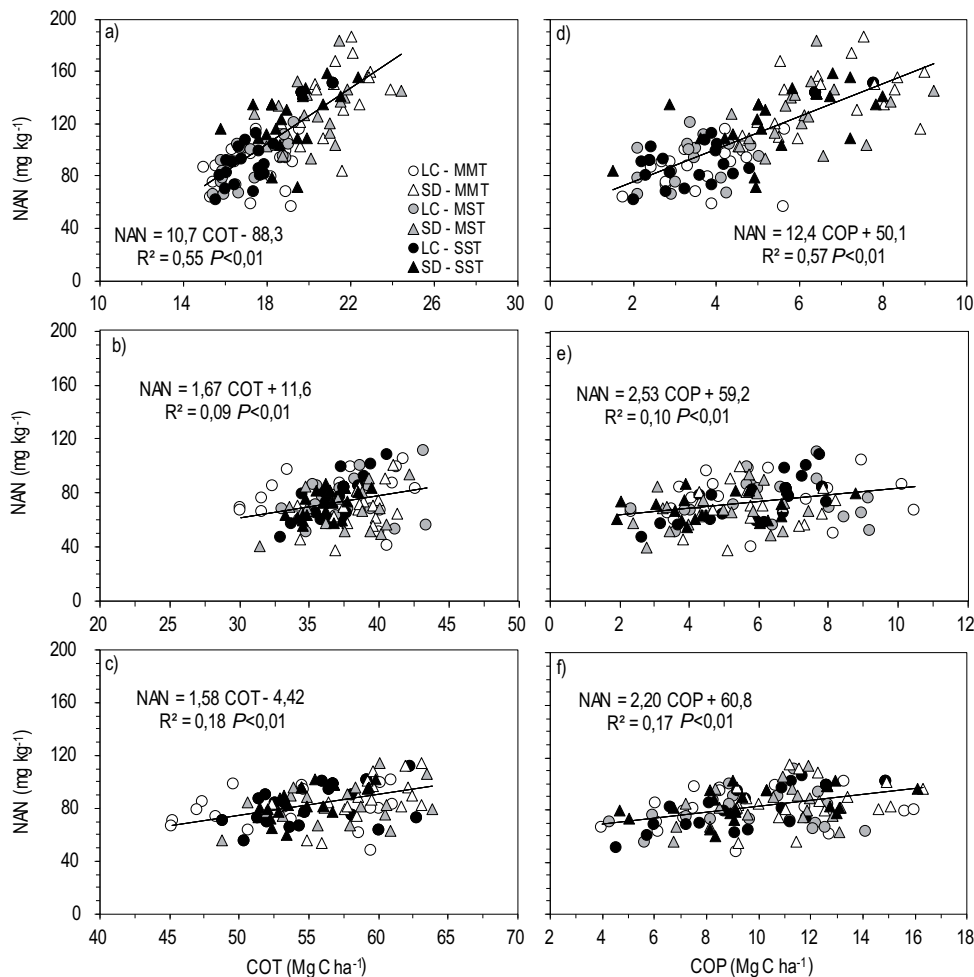


Figura 5. Relaciones entre nitrógeno incubado anaeróbico (NAN) y carbono (C) orgánico total (COT) (a, b, c) y NAN y C orgánico particulado (COP) (d, e, f) a las tres profundidades analizadas, 0-5 (a, d), 5-20 (b, e) y 0-20 (c, f) cm, respectivamente. Cada punto representa el promedio de dos repeticiones. LC: labranza convencional; SD: siembra directa; M: maíz; S: soja; T: trigo.

Figure 5. Relationships between anaerobic nitrogen (NAN) and total organic carbon (COT, a, b, c) and NAN and particulate organic carbon (COP, d, e, f) at three depths: 0-5 (a, d), 5-20 (b, e) and 0-20 (c, f) cm, respectively. Each dot represents the average of two replications. LC: conventional tillage; SD: no-tillage; M: maize; S: soybeans; T: wheat; C: carbon.

$P < 0,01$  bajo SD). No obstante, estas diferencias entre SL no fueron notorias a las profundidades 5-20 y 0-20 cm (datos no mostrados). Para suelos similares a los estudiados en este trabajo, otros autores (Studdert *et al.*, 2015; Domínguez *et al.*, 2016) han reportado relaciones más estrechas entre NAN y COT y, especialmente, entre NAN y COP y sin distinción entre SL. Cabe aclarar que todos los autores mencionados hicieron sus estudios bajo una única combinación de cultivos. En la Figura 5 puede verse que ninguna de las tres Secuencias de cultivos (MMT, MST y SST) provocó una distribución diferencial de los pares de puntos. Sin embargo, a pesar de que se ha demostrado que no produjeron efectos significativos sobre el NAN (García *et al.*, 2016) ni sobre COP (Tabla 4), no puede descartarse un efecto diferencial de los antecesores inmediatos (maíz, soja o trigo) al momento de muestreo de suelo cada año. Las diferentes características de cada residuo y su efecto sobre la descomposición y transformación en relación con la forma de disponerlos (*i.e.* en superficie o enterrados), pueden haber estado asociados a la dispersión que dio origen a los bajos  $R^2$  y a las diferencias entre SL en superficie (0-5 cm).

## CONCLUSIONES

La disminución en el tiempo de COT y de COP en la capa arable no fue diferencial entre Series ni entre SL, aunque sí lo fue en sus 5 cm superficiales. Por lo tanto, para las condiciones en las que se desarrolló este trabajo, no se reunieron evidencias suficientes para rechazar la primera hipótesis en lo que respecta al efecto diferencial de los SL, aunque si para rechazarla en lo concerniente a la relación entre los aportes de C por las combinaciones de cultivos y la dinámica de COT y COP. Si bien las Secuencias de cultivos evaluadas y las Series comprendidas en cada una, mostraron diferentes aportes promedio de C al suelo, la historia de FN puede haber enmascarado el efecto esperado de la relación aportes de C a través de los residuos y la dinámica de COT y COP.

Las evidencias reunidas respecto a que el efecto del cultivo antecesor inmediato al muestreo haya afectado el contenido de COP fueron insuficientes, lo que lleva a rechazar la segunda hipótesis planteada. Por otro lado, si bien el comportamiento del COT y el COP en el tiempo fue, en términos generales, coincidente con el de NAN, las relaciones obtenidas presentaron bajo nivel de ajuste. Esto indica que la capacidad del suelo de proveer N se relacionó pobremente con las disminuciones de COT y de COP observadas,

aunque sin distinción clara entre Series ni SL. Por ello, las evidencias reunidas fueron suficientes para rechazar la tercera hipótesis planteada. Posiblemente, las distintas cantidades de C aportadas a través de los residuos de cada uno de los cultivos de las distintas secuencias (MMT, MST y SST), la calidad de los residuos de los antecesores inmediatos (maíz, soja o trigo) al momento de los muestreos, y las diferencias en los niveles de FN, pudieron haber influenciado de alguna manera los contenidos de COT y COP y el NAN. Estos resultados indican que, para la evaluación de la relación de la capacidad de mineralización de N del suelo con el contenido de CO en el suelo, deberían tenerse en cuenta otras variables (*i.e.* FN, cantidad, posición y calidad de los residuos) que inciden sobre la dinámica de las fracciones involucradas.

## AGRADECIMIENTOS

La información presentada en este trabajo forma parte de la Tesis de Maestría (Carrera de Maestría en Producción Vegetal) de la segunda autora y de la Tesis de Grado (Carrera de Ingeniería Agronómica) de la tercera autora en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (a través del proyecto PICT 2012-1092), la Universidad Nacional de Mar del Plata (a través de los proyectos AGR481/15 y AGR518/16) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (a través del proyecto específico PNCYO 1127032).

## BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, MA; MG Monterubbianesi; GA Studdert & SJ Maurette. 2014. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Ciencia del Suelo* 32: 171-176.
- Buyanovsky, GA & GH Wagner. 1986. Post-harvest residue input to cropland. *Plant Soil* 93: 57-65.
- Buyanovsky, GA & GH Wagner. 1997. Crop residue input to soil organic matter in the Sanborn field. In: Paul, EA (ed.) *Soil organic matter in temperate ecosystems: Long-term experiments in North America*. Pp. 73-83. CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1992. Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Casado-Murillo, N & A Abril. 2013. Decomposition and carbon dynamics of crop residue mixtures in a semiarid long term no-till system: effects on soil organic carbon. *Open Agric. J.* 7: 11-21.
- Diovisalvi, NV; GA Studdert; NI Reussi-Calvo; GF Domínguez & A Berardo. 2014. Estimating soil particulate organic carbon through total soil organic carbon content. *Ciencia del Suelo* 32: 85-94.
- Domínguez, GF & GA Studdert. 2006. Balance de carbono en un Molisol bajo labranza convencional. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, Argentina, septiembre 2006. En CD.

- Domínguez, GF; NV Diovisalvi; GA Studdert & MG Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern pampas. *Soil Tillage Res.* 102: 93-100.
- Domínguez, GF; GV García; GA Studdert; MA Agostini; SN Tourn & MN Domingo. 2016. Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as soil health indicator? *Spanish J. Soil Sci.* 6: 82-97.
- Echeverría, HE; NF San Martín & R Bergonzi. 2000. Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. *Ciencia del Suelo* 18: 9-16.
- García, GV; GA Studdert; MN Domingo & GF Domínguez. 2016. Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis: relación con sistemas de cultivo de agricultura continua. *Ciencia del Suelo* 34: 127-138.
- Gregorich, EG; MH Beare; UF McKim & JO Skjemstad. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 975-985.
- INTA. 1979. Carta de suelos de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina. 76 p.
- Keeney, DR. 1982. Nitrogen-availability indexes. In: Page, AL (ed) *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties.* Pp. 711-733. Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, EEUU.
- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page, AL (ed) *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties.* Pp. 643-698. Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, EEUU.
- Khan, SA; RL Mulvaney; TR Ellsworth & CW Boast. 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 36: 1821-1832.
- Kumar, K & M Goh. 2000. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield and nitrogen recovery. *Adv. Agron.* 68: 197-319.
- Kuzyakov, Y; JK Friedel & K Stahr. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1485-1498.
- Lal, R. 2010. Enhancing eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. *Crop Sci.* 50(Supplement): S-120-S-131.
- Lal, R. 2014. Societal value of soil carbon, *J. Soil Water Conserv.* 69:186A-192A.
- Littell, RC; GA Milliken; WW Stroup; DR Wolfinger & O Schabenberger. 2006. SAS® for mixed models, Second Edition, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Manuel-Navarrete, D; GC Gallopín; M Blanco; M Díaz-Zorita; DO Ferraro; H Herzer; P Latorra; MR Murmis; G Podestá; J Rabinovich; EH Satorre; F Torres & EF Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ. Dev. Sustain.* 11: 621-638.
- Mazzilli, SR; AR Kemanian; OR Ernst; RB Jackson & G Piñeiro. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biol. Biochem.* 75 :273-281.
- Melchiori, RJM; LE Novelli; VC Gregorutti & OP Caviglia. 2014. Stover quality and soil organic carbon in long-term nitrogen-fertilized maize. *Agron. J.* 106: 1709-1716.
- Powlson, DS; CM Stirling; ML Jat; BG Gerard; CA Palm; PA Sanchez & KG Cassman. 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Ch.* 4: 678-683.
- Quiroga, RA & GA Studdert. 2014. Manejo del suelo e intensificación agrícola: agua y materia orgánica, dos aspectos clave. En: Echeverría, HE & FO García (eds). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos.* 2da Edición. Pp. 73-100. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Reussi Calvo, NI; GA Studdert; MB Calandroni; NV Diovisalvi; FN Cabria & A Berardo. 2014. Nitrógeno incubado en anaerobiosis y carbono orgánico en suelos agrícolas de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 32: 189-196.
- Ritchie, SW & JJ Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Special Report 48. Ames, Iowa, EEUU. 21 p.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & HP Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de la Regiones Pampeana y Extrapampeana Argentina. *Informaciones Agronómicas* 2: 6-12.
- Sánchez, SR; GA Studdert & HE Echeverría. 1996. Descomposición de residuos de cosecha en un Argiudol típico. *Ciencia del Suelo* 14: 63-68.
- SAS Institute. 2004. SAS Online Doc, Versión 9. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, EEUU. <www.sas.com> [Consultado 1 de marzo de 2004].
- Schlichting, E; HP Blume & K Stahr. 1995. *Bodenkundliches Praktikum.* Paul Parey. Hamburg, Berlin. 209 p.
- Six, J; ET Elliott & YK Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32: 2099-2103.
- Six, J; H Bossuyt; S Degryze & K Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79: 7-31.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. USDA, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, EEUU. 372 p.
- Studdert, GA & H Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
- Studdert, GA; GF Domínguez; MA Agostini & MG Monterubbianesi. 2010. Cropping systems to manage Southeastern Pampas' Mollisol health. I. organic C and mineralizable N. In Liu, X; C Song; RM Cruse & T Huffman (eds) *New advances in research and management of world Mollisols.* Proceedings «International symposium on soil quality and management of world Mollisols», Harbin, Heilongjiang, R.P. China, julio de 2010. Pp. 199-200.
- Studdert, GA; GF Domínguez; MC Zagame & JC Carabaca. 2015. Variación estacional de carbono orgánico particulado y nitrógeno anaeróbico. *Ciencia del Suelo* 33: 65-78.
- Triplett, GB JR & WA Dick. 2008. No-tillage crop production: a revolution in agriculture. *Agron. J.* 100(Supplement): S-153-S-165.
- Wander, M & T Nissen. 2004. Value of soil organic carbon in agricultural lands. Mitig. Adapt. *Strateg. Global Ch.* 9: 417-431.
- Zadoks, JC; TT Chang & CF Konzak. 1974. A decimal code for growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.

