

MEJORA EN EL CARBONO DEL SUELO Y ESTABILIDAD DE AGREGADOS POR FERTILIZACIÓN Y CULTIVOS DE COBERTURA

CRISTIAN ROMÁN CAZORLA^{1*}; JOSÉ MANUEL CISNEROS²; INÉS SELVA MORENO²
& CARLOS MARTÍN GALARZA³

Recibido: 17-02-17

Recibido con revisiones: 08-06-17

Aceptado: 08-06-17

RESUMEN

Los niveles de carbono orgánico del suelo (COS) disminuyen con la alta frecuencia del cultivo de soja (*Glicine max* (L) Merr.) lo que puede afectar su fertilidad física. Los objetivos de este estudio fueron: i) determinar el efecto de la fertilización y cultivos de cobertura (CC) en los contenidos de COS y N orgánico del suelo (NOS) de diferentes fracciones por tamaño de partícula, la estabilidad de agregados (EA) y densidad aparente (Dap) y ii) identificar relaciones entre variables. En un experimento de larga duración iniciado en 1993 la EEA INTA Marcos Juárez con rotación trigo/soja-maíz-soja, se evaluó el efecto de la fertilización con tres niveles: sin fertilizante (SF), fertilización media (FM) y fertilización de reposición (FR). Además se incluyó un tratamiento con CC de avena (*Avena sativa* L.) con FM (FM+CC) y una pastura permanente (P) sin uso ganadero contigua al ensayo. Se determinaron los contenidos de COS, NOS, C y N particulado (COP y NOP), C y N asociado a la fracción mineral (COA y NOA) Dap, EA en humedecimiento lento (HL) y humedecimiento rápido (HR) en las profundidades 0-5, 5-10 y 10-18 cm. Los tratamientos FR y FM+CC incrementaron los contenidos de COS, NOS, COP y NOP en las profundidades 0-5 y 5-10 cm. La FR y FM+CC incrementaron la EA HL en 0-5 y 5-10 cm, mientras que la EA HR en 5-10 cm. La Dap no fue modificada por efecto de los tratamientos en ninguna profundidad evaluada. Con aportes de C de 3 Mg ha⁻¹ año los niveles de COS fueron de 33,4 Mg ha⁻¹. Se observaron correlaciones positivas y significativas entre EA HR con COP y de EA HL con COP < 53 µm. Se observó una relación lineal negativa entre COS y Dap (R²=0,91). La utilización de fertilización y CC pueden ser usadas para incrementar la productividad y/o sustentabilidad del suelo.

Palabras clave. Monocultivo de soja, carbono orgánico particulado, estabilidad de agregados.

SOIL CARBON AND AGGREGATE STABILITY IMPROVEMENT BY FERTILIZATION AND COVER CROPS

ABSTRACT

Soil organic carbon levels (SOC) decreased with soybean monoculture and can affect physical properties. The objectives of this study were: (i) to determine the effect of fertilization and cover crops (CC) on soil organic carbon and nitrogen (SOC and NOS), particulate organic carbon and nitrogen (POC and PON), soil organic carbon and nitrogen associated to mineral fraction (AOC and AON) and physical properties and (ii) to identify relationship between variables. This study was carried out in a long-term field experiment established in 1993 at Marcos Juárez. The effect of three fertilization levels was evaluated: no fertilizer (NF), mean fertilizer (MF) and replacement fertilizer (RF); cover crops (CC) with MF (MF + CC) and pasture (P). SOC, SON, POC and PON (2000-212, 212-53 and < 53 µm) contents at 0-5, 5-10 and 10-18 cm depth were determined with a LECO C analyzer. Also, bulk density (BD) and aggregate stability (AS) in two different humidity levels, fast wetting (FW) and slow wetting (SW), were determined. Treatment RF and MF + CC showed higher SOC and POC (2000-212 and 212-53 µm) contents at 0-5 and 5-10 cm depth. To maintain SOC levels at 33.4 Mg ha⁻¹ a C residue input of 3 Mg ha⁻¹ is needed. The RF and FM+CC modified AS at SW at 0-5 and 5-10 cm depth, whereas AS at FW was modified at 5-10 cm depth. The BD was not influenced by treatments. A negative relationship was observed between SOC and BD (R²=0.91). AE FW and POC were correlated and also a AE SW and POC < 53 µm correlation was observed. Fertilizer and CC incorporation could be used to increase soil sustainability or productivity.

Key words. Continuous soybean, particulate organic carbon, aggregate stability.

1. INTA EEA MARCOS JUÁREZ

2. Cátedra de uso y manejo de suelos, Universidad Nacional de Río Cuarto

3. Área de suelos y producción vegetal, EEA INTA Marcos Juárez

* Autor de contacto: cazorla.cristian@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El incremento de la superficie sembrada con soja en la Argentina es un fenómeno bien caracterizado por diferentes estudios (Santos, 2001; Ghida Daza, 2005) con una superficie sembrada en la campaña 2015-2016 de 20,5 millones de ha, siguiéndole en importancia el maíz (*Zea mays*) con 6,9 millones de ha y el trigo (*Triticum aestivum* L.) con 4,4 millones de ha (Ministerio de Agroindustria, 2016). La evolución de la superficie sembrada con soja en la región sudeste de la provincia de Córdoba sufrió un rápido incremento en los últimos 40 años, pasando de 5 mil ha en la campaña 1974-1975 a 570 mil ha en la campaña 2015-2016 (Ministerio de Agroindustria, 2016). Considerando el promedio de las campañas entre los años 2000-2016, en el departamento Marcos Juárez la superficie sembrada con soja ocupa un 68% de la superficie entre los cultivos de primera y segunda época de siembra, siendo el 56% perteneciente a soja de primera. De esta forma, una gran superficie del departamento presenta una alta participación del cultivo de soja en las rotaciones.

El monocultivo de soja afecta los niveles de materia orgánica del suelo (MOS) (Martelloto *et al.*, 2001; Cordone & Martinez, 2004), provoca balances negativos de N y P (Studdert & Echeverría, 2000; Flores & Sarandon, 2002), y una homogenización del paisaje agrícola que trae como consecuencia un aumento en los costos ambientales (Aizen *et al.*, 2009). Otro factor a tener en cuenta es la relación C:N del cultivo de soja (C:N = 44) por lo que se descompone rápidamente y su persistencia es menor en comparación a trigo (C:N = 97) o maíz (C:N = 87) (Andriulo *et al.*, 1999b). Los aportes de C al suelo provienen de C derivado de biomasa de plantas (Allmaras *et al.*, 2004) y se pueden estimar a través de los rendimientos de cultivos e índices de cosecha (Donald & Hamblin, 1976). Los rendimientos promedio de soja para el departamento Marcos Juárez (Córdoba) en el período 2000-2016 fueron de 3,4 Mg ha⁻¹, por lo tanto los niveles de cobertura con residuos y el aporte de C al suelo fueron escasos.

La MOS es un componente fundamental que controla numerosas propiedades que afectan la capacidad del suelo para producir alimentos, fibras y combustibles (Carter, 1996). La MOS tiene relación negativa con la susceptibilidad a la compactación (Quiroga *et al.*, 1998; Díaz-Zorita & Grosso 2000) con la densidad aparente (Dap) (Rawls *et al.*, 1983) y positiva con la estabilidad de agregados (EA) (Carter *et al.*, 1994; Quiroga *et al.*, 1996) y el diámetro medio de los agregados (Chenu *et al.*, 2000). La MOS puede

ser caracterizada por diferentes fracciones, con diferentes constituyentes de distinta estabilidad, desde muy lábiles a formas muy estables. Los contenidos de C y de N de las fracciones de la MOS obtenidas a través de separación física se denominan carbono orgánico particulado (COP) y nitrógeno orgánico particulado (NOP). En sistemas agrícolas estas fracciones son capaces de detectar cambios tempranos en la dinámica del C (Gregorich *et al.*, 2006) y están relacionadas a importantes propiedades como la disponibilidad de nutrientes (Quiroga *et al.*, 2005; Willson *et al.*, 2001) y estabilidad de agregados (Six *et al.*, 1998).

Algunas estrategias de manejo para incrementar los aportes de C al suelo son la fertilización, que a través de la mejora en los rendimientos genera un mayor volumen de residuos que retorna al suelo (Gregorich *et al.*, 1996; Miglierina *et al.*, 2000), incrementando los niveles de COS (Campbell & Zentner, 1993; Eiza, 2005), COP (Hu *et al.*, 1997; Sainju *et al.*, 2002; Quiroga *et al.*, 2005) y NOP (Fabrizzi *et al.*, 2003). Sin embargo, otros estudios en ensayos de larga duración reportaron que la fertilización con N no produjo cambios en las reservas de COS (Irizar *et al.*, 2010). El incremento en los contenidos de COS se obtienen con fertilizaciones de largo plazo y puede variar año a año dependiendo de la disponibilidad de agua en el suelo (Galantini & Rosell, 2006). Otra estrategia para incrementar los contenidos de COS es la utilización de cultivos de cobertura (CC). En general se reportan aumentos en el COS cuando se utilizan CC (Sainju *et al.*, 2002; Rimsky-Korsakov *et al.*, 2015).

El objetivo del presente estudio fue evaluar en un ensayo de larga duración con una secuencia agrícola trigo/soja - maíz - soja el efecto de la fertilización y los CC sobre los contenidos de COS y NOS, como así también en sus fracciones (COP y NOP) y en propiedades físicas como la EA y Dap.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio y diseño experimental

El clima de la zona presenta precipitaciones mediana anual (período 1910-2008) de 832 mm, con una mediana de 617 mm en el período estival (octubre-marzo). El suelo donde se realizó el ensayo pertenece a la serie Marcos Juárez, identificado como Argiudol típico, con capacidad de uso 1. Es un suelo oscuro, profundo y bien drenado de lomas casi planas, desarrollado sobre un sedimento loésico de textura franco limosa, de 95 cm de profundidad (INTA, 1978).

Diseño experimental

Para evaluar el efecto de la fertilización y de los CC sobre los sistemas agrícolas continuos, se trabajó sobre un ensayo iniciado en 1993 en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Marcos Juárez con una rotación Maíz-Trigo/Soja de segunda-Soja de primera en siembra directa. El diseño experimental del ensayo fue en parcelas completamente aleatorizadas de 9 x 50 metros con tres bloques. Los tratamientos evaluados fueron i) Sin fertilización (SF), ii) Fertilización media (FM), iii) Fertilización de reposición de nutrientes (FR). Y iv) FM más avena (*Avena sativa* L.) como cultivo de cobertura (FM + CC) que se siembra como antecesor de maíz y soja de primera (cuando la fase de la rotación es trigo/soja no se utiliza CC). Se utilizó fosfato mono amónico como fuente de P en todos los cultivos de la rotación, mientras que urea como fuente de N solo fueron aplicadas en trigo y maíz. El tratamiento FR consideró necesidades de nutrientes para rendimientos de maíz de 12 Mg ha⁻¹, de trigo de 6 Mg ha⁻¹ y de soja de 5 Mg ha⁻¹ por lo tanto se aplicaron dosis de 180, 160 y 12 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, mientras que en FM siempre fue la mitad de la dosis aplicada en FR, con dosis de 90, 80 y 6 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Al inicio del ensayo en el año 1993 los contenidos de COS fueron de 8,5 y 24,9 Mg ha⁻¹ en las profundidades 0-5 y 5-18 cm, respectivamente, mientras que el contenido de P Bray fue de 24 mg kg⁻¹ en la profundidad 0-20 cm. Los contenidos de arcilla, limo y arena del horizonte superficial (0-18 cm), fueron de 25, 68 y 7%, respectivamente.

Además se incluyó con fines comparativos una situación considerada de máxima alteración con monocultivo de soja (SC) de un ensayo iniciado en el año 1975, con 2 repeticiones y una de mínima alteración con una pastura (P) implantada en el año 1993 y que no tiene uso, ya que no se realizan cortes o pastoreos en la misma. La P estuvo compuesta por Agropiro (*Thinopyrum ponticum*), Festuca (*Lolium Arundinaceum* Scrb.) y algunas malezas perennes como cebollín (*Cyperus Rotundus* L.). La situación P se encuentra adyacente al ensayo y no tiene repeticiones, por lo tanto se realizó un muestreo en dos sectores de la misma y fue utilizada como referencia, no formó parte de los análisis estadísticos.

Toma de muestras y determinaciones

En el mes de Octubre del año 2006, en cada parcela se tomaron muestras compuestas de suelo constituidas por veinte piques con barreno de 2,5 cm de diámetro en las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm. Las muestras obtenidas se disgregaron a mano en húmedo y se pasaron por un tamiz de 2 mm de malla. Luego las muestras se secaron al aire y se almacenaron para su posterior fraccionamiento por tamaño de partículas. Se realizó un fraccionamiento físico de la MOS por tamaño de partículas según el método de Cambardella & Elliot (1992). La muestra fue dispersada con una solución de hexametáfosfato de sodio al 0,5% durante 3 horas en un agitador rotativo. Luego se colocó sobre un juego de tamices de 212 y

53 µm y se lavó con agua. El material remanente sobre cada tamiz se pasó a un recipiente y secó en estufa a 60 °C y se pesó. De esta forma se obtuvieron dos fracciones: COP 2000- 212 µm y COP 212- 53 µm. El material que pasó a través del tamiz de 53 µm correspondió al Carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA < 53 µm) y se recuperó en recipientes de 500 cm³. En los recipientes con la fracción COA se agregó cloruro de calcio 1 N para el floculado del material. Luego de un reposo de 24 hs, el material floculó y se descartó con pipeta el material sobrenadante y se secó en estufa a 60 °C. Por último el material se pesó y se almacenó para su posterior análisis.

En cada una de las fracciones obtenidas se determinó el contenido de C y de N por el método de combustión en seco en analizador de Carbono LECO (Merry & Spouncer, 1998). Mediante la suma de todas las fracciones se obtuvieron los contenidos de COS y NOS total. Los datos obtenidos en concentración fueron expresados en masa (Mg ha⁻¹) utilizando los valores de Dap. Para realizar una comparación entre tratamientos se utilizó el método de masas equivalentes de suelo (Ellert *et al.*, 2001) utilizando para tal fin los menores valores de Dap observados para cada profundidad.

Para la determinación de la Dap se tomaron muestras de suelo a través del método del doble cilindro (Black & Hartge, 1965) con un cilindro de 5,8 cm de diámetro en las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm. En estos cilindros se tomó una alícuota de suelo para determinar el contenido de humedad y obtener el peso seco de la muestra. El resto de las muestras se secó al aire y se fragmentó por caída libre desde una altura de 1,6 m, según lo propuesto por Díaz Zorita *et al.* (2004). Luego de la fragmentación, el material se desmenuzó a mano hasta pasar por completo por tamices de 4,76 y 3,36 mm de malla y se almacenó para el posterior análisis de EA.

La EA se midió a través del método de Le Bissonais (1996), que consiste en aplicar diferentes mecanismos de ruptura de agregados. Se tomó la muestra de agregados tamizados a mano (4,76 -3,36 mm) y fueron secadas a 40 °C por 4 horas. Se utilizaron 2 pre-tratamientos: i) humedecimiento rápido (HR) donde los agregados son sumergidos en agua destilada durante 10 minutos y ii) Humedecimiento lento (HL), donde los agregados son humedecidos por capilaridad sobre una goma espuma durante una hora. Luego de los pre-tratamientos, los agregados fueron sumergidos en alcohol, secados en estufa y se colocaron sobre un juego de seis tamices de 2000, 1000, 500, 250, 100 y 53 µm de malla para obtener el peso del diámetro medio. La EA de cada pre-tratamiento se calculó como el peso del diámetro medio de los agregados mediante la suma de la masa remanente sobre cada tamiz multiplicado por la apertura media de dos tamices adyacentes. Se obtuvo además un índice de estabilidad propuesto por Amezketa (1999), en donde se realizó un cociente entre la EA del pre-tratamiento HR y HL, denominado susceptibilidad al estallido (S Est).

Aportes de carbono

La estimación de los aportes de C se realizó utilizando los rendimientos de los cultivos desde el inicio del ensayo hasta la campaña 2005/2006. Se estimó el aporte de residuos en base a los rendimientos asumiendo índices de cosecha (IC) de 0,45, 0,40 y 0,45 para trigo (T), soja (S) y maíz (M), respectivamente (Studdert & Echeverría, 2000).

El aporte de C por parte de las raíces y exudados radicales se calculó teniendo en cuenta coeficientes de la relación raíz/parte aérea de 0,48, 0,35, y 0,38 para trigo, maíz y soja, respectivamente (Buyanovsky & Wagner, 1997). La proporción de biomasa de raíces en 0-18 cm se calculó según los valores de distribución de raíces en profundidad reportados por Buyanovsky & Wagner (1997). Los valores utilizados de proporción de raíces en la capa arable con respecto al resto del perfil fueron de 90%, 84% y 91% del total de raíces para T, S y M, respectivamente. La producción anual por parte del CC se asumió de 2 Mg ha⁻¹ para todos los años de estudio (Galarza, comunicación personal) ya que no se cuenta con este dato desde el inicio del ensayo. Los CC se siembran siempre en el mes de abril y se interrumpe el ciclo mediante la aplicación de herbicidas en el mes de septiembre, previo a la siembra de maíz y soja. Los valores de aporte de C aéreo fueron obtenidos al multiplicar la biomasa aérea por un contenido de C de 37%, 40% y 41% para T, S y M respectivamente, mientras que los de C radicular a través de multiplicar la biomasa radicular por un contenido de C de 29,6%, 26,1% y 26,2% para T, S y M respectivamente (Buyanovsky & Wagner, 1997). En los tratamientos con CC se utilizaron los coeficientes de la relación raíz/parte aérea y proporción de biomasa radicular del cultivo de T. Mediante la suma de los aportes de C aéreo y radicular, se obtuvo el aporte de C total. Los aportes de materia seca por los cultivos en la rotación de uso actual del suelo del departamento Marcos Juárez se calculó en base a los rendimientos medios de cada cultivo y su frecuencia en el período 2000-2015 utilizando los datos abiertos del Ministerio de agroindustria (2016). El método de cálculo de aporte de C fue el mismo que se detalló para los tratamientos del ensayo.

Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de varianza (ANAVA) para determinar el efecto de los tratamientos en las variables determinadas. Cuando los efectos fueron significativos a un nivel de 0,05 fueron comparados a través del test LSD utilizando el software InfoStat (Di Renzo *et al.*, 2011). Se realizaron análisis de correlación de Pearson's entre las variables en estudio, utilizando los contenidos de las fracciones de COP y NOP en concentración, ya que al tener diferentes profundidades, los valores en masa son diferentes a los valores en concentración. Se realizó un análisis de regresión lineal entre contenidos de COS y los

aportes de C durante el período de estudio y de Dap y contenidos de COS en concentración, teniendo en cuenta la consideración anterior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aportes de C

Los aportes de C estimados a partir de los rendimientos en diferentes años y cultivos se puede observar en la Tabla 1. En todos los años hubo diferencias en el aporte de C por parte de los tratamientos, menos en 2 (trigo/soja 93/94 y maíz 97/98). En trigo/soja el tratamiento SF presentó los menores valores de aportes. En el cultivo de soja de primera no se observaron diferencias en los aportes de C entre tratamientos de fertilización, pero si mayores aportes cuando se incluyó un CC. En maíz se observó que los mayores aportes fueron del tratamiento con CC, luego con los tratamientos FR y FM y los menores con el tratamiento SF. Los aportes medios para todo el período de evaluación fueron de 3,18 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el tratamiento SF. Considerando los rendimientos medios del departamento Marcos Juárez y el uso del suelo, los aportes medios de C fueron de 2,98 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Estos valores son levemente inferiores a los obtenidos en el tratamiento SF del presente estudio.

Contenidos de COS y NOS

Los contenidos de COS y NOS fueron mayores en FR y FM+CC en la profundidad 0-5 cm, sin diferencias significativas en el resto de las profundidades (Tabla 2). En la profundidad 0-18 cm se observaron diferencias significativas en los contenidos de COS entre tratamientos, donde el tratamiento SF presentó contenidos de 33,8 Mg ha⁻¹, mientras que FM+CC, presentó 36,7 Mg ha⁻¹ de COS (Tabla 2). En esta misma profundidad también se observaron diferencias estadísticamente significativas en los contenidos de NOS, donde los tratamientos FR y FM+CC presentaron mayores valores que SF. Los incrementos en los contenidos de COS y NOS debido a la fertilización han sido reportados en diferentes experimentos de larga duración (Álvarez, 2005). También son numerosos los antecedentes sobre el incremento en los contenidos de COS con la utilización de CC (Sainju *et al.*, 2002; Rimsky-Korsakov *et al.*, 2015). Utilizando el modelo de simulación AMG Milesi *et al.* (2013) reportan valores de equilibrio de 37 y 40 Mg ha⁻¹ para secuencias soja-soja y trigo/soja-maíz, respectivamente, similares a las observadas en el presente estudio.

Tabla 1. Aportes de C aéreo y radicular (Mg ha^{-1}) en 0-20 cm estimados a partir del rendimiento de los cultivos en los distintos años.
Table 1. Carbon input (Mg ha^{-1}) aerial and radicular at 0- 20 cm depth estimated through yields of different crops in different years.

Cultivo	SF	FM	FR	FM + CC	p
Trigo/Soja 93 - 94	3,34	3,66	3,79	3,51	0,135
Soja de primera 94 - 95	2,41 a	2,58 b	2,38 a	4,50 c	<0,0001
Maíz 95 - 96	3,71 a	3,93 a	3,73 a	4,58 b	0,0025
Trigo/Soja 96 - 97	2,72 b	2,30 a	2,72 b	2,37 a	0,0021
Soja de primera 97 - 98	2,43 a	2,63 a	2,48 a	3,61 b	<0,0001
Maíz 98 - 99	4,83	5,18	4,67	5,06	0,2993
Trigo/Soja 99 - 00	2,36 a	3,21 b	3,07 b	3,01 b	0,0056
Soja de primera 00 - 01	2,38 a	2,47 a	2,48 a	3,38 b	0,0007
Maíz 01 - 02	5,17 a	7,36 b	7,56 b	8,61 c	0,0001
Trigo/Soja 02 - 03	2,23 a	2,83 b	2,66 b	2,89 b	0,01
Soja de primera 03 - 04	2,68 a	2,81 a	2,93 a	3,86 b	0,0028
Maíz 04 - 05	5,09 a	7,18 b	8,03 c	8,47 c	< 0,0001
Trigo/Soja 05 - 06	1,96 a	3,57 b	3,36 b	3,54 b	0,0002
Aporte medio ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	3,18 a	3,84 b	3,84 b	4,34 c	< 0,0001

SF: sin fertilizar, FM: fertilización media, FR: fertilización de reposición de nutrientes y FM+ CC: FM con cultivos de cobertura.

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) dentro de cada fila.

Tabla 2. Contenidos de Carbono orgánico del suelo (COS) y Nitrógeno orgánico del suelo (NOS) expresados en masa de suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades 0- 5, 5- 10, 10- 18 y 0- 18 cm.

Table 2. Soil organic carbon (COS) and soil organic nitrogen (NOS) expressed in mass content (Mg ha^{-1}) at 0-5, 5-10 and 10-18 cm depth.

Profundidad Tratamiento	0-5 cm		5-10 cm		10-18 cm		0-18 cm	
	COS	NOS	COS	NOS	COS	NOS	COS	NOS
SF	9,98 a	0,91 a	9,41	0,67	14,41	1,26	33,8 a	2,84 a
FM	10,28 a	0,92 a	9,53	0,83	14,86	1,31	34,7 ab	3,06 ab
FR	10,89 b	1,02 b	9,73	0,87	14,95	1,37	35,6 bc	3,26 b
FM + CC	11,73 c	1,05 b	10,27	0,85	14,69	1,33	36,7 c	3,23 b
P	13,28	1,18	13,97	1,06	15,02	1,45	42,3	3,69

SF: sin fertilizar, FM: fertilización media, FR: fertilización de reposición de nutrientes y FM+ CC: FM con cultivos de cobertura. La situación P: pastura no forman parte del diseño experimental

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) por profundidad en cada fracción analizada. Masa del suelo analizada= 2280 Mg ha^{-1} .

Al inicio del ensayo los valores de COS fueron de 33,4 Mg ha^{-1} y el tratamiento SF presentó similares valores que al inicio, mientras que los demás tratamientos incrementaron los valores de COS. Para las condiciones del ensayo, la rotación de cultivos SF presentó valores de 3,18 Mg ha^{-1} y los valores de COS final fueron similares al valor de COS inicial (+0,4 Mg ha^{-1}). En cambio en las rotaciones con CC donde el aporte medio anual fue de 4,34 Mg ha^{-1} se produjo un incremento de los valores de COS con respecto al valor inicial de 3,3 Mg ha^{-1} . Los incrementos en los valores de COS en la profundidad 0-18 cm estuvieron explicados en parte por los aportes de C realizados por los cultivos. La relación entre aportes medios anuales de C por parte de los residuos

y el incremento de COS desde el inicio del ensayo (Fig 1) fue positiva y significativa ($R^2=0,54$; $p < 0,006$). De la ecuación obtenida de la regresión, para condiciones de balance de COS cero ($\text{COS final} = \text{COS inicial}$) el aporte de C anual necesario fue de 3,03 Mg ha^{-1} . En condiciones similares de suelo y rotaciones, Irizar (2010) reportó que para mantener las reservas de COS en 41 Mg ha^{-1} (2500 Mg ha^{-1} de masa de suelo) son necesarios aportes de C de 4 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Considerando los aportes de C del departamento Marcos Juárez, se puede inferir que los valores de equilibrio de contenidos de COS se mantendrán en valores similares al tratamiento SF.

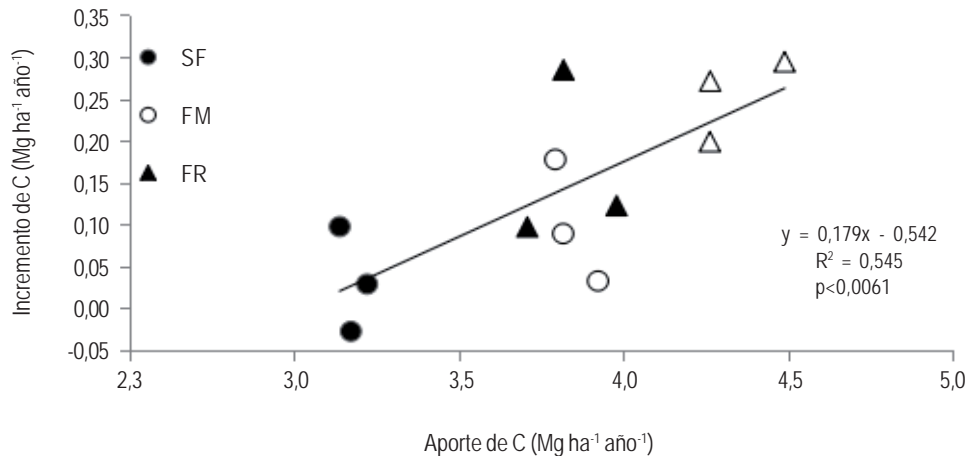


Figura 1. Relación entre aporte medio anual de Carbono (C) de residuos e incremento medio anual de carbono orgánico del suelo (COS) para la profundidad 0- 18 cm.

Figure 1. Relationship between residue carbon input and average annual increased soil organic carbon (COS) at 0-18 cm depth.

En la situación P, luego de 13 años de implantada, los valores fueron de $42,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, un incremento de 27% del COS con respecto a los valores al inicio del ensayo. Sin embargo, estos contenidos aún están alejados de los valores reportados por Galarza *et al.* (2003) de suelos vírgenes de la región ($62,4 \text{ Mg ha}^{-1}$). Con respecto a suelos vírgenes de la región en estudio, los valores de COS al inicio del ensayo fueron un 53% inferior, por lo que la pérdida de COS por sistemas agrícolas fue de 47%. En suelos molisoles se reportaron pérdidas de COS del 30% luego de 30 años de uso para cultivos agrícolas (Chen & Stevensson, 1986). La recuperación de los niveles de COS a valores de los suelos vírgenes, aún bajo pasturas, necesitaría de un lapso de tiempo mucho mayor al período que contempla el presente estudio. En suelos molisoles bajo régimen de humedad ústico serían necesarios más de 50 años de pasturas para alcanzar los valores originales de suelos vírgenes (Jastrow & Miller, 1997).

Contenidos de COA y NOA

Los contenidos de COA y NOA $< 53 \mu\text{m}$ presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la profundidad 0- 5 cm, siendo los tratamientos FR y FM+CC los de mayores contenidos (Fig 2a y b), sin diferencias en el resto de las profundidades (Fig 2 c, d, e y f). En la profundidad 0- 18 cm no se observaron diferencias estadísticamente significativas en los contenidos de COA $< 53 \mu\text{m}$ en NOA, donde el tratamiento SF pre-

sentó los menores valores y FR los mayores valores (Tabla 3). En este estudio el 82 al 85% del COS estuvo asociado a la fracción $< 53 \mu\text{m}$, valores similares a los valores reportados por Andriulo *et al.* (1999a) en Argiudoles típicos de la pampa ondulada y John *et al.* (2005) en suelos de textura franco limosa bajo agricultura continua de la región sur de Alemania.

Los contenidos de COA $< 53 \mu\text{m}$ en 0- 18 cm no presentaron modificaciones con los diferentes manejos evaluados y fueron de alrededor de 30 Mg ha^{-1} para todas las situaciones evaluadas (Tabla 3). En suelos franco limosos de la región pampeana se informó que el contenido de COA $< 53 \mu\text{m}$ fue de alrededor de un 50% del COS (Andriulo *et al.*, 1999b). También se reportó en esta región contenidos de COS de $62,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Galarza *et al.*, 2003). Por lo tanto en situaciones vírgenes de la región, los contenidos de COA deberían ser similares a los observados en las situaciones agrícolas del presente estudio. De esta forma, la fracción COA < 53 no tuvo disminuciones en sus contenidos por el uso agrícola.

Contenidos de COP y NOP

Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en todas las fracciones del COP y NOP evaluadas en la profundidad 0-5 cm, con los mayores contenidos en los tratamientos FM+CC y FR (Fig 2a y b). En la profundidad 5- 10 cm los tratamientos FR y FM+CC presentaron mayores contenidos de COP y NOP 2000- 212

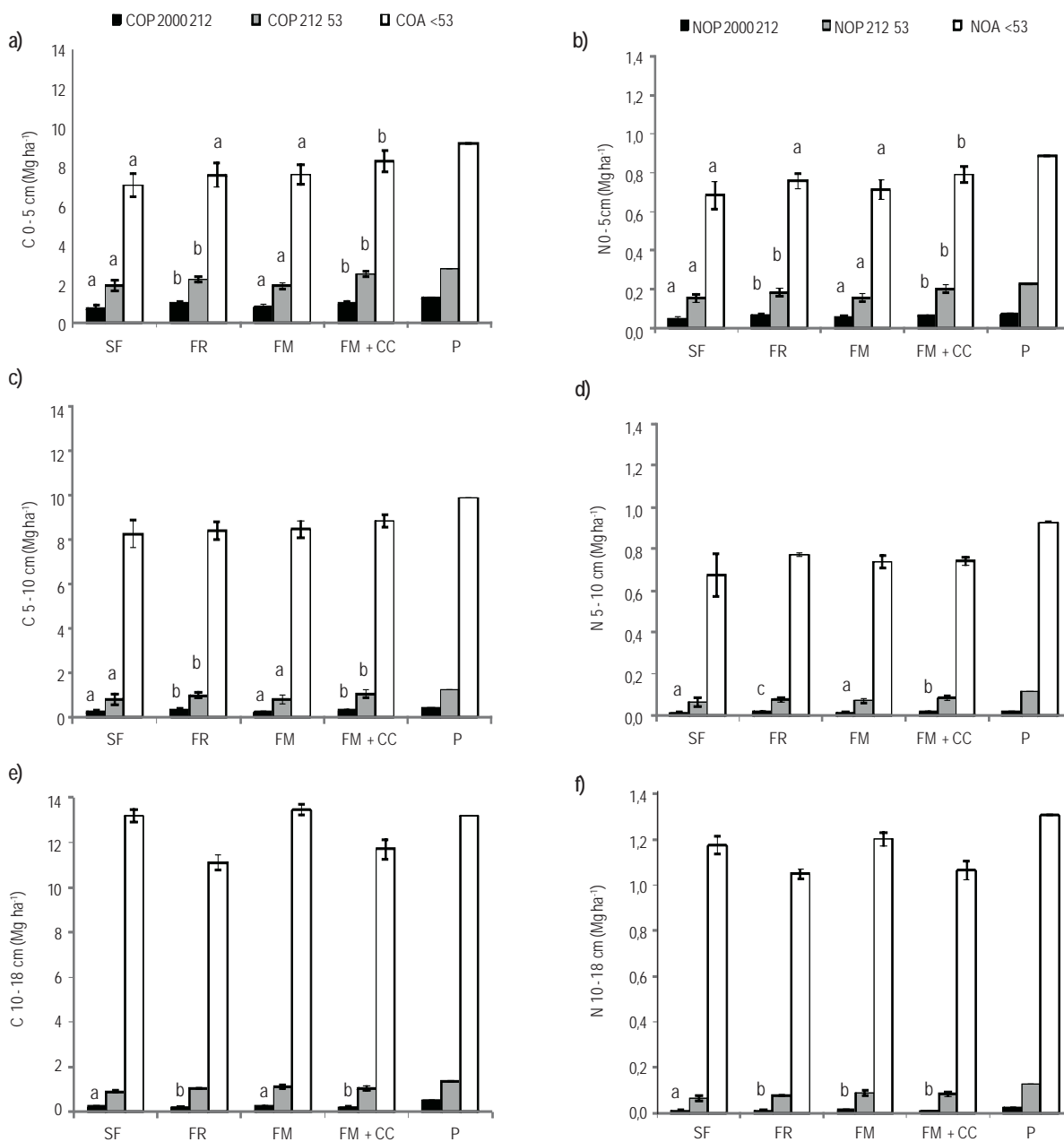


Figura 2. Contenidos de Carbono orgánico de diferentes fracciones (COP 2000-212 μm , COP 212-53 μm y COA < 53 μm en las profundidades 0-5 (a), 5-10 (c) y 10-18 cm (e) y contenidos de Nitrógeno orgánico de diferentes fracciones (NOP 2000-212 μm , NOP 212-53 μm , NOA < 53 μm en las profundidades 0-5 (b), 5-10 (d) y 10-18 cm (f).

Figure 2. particulate organic carbon content in different fractions (COP 2000-212 μm , COP 212-53 μm and COA < 53 μm) at 0-5 (a), 5-10 (b) and 10-18 (c) cm depth and particulate organic nitrogen content in different fractions (2000-212 μm , 212-53 μm and NOA < 53 μm) at 0-5 (b), 5-10 (d) and 10-18 (f) cm depth.

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) por profundidad en cada fracción analizada.

SF: sin fertilizar, FM: fertilización media, FR: fertilización de reposición de nutrientes y FM+CC: FM con cultivos de cobertura. COP: carbono orgánico particulado, COA: Carbono asociado a la fracción mineral, NOP: nitrógeno orgánico particulado y NOA: nitrógeno asociado a la fracción mineral.

La situación P (pastura) no forma parte del diseño experimental.

μm y de COP 212-53 μm (Fig 2c y d). En cambio en la profundidad 10-18 cm los tratamientos FR y FM+CC presentaron mayores contenidos de COP y NOP 2000-212 μm , sin cambios en COP y NOP 212-53 μm (Fig 2 e y f).

En la profundidad 0-18 cm los contenidos de COP y NOP 2000-212 μm y COP 212-53 μm presentaron diferencias estadísticamente significativas y fueron mayores para los tratamientos FR y FM+CC (Tabla 3). En cambio los contenidos de NOP 212-53 μm y NOA < 53 μm el tratamiento FM+CC se diferenció del resto de los tratamientos. Las fracciones COA y NOA fueron de mayor tamaño que COP y NOP 212-53 μm , a la vez que estas fueron de mayor tamaño que COP y NOP 2000-212 μm .

Las fracciones lábiles responden rápidamente a los cambios provocados por el manejo (Carter, 2003; Quiroga *et al.*, 1996; Haynes, 2005) y detectaron cambio influenciados por las estrategias de manejo en todas las profundidades. La adición de nutrientes produce un incremento en el rendimiento, lo que implica mayores aportes de residuos y raíces de cultivo (Liu *et al.*, 2005). Algunos estudios reportan efectos positivos de la fertilización de largo plazo sobre los contenidos de C de las fracciones lábiles (Eiza *et al.*, 2005), como así también la ausencia de efectos (Russell *et al.*, 2005; Diovisalvi *et al.*, 2008; Irizar *et al.*, 2006). Estas diferencias entre ensayos pueden deberse a que los efectos de la fertilización pueden ser variables a través de los años dependiendo de las condiciones climáticas (Galantini & Rosell, 2006).

Los contenidos de COP de ambas fracciones representaron entre el 16% del contenido de COS, mientras que

las fracciones del NOP representaron un 13% del NOP (Tabla 3). Considerando que los suelos vírgenes de la región en estudio presentaron valores de 60 Mg ha^{-1} y que los valores de COA < 53 no han sido modificados a través del tiempo, es posible concluir que las pérdidas de COS por la agricultura con respecto a suelos vírgenes ocurrieron principalmente en las fracciones jóvenes. De esta forma, los contenidos de C y N de las fracciones jóvenes tendrían valores inferiores a 20% de los valores de suelos vírgenes. Las pérdidas de C de estas fracciones ocurren mucho más rápido que en la fracción estable (Gregorich *et al.*, 2006). Cambardella & Elliot (1992) informaron pérdidas de 60% en las fracciones lábiles de la MOS luego de 20 años de agricultura continua. Para las condiciones del presente estudio, las pérdidas de C con respecto a suelos vírgenes serían cercanas al 80%.

Densidad aparente y estabilidad de agregados

Los valores de Dap no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ninguna profundidad evaluada (Tabla 3). Se observaron incrementos de Dap con la profundidad, siendo más abrupto el cambio entre la profundidad 0-5 cm y 5-10 cm. Los tratamientos presentaron en las profundidades 5-10 cm y 10-18 cm valores de Dap cercanos a 1,45 Mg m^{-3} , reportados como la máxima Dap que estos suelos pueden alcanzar (Gertter, 2008; Ferreras *et al.*, 2007). La Dap presentó una relación lineal negativa y significativa con los contenidos de COS (Fig 3). La ecuación obtenida expresa que por cada incremento en una unidad de COS, la Dap disminuyó 0,04 Mg m^{-3} .

Tabla 3. Contenidos de Carbono y Nitrógeno orgánico de diferentes fracciones (COP y NOP 2000-212 μm , COP y NOP 212-53 μm y COA y NOA < 53 μm) expresados en masa de suelo (Mg ha^{-1}) en la profundidad 0-18 cm.

Table 3. Organic carbon and nitrogen content for different fractions (COP and NOP 2000-212 μm , COP and NOP 212-53 μm , COA and NOA < 53 μm) expressed in soil mass (Mg ha^{-1}) at 0-18 cm depth.

Trat	COP 2000 - 212	NOP 2000 - 212	COP 212 - 53	NOP 212 - 53	COA < 53	NOA < 53
SF	1,27 a	0,08 a	3,64 a	0,28 a	28,9	2,56 a
FM	1,25 a	0,08 a	3,79 a	0,32 ab	29,6	2,66 ab
FR	1,59 b	0,10 b	4,48 b	0,36 bc	29,5	2,80 c
FM + CC	1,51 b	0,09 b	4,78 b	0,38 c	30,4	2,76 bc
P	2,19	0,12	5,35	0,48	34,72	3,12

SF: sin fertilizar, FM: fertilización media, FR: fertilización de reposición de nutrientes y FM+CC: FM con cultivos de cobertura. COP: carbono orgánico particulado, NOP: nitrógeno orgánico particulado, COA: carbono orgánico asociado, NOA: nitrógeno orgánico asociado.

La situación P: pastura no forman parte del diseño experimental

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) por profundidad en cada fracción analizada.

Masa del suelo analizada = 2280 Mg ha^{-1} .

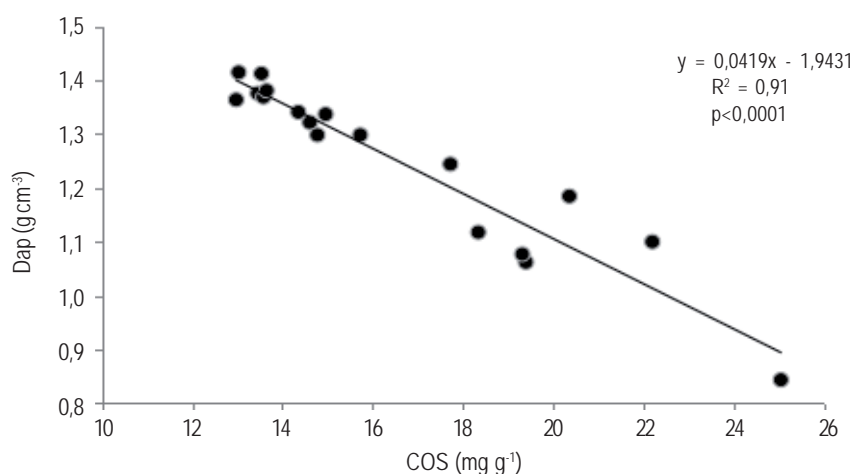


Figura 3. Relación entre densidad aparente (Dap) y Carbono orgánico del suelo (COS).

Figure 3. Relation between soil bulk density (Dap) and soil organic carbon (COS).

Tabla 4. Índice de estabilidad de agregados en humedecimiento lento (EA HL), humedecimiento rápido (EA HR), susceptibilidad al estallido (S Est) y densidad aparente (Dap) en las profundidades 0- 5, 5- 10 y 10- 18 cm.

Table 4. Aggregate stability index in slow wetting (EA HL), fast wetting (EA HR), slacking susceptibility (S Est) and soil bulk density at 0-5, 5-10 and 10-18 cm depth.

Profundidad	Tratamiento	EA HL	EA HR	S Est (%)	Dap(g cm ⁻³)
0 – 5 cm	SF	2,70 a	0,56	79,3	1,12
	FM	2,75 a	0,50	81,7	1,06
	FR	3,10 b	0,49	84,0	1,18
	FM + CC	3,18 b	0,57	82,1	1,10
	P	3,30	2,68	18,8	0,84
5 – 10 cm	SF	3,04 b	0,45 c	85,2	1,34
	FM	3,06 b	0,38 ab	87,6	1,32
	FR	2,77 a	0,36 a	86,9	1,34
	FM + CC	3,04 b	0,43 bc	85,7	1,30
	P	3,30	1,71	48,2	1,24
10 – 18 cm	SF	2,42	0,40	83,3 b	1,41
	FM	2,68	0,34	87,1 a	1,38
	FR	2,65	0,35	86,7 a	1,41
	FM + CC	2,93	0,38	86,8 a	1,37
	P	3,24	0,68	79	1,38

SF: sin fertilizar, FM: fertilización media, FR: fertilización de reposición de nutrientes y FM+ CC: FM con cultivos de cobertura.

La situación P (pastura) no forma parte del diseño experimental

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) para cada profundidad evaluada.

Con contenidos de arcilla + limo de alrededor del 90%, Jones (1983) reportó que valores de Dap de 1,4 Mg ha⁻¹ son críticos para el desarrollo de las raíces. Por lo tanto, en estas profundidades podría encontrarse restricciones para

la exploración radicular. Sin embargo aún con valores de Dap críticos los problemas de restricciones para el crecimiento de las raíces pueden estar atenuados, debido a que los valores de Dap críticos para el desarrollo de raíces son

dependientes del contenido de humedad del suelo (Pabin *et al.*, 1998). Estos resultados son similares a los reportados por Jarecki *et al.*, (2005) en suelos franco limosos de la región noreste de Ohio, EEUU. Debido a que la Dap está relacionada con la concentración de COS, la disminución de esta con la profundidad, tiene como consecuencia un aumento de la Dap (Arvidsson, 1998; Franzluebbers, 2002).

La EA en condiciones de HL presentó diferencias significativas entre tratamientos, y fue mayor en FR y FM + CC para la profundidad 0- 5, mientras que fue menor en el tratamiento FR en la profundidad 5- 10 cm. En cambio, en la profundidad 10- 18 cm, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Tabla 3). Para condiciones de HR la EA fue modificada por los tratamientos sólo en la profundidad 5- 10 cm, donde los tratamientos SF y FM+CC presentaron los mayores valores. La situación P presentó altos valores de EA en condiciones de HR para las profundidades 0- 5 y 5- 10 cm. La susceptibilidad al estallido (Tabla 3) no fue estadísticamente diferente entre tratamientos. En relación a la situación P, se observó que en 0-5 y 5-10 cm los valores de S Est fueron muy diferentes a las demás situaciones evaluadas.

La EA HR y el S Est presentaron correlaciones positivas y significativas con las fracciones COP, NOP y con COA y NOA (Tabla 5). Esto pudo deberse a los mayores contenidos de COP y NOP debido a la presencia de raíces finas e hifas de hongos como componente transitorio de la EA (Tisdall & Oades, 1979). En cambio, la EA HL presentó una

correlaciones con COP y NOP 212 - 53 μm y con COA < 53 μm . En condiciones de HL los valores de estabilidad son controlados por agentes de unión persistentes tales como compuestos organo-minerales (Tisdall & Oades, 1982) que forman entre el 85 y 90% del COS en suelos franco limosos y no son afectados por el manejo (Quiroga *et al.*, 1996). La EA HL presentó menos variación que EA HR en las situaciones evaluadas. Esto pudo deberse a que EA HL estuvo más relacionada a COA < 53 μm , fracción más estable a través del tiempo. Estas relaciones han sido reportadas por diferentes estudios (Angers, 1992) y pone de manifiesto la importancia del COS y COP en mantener la fertilidad física de los suelos en sistemas agrícolas continuos.

La susceptibilidad al estallido de los agregados se incrementa con la disminución de los contenidos de COS (Oades, 1984). Los contenidos de COP incrementan la hidrofobicidad de los agregados y su cohesión interna por lo que es mayor la resistencia de los agregados frente al estallido (Chenu *et al.*, 2000). La menor resistencia de los agregados al estallido conduce a una mayor oclusión del espacio poroso del suelo disminuyendo la entrada de agua dentro de los agregados (Caron *et al.*, 1996). Angers (1992) reportó mayor EA fue mayor en alfalfa que bajo maíz o barbecho y Chenu *et al.*, (2000) detectaron mayores valores de EA en suelos forestales en comparación a suelos agrícolas. Los contenidos de EA HR en la profundidad 0-5 cm fueron elevados en P en relación a los demás tratamientos. De igual manera, los valores de Dap fueron menores para

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre índices de estabilidad de agregados en humedecimiento lento (EA HL), humedecimiento rápido (EA HR) y susceptibilidad al estallido (I est) con Carbono y Nitrógeno orgánico de diferentes fracciones (COP y NOP 2000- 212 μm , COP y NOP 212- 53 μm y COA y NOA < 53 μm).

Table 5. Correlations between aggregate stability slow wetting (EA HL), fast wetting (EA HR), slacking susceptibility (I est) and soil organic carbon and nitrogen in different fractions (COP 2000- 212 μm , NOP 2000-212 μm ; COP 212- 53 μm y NOP 212-53 μm , COA y NOA < 53).

Variable	MWD HL	MWD HR	I est
COP 2000 - 212 μm	0,32	0,44**	0,41*
COP 212 - 53 μm	0,3**	0,42*	0,4*
COA < 53 μm	0,5**	0,58**	0,52**
NOP 2000 - 212 μm	0,31	0,36	0,34
NOP 212 - 53 μm	0,34**	0,43**	0,4**
NOA < 53 μm	0,35	0,53**	0,5**

* probabilidad ($p < 0,01$).

** probabilidad ($p < 0,001$).

esta profundidad en P. Por lo tanto se pueden considerar los contenidos de COP y COS observados en P como un valor deseable de alcanzar, ya que la mejora en las propiedades físicas evaluadas en este estudio fue muy marcada.

CONCLUSIONES

En la región en estudio son necesarios 3 Mg ha⁻¹ de aporte de C para que el COS se mantenga en equilibrio en la profundidad 0-18 cm. Valores de COP 2000-212 +COP 212 - 53 µm superiores a 4 Mg ha⁻¹ en la profundidad 0-5 cm fueron suficientes para incrementar la EA. De la misma manera, valores de COS de 13,3 Mg ha⁻¹ en la profundidad 0-5 cm fueron adecuados para disminuir la Dap. En sistemas agrícolas continuos es posible incrementar los niveles de COS a través de mayores aportes de residuos combinando rotaciones, fertilización de cultivos y la utilización de CC.

BIBLIOGRAFÍA

- Aizen, MA; LA Garibaldi & M Dondo. 2009. Expansión de la soja y diversidad de la agricultura Argentina. *Ecología Austral* 19: 45-54.
- Allmaras, RR; DR Linden & CE Clapp. 2004. Corn-residue transformations into root and soil carbon as related to nitrogen, tillage and stover management. *Soil Science Society of American Journal* 68:1366-1375.
- Alvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management* 21: 38- 52.
- Amezketta, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14: 83-151.
- Amezketta, E; MJ Singer & Y Le Bissonnais. 1996. Testing a New Procedure for Measuring Water-Stable Aggregation. *Soil Science Society of American Journal* 60: 888-894.
- Andriulo, A; J Guerif & B Mary. 1999a. Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural ¹³C abundance. *Agronomie* 19: 349-364.
- Andriulo, A; J Guerif & B Mary. 1999b. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19: 365- 377.
- Angers, DA. 1992. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. *Soil Science Society of American Journal* 56: 1244-1249.
- Arvidsson, J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. *Soil & Tillage Research* 49: 159-20.
- Blake, GR & KH Hartge. 1965. Bulk density. In: Black C.A. (Ed) *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*, vol 9. American Society of Agronomy. Inc., Madison, WI, pp. 374-390.
- Buyanovsky, GA & GH Wagner. 1997. Crop residue input to soil organic matter in the Sanborn field. En: EA Paul, E.A. *et al.*, (eds). *Soil organic matter in temperate ecosystems: Long-term experiments in North America*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp. 73-83.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1992. Particulate organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of American Journal* 56: 777-783.
- Campbell, CA & RP Zentner. 1993. Soil Organic Matter as Influenced by Crop Rotations and Fertilization. *Soil Science Society of American Journal* 57: 1034-1040.
- Caron, J; CR Espinolda & DA Angers. 1996. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties. *Soil Science Society of American Journal* 60: 901-908.
- Carter, MR; DA Angers; EG Gregorich & MA Bolinder. 2003. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. *Canadian Journal of Soil Science* 83: 11-23.
- Carter, MR. 1996. Analysis of soil organic matter storage in agro ecosystems. In: Carter MR, Stewart BA (eds) *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Lewis Publ., CRC Press, Boca Raton, Florida, pp 3-11.
- Carter, MR; DA Angers & HT Kunelius. 1994. Soil Structural Form and Stability, and Organic Matter under Cool-Season Perennial Grasses. *Soil Science Society of American Journal* 58: 1194-1199.
- Chen, Y & JR Stevenson. 1986. Soil organic matter interactions with trace elements, Y. Chen & Y Awnimelech, (eds) *Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, Nijhoff, Dordrecht, pp. 73-116.
- Chenu, C; Y Le Bissonnais & D Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of American Journal* 64: 1479-1486.
- Cordone, G & F Martinez. 2004. El monocultivo de soja y el déficit de nitrógeno. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. Inpofos* 24: 1-4. INPOFOS Cono Sur, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Di Rienzo, J; F Casanoves; M Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & C Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Zorita, M & GA Grosso. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research* 54: 121-126.
- Diovisalvi, N; GA Studdert; GF Domínguez & MJ Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua con dos sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 26: 1-11.
- Donald, CM & J Hamblin. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as an agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy* 28: 361-405.
- Eiza, MJ; N Fioriti; G Studdert & H Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo* 23: 59-67.
- Ellert, BH; HH Janzen & B McConkey. 2001. Measuring and comparing soil carbon storage. In: R Lal *et al.*, (eds). *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publisher, Chelsea, Michigan, USA, pp. 131-146.

- Ferreras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & F García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del suelo* 25(2): 159-172.
- Flores, CC & SJ Sarandón. 2002. ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo oculto de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de agriculturización en la región pampeana Argentina. *Revista de la facultad de agronomía*, Universidad nacional de La Plata 105: 52-67.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil & Tillage Research* 66: 197-205.
- Galantini, JA & R Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid pampean soils. *Soil & Tillage Research* 87: 72-79.
- Galarza, C; V Gudelj & P Vallone. 2003. Nuevas tendencias de fertilización de sistemas agrícolas: Balances de nutrientes y su impacto en los contenidos de Materia Orgánica. Verificado Mayo de 2017. <http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/Suelos/fermo03.htm>. Ultimo acceso Junio de 2017.
- Gerster, G. 2008. Compactación por tránsito de maquinarias en un Argiudol típico. Tesis de magister en manejo y conservación de recursos naturales. Universidad Nacional de Rosario. 109 pp.
- Ghida Daza, C. 2005. Evolución del cultivo de soja en argentina según zonas en el período 1990/1 -2004/5. Fecha de verificación Octubre de 2011. <http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/economia/evsoja05.pdf> Ultimo acceso Junio de 2017.
- Gregorich, EG; MH Beare; UF Mckim & JO Skjemstad. 2006. Chemical and biological characteristics of physically un-complexed organic matter. *Soil Science* 70: 975-985.
- Gregorich, EG; BH Ellert; CF Drury & BC Liang. 1996. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage. *Soil Science Society of American Journal* 60: 472-476.
- Haynes, RJ. 2005. Labile organic matter fractions as central component of the quality of agricultural soils: an overview. *Advances in Agronomy* 85: 221-268.
- Hu, S; NJ Grunwald; AHC Van Bruggen; GR Gamble; LE Drinkwater; C Shennan & MW Demment. 1997. Short term effects of cover crop incorporation on soil carbon pools and Nitrogen availability. *Soil Science Society of American Journal* 61: 901-911.
- INTA. 1978. Secretaría de Agricultura y Ganadería de la Nación. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-17. Marcos Juárez.
- Irizar, A. 2010. Cambios en las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas. Efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada. Tesis para optar al grado de magister en ciencias del suelo, facultad de Agronomía, universidad de Buenos Aires. 63 p.
- Jarecki, MK; R Lal & R James. 2005. Crop management effects on soil carbon sequestration on selected farmer fields in northeastern Ohio. *Soil & Tillage Research* 81: 256-276.
- Jastrow, JD & RM Miller. 1997. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organo-mineral associations. In: R Lal; J Kimble; R Follett & B Stewart (eds). *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 207-223.
- John, B; T Yamashita; B Ludwig & H Flessa. 2005. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma* 128: 63-79.
- Jones, CA. 1983. Effect of soil texture on critical bulk density for root growth. *Soil Science Society of American Journal* 47: 1208-1211.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437.
- Liu, A; BL Ma & AA Bomke. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic Carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of American Journal* 69: 2041-2048.
- Martelloto, E; P Salas & E Lovera. 2001. El monocultivo de soja y la sustentabilidad de la agricultura. En AAPRESID (ed), Rotación de cultivos en siembra directa, Publicaciones Técnicas por Cultivo, AAPRESID, Rosario, Santa Fe pp. 17-22.
- Merry, RH & LR Spouncer. 1998. The measurement of carbon in soils using a microprocessor controlled resistance furnace. *Communications in Soil Science and Plant Analyses* 19: 707-720.
- Miglierina, AM; JO Iglesias; MR Landriscini; JA Galantini & RA Rosell. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil & Tillage Research* 53: 129-135.
- Milesi, L; AB Irizar; AE Andriulo & B Mary. 2013. Effect of continuous agriculture of grassland soils of the Argentine rolling pampa on soil organic carbon and nitrogen. *Applied and Environmental Soil Science* Volumen 2013. Pp: 17.
- Ministerio de Agroindustria. Estimaciones de producción, datos abiertos de Agroindustria. Subsecretaría de Agricultura, Dirección Nacional de Estimaciones, Delegaciones y Estudios Económicos. <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Ultimo acceso Junio de 2017.
- Oades, JM. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76: 319-337.
- Pabin, J; J Lipiec; S Wlodek; A Biskupski & A Kaus. 1998. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil & Tillage Research* 46: 203-208.
- Quiroga, A; D Funaro & R Fernández. 2005. Propiedades edáficas en molisoles bajo siembra directa. EEA Anguil. Aspectos del manejo de los suelos en sistemas mixtos de las regiones semiárida y sub húmeda pampeana. *Boletín de Divulgación Técnica* N° 87: 3-16.
- Quiroga, AR; DE Buschiazio & N Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fraction in soils of the semiarid Argentinian pampas. *Soil Science* 161: 104-108.
- Rawls, WJ; DL Brakensiek & B Soni. 1983. Agricultural management effects on soil water processes. In: *Soil water retention and infiltration parameters. Transactions of the ASAE* 26: 1747-1752.
- Rimski-Korsakov, H; CR Alvarez & RS Lavado. (2015). Cover crops in agricultural systems of the Argentine Pampas. *Journal of Soil and Water Conservation* 70 (6): 134-140.
- Russell, AE; DA Laird; TB Parkin & AP Mallarino. 2005. Impact of nitrogen fertilization and cropping system on Carbon sequestration in midwestern mollisols. *Soil Science Society of American Journal* 69: 413-422.
- Sainju, UM; BP Singh & WF Whitehead. 2002. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. *Soil & Tillage Research* 63: 167-179.

- Santos, DJ. 2001. Evolución de la superficie sembrada y del rendimiento de la soja en las últimas décadas. *Actualización Técnica en Soja*. INTA EEA Paraná, Serie Extensión 21: 1-6.
- Six, J; ET Elliott; K Paustian & JW Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of American Journal* 62: 1367-1377.
- Studdert, G & HE Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of American Journal* 64: 1496-1503.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1979. Stabilization of soil aggregates by the root system of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17: 429-441.
- Wilson, TC; EA Paul & RR Harwood. 2001. Biologically active soil organic matter fractions in sustainable cropping systems. *Applied Soil Ecology* 16: 63-76.

