

INTRODUCCIÓN DE CULTIVOS DE COBERTURA EN LA ROTACIÓN SOJA-MAÍZ: EFECTO SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO

SILVINA BEATRIZ RESTOVICH^{1*}; ADRIÁN ENRIQUE ANDRIULO¹ & CATALINA AMÉNDOLA¹

¹ Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) Ruta 32 km 4,5-(2700) Pergamino, Buenos Aires, Argentina

* Autor para correspondencia: srestovich@pergamino.inta.gov.ar

Recibido: 18-02-11

Aceptado: 13-04-11

RESUMEN

Los suelos franco limosos de la Pampa Ondulada bajo siembra directa (SD) con predominio de soja y, secundariamente maíz, registran una progresiva disminución de su fertilidad física y química. La introducción de cultivos de cobertura (CC) en sistemas agrícolas cada vez menos diversificados podría constituir una herramienta agronómica para mitigar esta degradación edáfica. Los objetivos del trabajo fueron: 1) evaluar el efecto de diferentes CC sobre algunas propiedades del suelo (porosidad, distribución de tamaño de poros, estabilidad estructural, densidad aparente, carbono orgánico del suelo (COS), carbono lábil) y 2) analizar la evolución de las propiedades edáficas durante la introducción de CC en la secuencia soja-maíz bajo SD. En 2005, se instaló un ensayo sobre un Argiudol típico (franco limoso) con diferentes especies de ciclo otoño-invernal, utilizadas como CC. Las especies fueron: cebada forrajera (*Hordeum vulgare* L.), ray grass (*Lolium multiflorum* L.), avena (*Avena sativa* L.), cebadilla (*Brumus unioloides* L.), vicia (*Vicia sativa* L.), colza (*Brassica napus* L.), nabo forrajero (*Raphanus sativus* L.), una consociación de vicia y avena y un testigo sin CC. Los cambios en las propiedades edáficas producidos durante la introducción de CC fueron: aumento de la macroporosidad y de su estabilidad y aumento del COS y de su fracción lábil. Estos cambios fueron de mediana a baja magnitud, se registraron principalmente próximos a la superficie (0-5 cm), estuvieron asociados a los momentos en los que se realizaron aportes importantes de C y fueron fáciles de revertir en asociación con períodos de lluvias intensas. El efecto acumulado de la rotación mostró mayor aporte de COS al sistema en presencia de CC. De los CC probados, se destacó el nabo forrajero como generador de porosidad y la avena como estabilizadora del sistema poroso.

Palabras clave. Carbono orgánico del suelo, porosidad, estabilidad estructural.

INCLUSION OF COVER CROPS IN A SOYBEAN-CORN ROTATION: EFFECT ON SOME SOIL PROPERTIES

ABSTRACT

Silt loam soils of the Rolling Pampas cultivated with soybean and, secondarily, corn under no-tillage (NT) show a progressive decline in their physical and chemical fertility. The inclusion of cover crops (CC) in these agricultural systems could help mitigate these types of degradation. The objectives of this study were: 1) to evaluate the effect of different CC on some soil properties (porosity distribution, structural stability, bulk density, soil organic carbon (SOC) and labile carbon) and 2) to analyze the evolution of these properties during the inclusion of CC in a soybean-corn rotation under NT. In 2005, a two-year study was carried out on a silt loam Typic Argiudoll using different winter species as CC: barley (*Hordeum vulgare* L.), ryegrass (*Lolium multiflorum* L.), oats (*Avena sativa* L.), rescue grass (*Brumus unioloides* L.), vetch (*Vicia sativa* L.), rape seed (*Brassica napus* L.) and forage radish (*Raphanus sativus* L.), a mixture of vetch and oats, and a control without CC. We measured an increase in soil macroporosity and structural stability and an increase in SOC content and the labile fraction. These changes were of moderate to low magnitude, occurring mainly near the soil surface (0-5 cm); they were associated with moments of important residue contributions and disappeared in periods of heavy rain. The rotations that included CC accumulated more SOC. Forage radish outstated as a generator of porosity and oats as a stabilizer of the porous system.

Key words. Soil organic carbon, soil porosity, structural stability.

INTRODUCCIÓN

Los suelos franco limosos de la Pampa Ondulada bajo siembra directa (SD) con predominio de soja registran una progresiva disminución de su fertilidad física y química (Andriulo & Cordone, 1998; Lavado, 2006). Entre las causas fundamentales de dicha pérdida se han señalado, los largos períodos de barbecho otoño invernal, el bajo aporte anual de carbono orgánico del suelo (COS), 2-3 Mg C

ha⁻¹ año⁻¹, (Restovich *et al.*, 2005) y la estimulación de la mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) debido a productos de la fijación biológica del nitrógeno que conducen a pH de la superficie del suelo cercanos a la neutralidad, que favorece la actividad microbiana descomponedora (Huggins *et al.*, 2007; Irizar, 2010). Además, este sistema de cultivo presenta poca cobertura de suelo, baja estabilidad de la estructura, tiende a la compactación y

reduce la infiltración debido a la presencia de una estructura laminar con orientación de poros preferencialmente horizontal bajo SD (Sasal *et al.*, 2006). Esta situación puede ser revertida en el largo plazo cuando se aumenta la diversificación de especies la cual puede incrementar el contenido de COS y mejorar el estado estructural edáfico (Rice *et al.*, 2007).

La bibliografía internacional reporta que el uso de cultivos de cobertura (CC) en sistemas agrícolas intensificados aumenta la MOS (Sainju *et al.*, 2002; Setter & Horwath, 2004; Franzluebbers, 2005; Liu *et al.*, 2005; Carneiro Amado *et al.*, 2006; Metay *et al.*, 2007; Constantin *et al.*, 2010) y mejora el estado físico edáfico favoreciendo la agregación, aumentando la infiltración y la porosidad total y disminuyendo la compactación (Magdoff & Weil, 2004; Villamil *et al.*, 2006). Por lo tanto, la implementación de CC en los sistemas agrícolas actuales cada vez menos diversificado podría constituir una herramienta agronómica para mitigar la degradación física y química de los suelos.

Dentro de la información disponible de corto plazo para la región pampeana, Scianca *et al.*, (2006); Álvarez *et al.*, (2008); Basanta *et al.* (2010) y Cazorla *et al.* (2010) observaron un efecto positivo sobre la fracción lábil de la MOS en rotaciones que incluían CC bajo SD. Por otro lado, Álvarez *et al.* (2008) y Cosentino *et al.* (2008) no observaron efectos sobre algunas propiedades físicas como la estabilidad de agregados.

El sistema radical de los CC cuando están creciendo, interactúa con procesos del suelo, generando agregación, protección de carbono (C) lábil en macroagregados, agregados estables y porosidad estructural adicional. Sin embargo, estos efectos de corto plazo pueden perderse, por un lado, cuando los residuos que ingresan al suelo son fácilmente descomponibles (Monnier, 1965) y por otro,

debido a precipitaciones abundantes que pueden contrarrestar estos efectos positivos (Sasal & Andriulo, 2005; Abiven *et al.*, 2009). Por ello, cuando se evalúa la introducción de CC en el corto plazo, resulta de fundamental interés monitorear la evolución de propiedades físicas y químicas y analizar su relación con las características climáticas imperantes.

Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) evaluar el efecto de diferentes CC sobre algunas propiedades del suelo y 2) analizar la evolución de las propiedades edáficas durante la introducción de CC en la secuencia soja-maíz bajo SD. Para ello, se instaló un ensayo sobre un suelo franco limoso característico de la Pampa Ondulada, utilizando especies de diferentes familias de ciclo otoño-invernal (gramíneas, leguminosas, crucíferas y una consociación) como CC. En dicho ensayo, se realizaron, al secado y a la cosecha de los cultivos principales, muestreos de suelo del primer horizonte para determinar: COS, C lábil (Cs), estabilidad estructural (EE), distribución del tamaño de poros y densidad aparente (DAP).

MATERIALES Y MÉTODOS

En 2005 se instaló un ensayo con CC intercalados en una rotación de maíz y soja en la Estación Experimental de Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (33°51'S, 60°40'W). El suelo es un Argiudol típico (USDA Soil Taxonomy) de la serie Pergamino sin fase por erosión (pendiente < 0,3%), la textura del horizonte A es franco limosa. El clima es templado subhúmedo, con temperatura media anual de 16,5 °C y las precipitaciones medias anuales de 973 mm para los periodos 1967-2010 y 1910-2010, respectivamente (Base de datos de la EEA Pergamino de INTA). La distribución mensual de las precipitaciones registradas durante el periodo evaluado se presenta en la Figura 1.

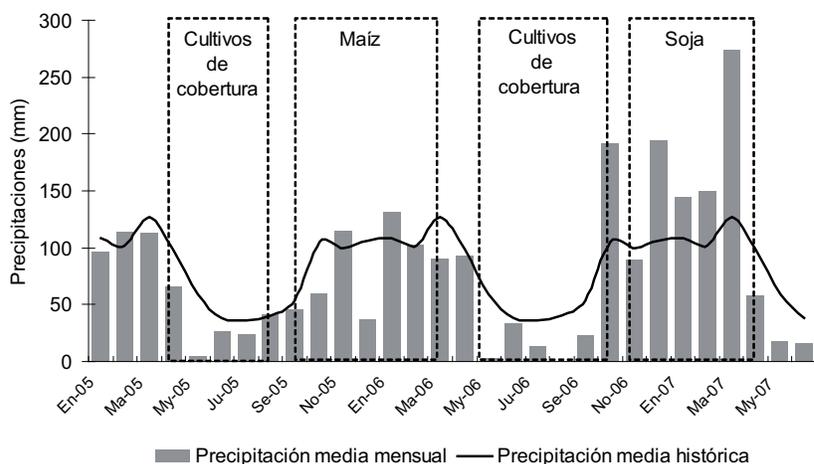


Figura 1. Precipitaciones mensuales (barras) y media histórica (línea) durante el periodo evaluado.

Figure 1. Actual (bars) and long term mean (line) monthly rainfall during the study period. The duration of each crop is indicated with a dashed frame.

El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones y cada parcela fue de 10 x 30 m. A partir de la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz, el diseño experimental fue en bloques con parcelas divididas, correspondiendo la parcela mayor a los tratamientos con CC y la subparcela al fertilizante (0 y 32 kg N ha⁻¹).

Se partió de 7 años de SD con secuencias de cultivos que incluyeron trigo, maíz y soja. Las características físico-químicas iniciales del ensayo se presentan en la Tabla 1. Los CC se sembraron en línea bajo SD el 8 de abril de 2005, después de soja de segunda. Las especies utilizadas fueron: cebada forrajera (*Hordeum vulgare* L.), ray grass (*Lolium multiflorum* L.), avena (*Avena sativa* L.), cebadilla (*Brumus unioloides* L.), vicia (*Vicia sativa* L.), colza (*Brassica campestris* L.) y nabo forrajero (*Raphanus sativus* L.), utilizando densidades de siembra de 70, 20, 80, 25, 70, 5 y 20 kg semilla ha⁻¹, respectivamente. La consociación fue de avena + vicia, y se sembró con densidades de 20 y 40 kg semilla ha⁻¹, respectivamente. Además, se incluyó un testigo sin CC. A la siembra se fertilizó con 14,7 kg P₂O₅ ha⁻¹ a los tratamientos con CC y al testigo. Vicia fue inoculada con *Rhizobium leguminosarum biovar viceae*, inmediatamente antes de la siembra.

La siembra de maíz (*Zeamays* L.), híbrido DK 474 (Monsanto), se realizó el 26 de septiembre de 2005, fue sembrado a 0,70 m entre hileras, con una densidad de 75.000 plantas ha⁻¹. Se fertilizó a la siembra con 31,5 kg P₂O₅ ha⁻¹ y en V₅₋₆ se fertilizó la mitad de cada parcela con 32 kg N ha⁻¹ aplicado como urea al voleo en el entresurco. La fertilización fue determinada utilizando el método del

balance, asumiendo que la demanda del cultivo fue de 213 kg N ha⁻¹ (para un rendimiento de 9,0 Mg ha⁻¹), una capacidad de oferta del suelo de 189 kg ha⁻¹ y una eficiencia del uso del fertilizante del 75%. El cultivo de soja (*Glicine max* L.), var. Don Mario 50048, se sembró el 8 de noviembre de 2006 a una distancia entre hileras de 52 cm y una densidad de siembra de 500.000 semillas ha⁻². La soja no se fertilizó y se inoculó con *Bradyrhizobium* sp. Durante la implantación y el crecimiento de los cultivos de maíz y de soja no fue necesario el control de malezas debido a un adecuado control en el barbecho previo. El ciclo de los CC se interrumpió el 12/08/2005 y el 12/10/2006 con 3-4 L ha⁻¹ de glifosato (48% principio activo). El testigo siempre tuvo control de malezas. Las fechas de siembra y cosecha de los cultivos principales, soja y maíz, y el patrón de distribución de las precipitaciones primavera-estivales de la región, impusieron el límite al crecimiento de los CC. Así, para el cultivo de maíz, con fechas de siembra de septiembre, el crecimiento de los CC antecesores se interrumpió hacia fines de invierno (estadio vegetativo e inicio del reproductivo) y para el cultivo de soja, con fechas de siembra de noviembre, el secado se realizó en la primavera (estadio reproductivo).

Determinaciones edáficas

Dentro de cada parcela, se extrajeron muestras de cilindros (volumen 58,9 cm³) a 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm, con dos repeticiones por parcela hasta V₅₋₆ del cultivo de maíz incluido, y luego de la fertilización nitrogenada, se tomó una repetición por cada subparcela perteneciente a la dosis de fertilizante. Luego, con

Tabla 1. Caracterización física y química del Argiudol típico del ensayo. Todas las características, excepto textura, fueron determinadas al comienzo del experimento en 2005. El porcentaje de arcilla, limo y arena fueron obtenidos de la carta de suelo de INTA (1974).

Table 1. Physical and chemical characteristics of the Typic Argiudoll of the experimental plots. All parameters, except texture, were determined at the beginning of the experiment in 2005. The percentages of clay, silt and sand were obtained from INTA (1974).

| Profundidad | cm | 0-5 | 5-10 | 10-20 | 20-27 | 27-57 | 57-82 | 82-100 |
|--------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|--------|
| Horizonte | | | A | | BA | Bt ₁ | Bt ₂ | BC |
| Arcilla | % (w/w) | | 22,1 | | 30,3 | 43,5 | 30,2 | 17,0 |
| Limo | | | 60,0 | | 56,8 | 47,5 | 56,4 | 65,5 |
| Arena | | | 17,9 | | 12,9 | 9,0 | 13,4 | 17,5 |
| DAP | Mg m ⁻³ | 1,16 | 1,31 | 1,34 | 1,35 | 1,38 | 1,32 | 1,19 |
| CCa | % (w w ⁻¹) | 29,8 | | 27,4 | 27,8 | 29,3 | 30,0 | 27,6 |
| PMP | | 9,8 | | 10,4 | 11,3 | 16,6 | 17,3 | 10,6 |
| Macroporos | % (m ³ m ⁻³) | 16,1 | 12,3 | 10,9 | | | | |
| Mesoporos | | 5,2 | 4,5 | 5,1 | | | | |
| Microporos | | 34,2 | 32,9 | 32,4 | | | | |
| CAU | Mm | 14,4 | | 34,0 | 15,6 | 52,6 | 41,7 | 36,5 |
| pH _{agua} | 1:2,5 | 5,7 | 5,8 | 5,9 | | | | |
| CE | dS m ⁻¹ | 0,186 | 0,110 | 0,111 | | | | |
| C | g kg ⁻¹ | 21,1 | 15,1 | 13,3 | | | | |
| Nt | g kg ⁻¹ | 1,82 | 1,30 | 1,15 | | | | |
| P | mg kg ⁻¹ | 14,9 | 10,6 | 7,8 | | | | |

DAP: densidad aparente; CCa: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; CAU: capacidad de agua útil; CE: conductividad eléctrica; C: carbono orgánico; Nt: nitrógeno total; P: fósforo extractable.

estos cilindros, se construyeron curvas de retención hídrica usando mesas de tensión con placas porosas de yeso. Las succiones ejercidas con columnas de agua fueron de 5 y 20 kPa. Para ello, previamente se saturaron las muestras durante 24 h con agua destilada bajo vacío y se sometieron a cada tensión durante 24 h (Bezerra de Oliveira, 1968). Luego se secaron a 105 °C. Posteriormente, se determinó la DAP por el método del cilindro (Burke *et al.*, 1986). La retención de agua en el suelo fue calculada como humedad volumétrica a cada tensión utilizando la DAP para su conversión, y la porosidad total de cada muestra a partir de la siguiente fórmula:

$$PT = \frac{DAP}{DAP_r} \times 100$$

DAP = densidad aparente (Mg m⁻³)

DAP_r = densidad de la fase sólida equivalente a 2,6 Mg m⁻³.

Luego se calculó la distribución del tamaño de los poros entre la tensión *h* (m) y el diámetro de poros ϕ (μm) (Hillel, 1980):

$$h(m) = 30 / \phi(\mu m)$$

De esta manera, se obtuvo la cantidad de poros en porcentaje separados en tres intervalos. El porcentaje de microporos (<15 μm) equivale a la humedad volumétrica de 20 kPa, el porcentaje de mesoporos (entre 15 y 60 μm) surge de restar el valor de humedad volumétrica a 20 kPa al valor de humedad volumétrica a 5 kPa y el porcentaje de macroporos (> 60 μm) surge de restar el valor de humedad volumétrica a 5 kPa al valor de porosidad total.

Se determinó la EE por tamizado en agua por el método de Douglas & Goss (1982) modificado, para ello se tomaron muestras de la zona adyacente a los cilindros para la profundidad de 0-5 cm. Se tamizaron en agua 10 g de agregados de 1-2 mm sobre un tamiz de 0,5 mm. Para el cálculo del índice de EE se utilizó el procedimiento de Kemper (Kemper, 1965),

$$EE = \frac{\text{Peso seco agregados sobre tamiz (<0,5 mm)}}{\text{Peso seco agregados (1-2 mm)}} \times 100$$

Considerando los siguientes intervalos de EE: inestable (<20%), moderadamente estable (20-40%) y estable (>40%).

Además, se extrajeron muestras disturbadas para las determinaciones de COS por combustión húmeda con el método de Walkley-Black (Page, 1982) y C lábil por fraccionamiento densimétrico (Cs), (Richter *et al.*, 1975). Los resultados obtenidos para COS y Cs en cada fecha de muestreo se expresaron en cantidad para cada espesor debido a que cuando se los analizó como concentración (datos no mostrados) no existieron diferencias entre tratamientos en dichas variables. Como la inclusión de DAP en el cálculo de la cantidad de COS y Cs produjo diferencias entre tratamientos, los resultados estuvieron referidos a diferentes masas de suelo, a pesar de compararse las mismas profundidades. Por ello, con el objeto de anular el efecto de la variación DAP sobre los resultados, se analizó la evolución de las 2 variables edáficas referida a la misma masa de suelo durante todo el período de estudio, eligiendo la menor masa de suelo obtenida del conjunto de datos del período completo (2.200 Mg ha⁻¹).

Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de variancia siguiendo el procedimiento PROC GLM de SAS (SAS, 2001), previas pruebas de homogeneidad de variancias y normalidad. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de comparación de medias de Duncan (p<0,05). Se realizaron análisis de regresión simple para explicar la relación entre algunas variables con el procedimiento REG de SAS. Cuando se analizó el comportamiento de las variables en el tiempo, debido a que las mediciones eran independientes, se siguió el procedimiento PROC GLM de SAS (SAS, 2001), utilizando el modelo de parcelas divididas, correspondiendo la parcela mayor a cada CC y la subparcela al momento analizado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas

Los CC utilizados en la secuencia soja-maíz no produjeron cambios en los valores medios de DAP del espesor 0-5 y 5-10 cm en ninguna de las fechas analizadas (Tabla 2). En cosecha de maíz se observó un pequeño aumento (≈ 5%) en el espesor 0-5 cm de la situación fertilizada con respecto a la no fertilizada (1,10 vs 1,05 Mg ha⁻¹, respectivamente) (p<0,05). Esto podría atribuirse al tránsito adicional en las parcelas fertilizadas. En el espesor 10-20 cm, a la cosecha de soja, se observó que la secuencia que incluyó nabo forrajero redujo la DAP en 6% (1,28 Mg m⁻³) con respecto a los tratamientos testigo, colza, vicia, ray grass, cebada y cebadilla (1,36 Mg m⁻³), los cuales no se diferenciaron entre sí. También, Sasal & Andriulo (2005), observaron un aumento en la porosidad total luego de la introducción de nabo forrajero y que su efecto no superaba los 23 cm de profundidad. Se confirmó el efecto positivo del sistema radical de nabo forrajero sobre el espacio poroso total en la capa más profunda del horizonte A. Por otro lado, este efecto fue acumulativo, debido a que la producción de biomasa aérea en 2006 fue insignificante, comparándola con la de 2005 (5.437 y 1.293 kg MS ha⁻¹, respectivamente).

En todas las profundidades analizadas, la proporción de macroporos más mesoporos obtenidos (> 12%) (Tabla 3 y 4), estuvo en concordancia con los valores de DAP, corroborando la ausencia de compactación (Topp *et al.*, 1997). El maíz fertilizado a cosecha redujo la macroporosidad en un 17% con respecto al no fertilizando (19,9 vs 23,9%, respectivamente), (p<0,05), sin que estos valores resultaran limitantes para el intercambio de fluidos y la penetración radical. Para explicar estos resultados, puede utilizarse la misma hipótesis que para DAP en relación al tránsito adicional en el maíz fertilizado. La introducción de los CC no produjo cambios en la distribución de macro y mesoporos, excepto en los espesores 10-20 cm a cosecha de soja para macroporos y 0-5 cm al secado 2005 para

mesoporos, respectivamente (Tabla 3 y 4). A la cosecha de soja, los resultados estarían demostrando la macroposidad residual de cada tratamiento luego de un período gobernado por lluvias intensas (831 mm durante el ciclo del cultivo de soja), que degradaron un posible efecto estructurante de los CC del ciclo 2006. Además, luego de colza hubo menor macroporosidad que luego de nabo forrajero, ave-

na-vicia y avena, sin diferencias entre éstas últimas. Al secado 2005, el sistema radical superficial de colza (espesor 0-5 cm) redujo significativamente la cantidad de mesoporos con respecto a nabo forrajero, avena, cebadilla y testigo, pero sin diferencia significativas entre estos últimos ($p < 0,05$). Colza podría presentar raíces con diámetros predominantes superiores al de los mesoporos.

Tabla 2. Valores medios de densidad aparente del suelo (DAP) para cada tratamiento en tres espesores y tres momentos de evaluación: secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05), cosecha de maíz (CM) y cosecha de soja (CS).

Table 2. Mean values of bulk density ($Mg\ m^{-3}$) for each treatment in three soil layers and three evaluation moments during the experiment: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM) and soybean harvest (CS).

| | Cd | Av | Ce | Rg | Av-V | Vi | Co | Nf | T |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| <i>DAP ($Mg\ m^{-3}$)</i> | | | | | | | | | |
| Espesor 0-5 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 1,03 a | 1,15 a | 1,06 a | 1,05 a | 1,13 a | 1,17 a | 1,05 a | 1,12 a | 1,09 a |
| CM | 1,14 a | 1,08 a | 1,17 a | 1,09 a | 1,02 a | 1,02 a | 1,01 a | 1,08 a | 1,10 a |
| CS | 1,16 a | 1,21 a | 1,11 a | 1,13 a | 1,09 a | 1,13 a | 1,10 a | 1,05 a | 1,13 a |
| Espesor 5-10 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 1,31 a | 1,34 a | 1,35 a | 1,35 a | 1,33 a | 1,37 a | 1,32 a | 1,35 a | 1,35 a |
| CM | 1,28 a | 1,27 a | 1,28 a | 1,30 a | 1,29 a | 1,31 a | 1,27 a | 1,25 a | 1,25 a |
| CS | 1,29 a | 1,33 a | 1,30 a | 1,36 a | 1,33 a | 1,30 a | 1,29 a | 1,27 a | 1,29 a |
| Espesor 10-20 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 1,30 a | 1,33 a | 1,35 a | 1,34 a | 1,34 a | 1,34 a | 1,33 a | 1,32 a | 1,34 a |
| CM | 1,35 a | 1,28 a | 1,37 a | 1,28 a | 1,36 a | 1,24 a | 1,35 a | 1,31 a | 1,32 a |
| CS | 1,34 ab | 1,31 bc | 1,35 ab | 1,38 a | 1,32 bc | 1,35 ab | 1,35 ab | 1,28 c | 1,36 ab |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Cb: Cebadilla, Av: Avena, Ce: Cebada, Rg: Ray Grass, Av-V: Avena-Vicia, Vi: Vicia, Co: Colza, Nf: Nabo forrajero, T: Testigo.

Different letters within the same line indicate significant differences among treatments ($p < 0,05$). Cb: rescue grass, Av: oats, Ce: barley, Rg: ryegrass, Av-V: oats+vetch, Vi: vetch, Co: rape, Nf: forage radish, T: control.

Tabla 3. Porcentaje de macroporos para cada tratamiento en tres espesores de suelo y tres momentos de evaluación: secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05), cosecha de maíz (CM) y cosecha de soja (CS).

Table 3. Percentage of macropores for each treatment in three soil layers and three evaluation moments during the experiment: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM) and soybean harvest (CS).

| | Cd | Av | Ce | Rg | Av-V | Vi | Co | Nf | T |
|-----------------------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|--------|--------|----------|
| <i>Macroporos (%)</i> | | | | | | | | | |
| Espesor 0-5 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 24,6 a | 14,2 a | 16,0 a | 20,5 a | 17,0 a | 15,3 a | 19,7 a | 11,5 a | 16,3 a |
| CM | 20,1 a | 20,9 a | 16,4 a | 18,0 a | 23,8 a | 25,3 a | 26,3 a | 22,5 a | 20,6 a |
| CS | 14,9 a | 14,3 a | 19,0 a | 17,3 a | 18,6 a | 17,7 a | 18,1 a | 21,5 a | 16,8 a |
| Espesor 5-10 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 9,3 a | 9,0 a | 6,6 a | 8,5 a | 11,7 a | 7,8 a | 7,4 a | 8,5 a | 8,7 a |
| CM | 14,0 a | 14,2 a | 14,3 a | 13,8 a | 13,5 a | 12,7 a | 13,9 a | 15,3 a | 15,7 a |
| CS | 13,8 a | 12,3 a | 15,0 a | 12,6 a | 12,7 a | 14,4 a | 13,0 a | 15,0 a | 15,0 a |
| Espesor 10-20 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 10,2 a | 8,7 a | 7,5 a | 8,7 a | 9,2 a | 8,3 a | 10,0 a | 9,2 a | 8,1 a |
| CM | 10,5 a | 13,8 a | 9,3 a | 13,4 a | 10,3 a | 15,3 a | 12,1 a | 12,6 a | 11,8 a |
| CS | 11,8 abc | 13,9 cd | 10,9 ab | 10,9 ab | 13,5 bcd | 11,2 ab | 10,5 a | 14,7 d | 12,1 abc |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Cb: Cebadilla, Av: Avena, Ce: Cebada, Rg: Ray Grass, Av-V: Avena-Vicia, Vi: Vicia, Co: Colza, Nf: Nabo forrajero, T: Testigo.

Different letters within the same line indicate significant differences among treatments ($p < 0,05$). Cb: rescue grass, Av: oats, Ce: barley, Rg: ryegrass, Av-V: oats+vetch, Vi: vetch, Co: rape, Nf: forage radish, T: control.

Tabla 4. Porcentaje de mesoporos para cada tratamiento en tres espesores de suelo y tres momentos de evaluación: secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05), cosecha de maíz (CM) y cosecha de soja (CS).
Table 4. Percentage of mesopores for each treatment at three soil layers and three evaluation moments during the experiment: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM) and soybean harvest (CS).

| | Av | Ce | Rg | Av-V | Vi | Co | Nf | T |
|----------------------|----------|-----------|--------|---------|-----------|--------|----------|--------|
| <i>Mesoporos (%)</i> | | | | | | | | |
| Espesor 0-5 cm | | | | | | | | |
| CC-05 | 6,43 bcd | 5,14 abcd | 4,9 ab | 4,49 ab | 5,44 abcd | 3,49 a | 6,01 bcd | 7,28 d |
| CM | 5,0 a | 3,8 a | 5,6 a | 5,0 a | 4,7 a | 4,4 a | 4,7 a | 4,7 a |
| CS | 3,9 a | 4,8 a | 4,8 a | 4,6 a | 4,3 a | 5,6 a | 5,0 a | 5,6 a |
| Espesor 5-10 cm | | | | | | | | |
| CC-05 | 5,5 a | 4,0 a | 5,1 a | 4,4 a | 4,7 a | 6,3 a | 4,0 a | 4,9 a |
| CM | 4,4 a | 4,6 a | 4,6 a | 4,8 a | 4,4 a | 4,6 a | 5,8 a | 4,4 a |
| CS | 4,1 a | 4,0 a | 3,5 a | 4,0 a | 3,9 a | 4,7 a | 4,2 a | 4,3 a |
| Espesor 10-20 cm | | | | | | | | |
| CC-05 | 5,3 a | 5,6 a | 5,1 a | 4,3 a | 4,7 a | 5,7 a | 4,6 a | 4,9 a |
| CM | 3,5 a | 4,8 a | 4,6 a | 3,7 a | 4,4 a | 4,5 a | 5,0 a | 4,4 a |
| CS | 4,0 a | 4,2 a | 3,8 a | 3,9 a | 3,9 a | 4,8 a | 4,1 a | 3,9 a |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Cb: Cebadilla, Av: Avena, Ce: Cebada, Rg: Ray Grass, Av-V: Avena-Vicia, Vi: Vicia, Co: Colza, Nf: Nabo forrajero, T: Testigo

Different letters within the same line indicate significant differences among treatments ($p < 0,05$). Cb: rescue grass, Av: oats, Ce: barley, Rg: ryegrass, Av-V: oats+vetch, Vi: vetch, Co: rape, Nf: forage radish, T: control.

Los valores medios de microporos fueron de 33,6; 32,8 y 32,7%, para los espesores 0-5, 5-10 y 10-20 cm, respectivamente, para todas las fechas evaluadas. El tamaño de poros $< 15 \mu\text{m}$ es más dependiente de la textura y del contenido de MOS que los tamaños de poros mayores y, por lo tanto, está poco influido por los cambios provocados por factores externos que actúan sobre el suelo, como precipitaciones, labranzas y actividad biológica.

Los resultados obtenidos de EE son frecuentemente encontrados en los sistemas de cultivo bajo SD con predominio de macroagregados moderadamente estables bajo maíz e inestables bajo soja (Andriulo *et al.*, 2008), (Tabla 5). Existió efecto de tratamientos solamente en el secado 2005: avena (37,9%) que elevó en un 60% la EE con respecto a cebada, vicia y testigo, sin diferencias entre estos (23,6%). El resto de los tratamientos presentaron un

valor medio de 30,5%. Estos resultados pueden atribuirse a diferencias en la actividad rizosférica entre especies y/o a diferentes biomásas de raíces que intervienen en la estabilización de los agregados. En las fechas evaluadas restantes, las precipitaciones, ocurridas en momentos coincidentes con los aportes de los cultivos, pueden haber impactado negativamente sobre la posible diferencia entre tratamientos, considerando que la EE fue determinada a 0-5 cm. El incremento en la estabilidad de agregados está relacionado con la descomposición de los residuos que ingresan al suelo. Sin embargo, en años muy húmedos este incremento puede no registrarse (Abiven *et al.*, 2009).

Carbono total y carbono lábil

Los cambios en COS producidos por los CC ocurrieron en las cosechas de maíz y soja a 0-5 cm y en el secado

Tabla 5. Porcentaje de estabilidad estructural del suelo (EE) en el espesor 0-5 cm para los diferentes tratamientos con cultivos de cobertura en cuatro fechas de muestreo: secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05), cosecha de maíz (CM), secado cultivos de cobertura 2006 (CC-06) y cosecha de soja (CS).

Table 5. Structural stability percentage at the 0-5 cm soil layer for each treatment with cover crops at four sampling dates: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM), 2006 cover crop killing (CC-06) and soybean harvest (CS).

| | Cd | Av | Ce | Rg | Av-V | Vi | Co | Nf | T |
|------------------------------------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| <i>Estabilidad estructural (%)</i> | | | | | | | | | |
| CC-05 | 31,3 ab | 37,9 b | 27,1 a | 28,7 ab | 31,8 ab | 22,2 a | 29,5 ab | 31,3 ab | 21,6 a |
| CM | 24,9 a | 29,1 a | 22,3 a | 20,8 a | 23,9 a | 26,0 a | 24,5 a | 23,9 a | 22,8 a |
| CC-06 | 22,2 a | 17,4 a | 19,1 a | 23,1 a | 17,9 a | 15,2 a | 22,8 a | 19,9 a | 22,2 a |
| CS | 18,9 a | 20,3 a | 20,9 a | 23,3 a | 17,0 a | 21,5 a | 19,6 a | 17,9 a | 15,6 a |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$); Cb: Cebadilla, Av: Avena, Ce: Cebada, Rg: Ray Grass, Av-V: Avena-Vicia, Vi: Vicia, Co: Colza, Nf: Nabo forrajero, T: Testigo.

Different letters within the same line indicate significant differences among treatments ($p < 0,05$); Cb: rescue grass, Av: oats, Ce: barley, Rg: ryegrass, Av-V: oats+vetch, Vi: vetch, Co: rape, Nf: forage radish, T: control.

2006 a 5-10 cm (Tabla 6). En el espesor 10-20 cm los CC no indujeron cambios en el stock de COS en ninguno de los tratamientos analizados. La fertilización nitrogenada del maíz no produjo efecto sobre los stocks de COS en ninguno de los momentos y en ninguna de las profundidades analizadas.

En el espesor 0-5 cm, los CC no produjeron diferencias significativas en el stock de COS en los dos momentos de secado. Este resultado pudo deberse a que la biomasa aérea de los CC no fue introducida en el suelo en dicho momento, debido al sistema de SD implementado. Esto se relaciona con la biomasa de raíces < 2 mm y sus metabolitos microbianos, que estuvieron incluidos en la determinación del contenido de COS, no fueron detectados, por su pequeña contribución al stock de COS, ubicada en el límite de detección del método.

A cosecha de maíz, luego de vicia hubo menor stock de COS respecto a cebadilla, avena, cebada y nabo forrajero (11,0 Mg ha⁻¹ vs 13,8 Mg ha⁻¹). Además, después de cebadilla presentó más stock de COS que posterior a ray grass, avena-vicia, colza y testigo (14,7 Mg ha⁻¹ vs 12,1 Mg ha⁻¹). Estos resultados pueden deberse a un efecto acumulado en los aportes de C desde el secado de los diferentes CC (diferencias en cantidad y calidad provenientes de sus biomasa radical y aérea) y a diferencias en la cantidad de

C aportado recientemente por la biomasa radical de maíz. En este sentido, el menor stock de COS obtenido luego de vicia con respecto al obtenido posterior a cebadilla, avena, cebada y nabo forrajero respondió en mayor medida al aporte proveniente del maíz que al proveniente de su residuo, ya altamente degradado. En el caso de ray grass, el COS no se diferenció de vicia, debido a la gran reducción en el rendimiento de maíz luego de ray grass por la menor disponibilidad de N edáfico (Restovich & Andriulo, 2010).

En cosecha de soja, ninguno de los tratamientos que incluyeron CC se diferenciaron del testigo, excepto luego de avena que presentó un adicional en el stock de COS de 2,6 Mg ha⁻¹. Dentro de los tratamientos con CC, después de nabo forrajero se observó menor COS (10,7 Mg ha⁻¹) que luego de los tratamiento con avena, cebada, ray grass, vicia y su consociación (13,0 Mg ha⁻¹). El aporte proveniente de la biomasa de raíces de soja no difirió entre tratamientos, hecho asociado a que no hubo diferencia en la producción de biomasa aérea y rendimiento. Por lo tanto, las diferencias encontradas sobre los stocks de COS deberían interpretarse como el efecto adicional de diferentes aportes y su descomposición desde la implementación de los CC y durante toda la rotación.

En el espesor 5-10 cm del secado 2006, los resultados de COS mostraron claramente el efecto de los tra-

Tabla 6. Stock de carbono orgánico en tres espesores de suelo (COS) bajo diferentes tratamientos con cultivos de cobertura y en cuatro momentos de muestreo: secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05), cosecha de maíz (CM), secado cultivos de cobertura 2006 (CC-06) y cosecha de soja (CS).

Table 6. Soil organic carbon content in three soil layers under different treatments with cover crops and at four sampling dates: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM), 2006 cover crop killing (CC-06) and soybean harvest (CS).

| | Cd | Av | Ce | Rg | AVi | Vi | Co | Nf | T |
|-----------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| <i>COS (Mg ha⁻¹)</i> | | | | | | | | | |
| Espesor 0-5 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 11,4 a | 12,0 a | 12,4 a | 11,5 a | 12,6 a | 13,2 a | 11,9 a | 12,1 a | 10,9 a |
| CM | 14,7 c | 13,2 bc | 13,4 bc | 11,6 ab | 12,5 ab | 11,0 a | 11,9 ab | 13,7 bc | 12,5 ab |
| CC-06 | 12,0 a | 11,5 a | 12,9 a | 11,9 a | 11,3 a | 11,6 a | 10,6 a | 11,3 a | 11,7 a |
| CS | 12,2 abc | 13,9 c | 12,9 bc | 12,8 bc | 12,7 bc | 12,9 bc | 12,0 abc | 10,7 a | 11,3 ab |
| Espesor 5-10 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 10,7 a | 11,3 a | 11,8 a | 11,2 a | 10,9 a | 11,5 a | 11,1 a | 11,6 a | 11,0 a |
| CM | 10,8 a | 10,6 a | 11,1 a | 10,4 a | 10,2 a | 11,0 a | 10,8 a | 10,3 a | 10,3 a |
| CC-06 | 10,2 ab | 10,7 b | 10,8 b | 10,8 b | 10,2 ab | 10,9 b | 10,4 b | 9,8 ab | 9,1 a |
| CS | 9,8 a | 9,9 a | 10,2 a | 10,4 a | 10,1 a | 9,9 a | 9,9 a | 10,9 a | 10,0 a |
| Espesor 10-20 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 19,4 a | 18,8 a | 21,2 a | 19,3 a | 19,0 a | 20,0 a | 18,5 a | 19,4 a | 17,8 a |
| CM | 19,6 a | 19,4 a | 21,2 a | 18,6 a | 20,9 a | 18,4 a | 20,1 a | 18,3 a | 19,2 a |
| CC-06 | 18,7 a | 18,2 a | 20,1 a | 18,2 a | 19,2 a | 17,4 a | 19,0 a | 17,9 a | 18,3 a |
| CS | 18,7 a | 18,1 a | 18,3 a | 18,8 a | 16,9 a | 18,2 a | 18,4 a | 18,7 a | 18,6 a |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$); Cb: Cebadilla, Av: Avena, Ce: Cebada, Rg: Ray Grass, Av-V: Avena-Vicia, Vi: Vicia, Co: Colza, Nf: Nabo forrajero, T: Testigo.

Different letters within the same line indicate significant differences among treatments ($p < 0,05$); Cb: rescue grass, Av: oats, Ce: barley, Rg: ryegrass, Av-V: oats+vetch, Vi: vetch, Co: rape, Nf: forage radish, T: control.

tamientos que incluyeron CC con respecto al que no lo incluyó en 5 sobre 8 comparaciones. Así, luego de gramíneas (avena, cebada, ray grass) vicia y colza hubo 1,6 Mg COS ha⁻¹ adicionales que después del testigo. Evidentemente, estas diferencias pueden ser atribuidas al aporte de los sistemas radicales de los diferentes CC acumulados desde su secado en 2005.

Los CC no afectaron los stocks de Cs en ninguna fecha de muestreo ni en las profundidades analizadas (Tabla 7). La fertilización nitrogenada del maíz aumentó levemente su stock en 0,39 Mg ha⁻¹ con respecto a los tratamientos no fertilizados en cosecha de maíz. Dentro de cada tratamiento, los stocks de Cs resultaron mucho más variables (entre 19 y 45%) que los stocks de COS (entre 6 y 15%) para todas las fechas y profundidades analizadas, hecho que impidió detectar diferencias estadísticas con Cs. Sin embargo, existieron correlaciones significativas ($p < 0,05$) en las mismas situaciones que se detectaron diferencias estadísticas en los stocks de COS.

En el secado 2005, única fecha en la que hubo efecto de tratamientos sobre la EE, éste pudo explicarse por medio de la variación en Cs en el espesor 0-5 cm ($r^2 = 0,54$; $p < 0,05$). Esto también fue reportado por Abiven *et al.*, (2009). La variación de COS y Cs en cosecha de maíz y de soja a 0-5 cm no explicó la variación de EE en cada fecha. Por otro lado, se observó una estrecha relación entre

el Cs a 0-5 cm y la biomasa aérea producida por los CC en 2006 ($R^2 = 0,61$, $p < 0,05$). Estos resultados están relacionados con los diferentes aportes de materia seca de los CC y, posiblemente, con efectos acumulativos de la rotación. Esto también fue observado por Scianca *et al.* (2006). A partir de los resultados obtenidos, vemos que si bien la variabilidad de Cs dentro de cada tratamiento resultó elevada, ello no impidió que se expresara su efecto sobre la EE y el COS en las fechas en que estas variables fueron significativas.

Evolución de las propiedades edáficas

El análisis estadístico de las variables analizadas en cada uno de los momentos elegidos evidenció efectos de tratamiento en momentos clave durante la implementación de la rotación soja-maíz con CC. Sin embargo, para evaluar la dinámica de dichas variables en el mismo período fue necesario utilizar otro modelo de análisis estadístico y, por ello, se utilizó un análisis en el tiempo. Este análisis, al tomar el conjunto de datos provenientes de todos los tratamientos (incluyendo al testigo) para cada fecha analizada, resultó muy sensible para captar diferencias entre momentos (inicio, secados CC y cosechas de soja y maíz) en todas las variables analizadas, y entre tratamientos solamente para la variable COS.

Tabla 7. Stock de carbono orgánico lábil (Cs) en tres espesores de suelo bajo diferentes tratamientos con cultivos de cobertura y en cuatro momentos de muestreo: secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05), cosecha de maíz (CM), secado cultivos de cobertura 2006 (CC-06) y cosecha de soja (CS).

Table 7. Soil labile carbon content in three soil layers under different treatments with cover crops and at four sampling dates: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM), 2006 cover crop killing (CC-06) and soybean harvest (CS).

| | Cd | Av | Ce | Rg | Av-V | Vi | Co | Nf | T |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Cs (Mg ha⁻¹)</i> | | | | | | | | | |
| Espesor 0-5 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 1,8 a | 2,2 a | 1,9 a | 1,6 a | 2,2 a | 1,6 a | 1,9 a | 1,8 a | 1,8 a |
| CM | 2,3 a | 1,9 a | 2,2 a | 1,6 a | 1,8 a | 1,6 a | 1,6 a | 2,3 a | 1,9 a |
| CC-06 | 2,0 a | 1,8 a | 2,2 a | 2,2 a | 2,0 a | 2,3 a | 1,7 a | 1,7 a | 1,7 a |
| CS | 1,8 a | 2,5 a | 1,9 a | 2,0 a | 1,7 a | 2,0 a | 1,9 a | 1,8 a | 1,9 a |
| Espesor 5-10 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 0,9 a | 0,9 a | 1,0 a | 0,9 a | 0,8 a | 0,8 a | 0,8 a | 0,7 a | 0,9 a |
| CM | 0,9 a | 0,9 a | 0,8 a | 0,9 a | 1,1 a | 0,9 a | 0,9 a | 0,9 a | 0,8 a |
| CC-06 | 1,1 a | 1,1 a | 1,1 a | 1,1 a | 1,0 a | 1,0 a | 0,9 a | 0,8 a | 0,8 a |
| CS | 0,8 a | 0,9 a | 0,9 a | 0,8 a | 0,7 a | 0,8 a | 0,9 a | 0,8 a | 0,7 a |
| Espesor 10-20 cm | | | | | | | | | |
| CC-05 | 1,3 a | 1,3 a | 1,2 a | 1,4 a | 1,1 a | 1,5 a | 1,2 a | 1,2 a | 1,2 a |
| CM | 1,3 a | 1,4 a | 1,5 a | 1,3 a | 1,4 a | 1,4 a | 1,6 a | 1,3 a | 1,3 a |
| CC-06 | 1,6 a | 1,4 a | 1,4 a | 1,4 a | 1,5 a | 1,4 a | 1,5 a | 1,2 a | 1,4 a |
| CS | 1,4 a | 1,1 a | 1,4 a | 1,3 a | 1,0 a | 1,3 a | 1,2 a | 1,2 a | 1,1 a |

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$); Cb: Cebadilla, Av: Avena, Ce: Cebada, Rg: Ray Grass, Av-V: Avena-Vicia, Vi: Vicia, Co: Colza, Nf: Nabo forrajero, T: Testigo.

Different letters within the same line indicate significant differences among treatments ($p < 0,05$); Cb: rescue grass, Av: oats, Ce: barley, Rg: ryegrass, Av-V: oats+vetch, Vi: vetch, Co: rape, Nf: forage radish, T: control.

A la cosecha de maíz, su sistema radical, generó porosidad adicional en el horizonte A1, la cual tendió a desaparecer hacia la cosecha de soja (Fig. 2). Estos cambios fueron más importantes a nivel de los macroporos y en el espesor 0-5 cm y, secundariamente, a nivel de los mesoporos (Fig. 3).

Los valores medios de EE observados en el secado 2005 y en la cosecha de maíz fueron moderadamente estables y a medida que se produjeron períodos de lluvias intensas hacia la cosecha de soja, dichos valores resultaron inestables (Fig. 4). En efecto, los valores medios de EE encontrados mostraron el resultado de la interacción entre los factores de estructuración provocados por los cultivos y los de degradación estructural provocados por las lluvias en la superficie del suelo.

Tanto la macroporosidad como la EE a 0-5 cm resultaron muy sensibles en el corto plazo. Sin embargo, mientras los valores de EE mostraron un cambio neto entre un sistema de poros medianamente estable y otro inestable, los valores de macroporosidad, a pesar que su evolución tendió a la disminución, no evidenciaron una limitación para la penetración radical e intercambio de fluidos. Por lo tanto, la EE puede indicar más tempranamente la dinámica de la macroporosidad, bajo escenarios regidos por lluvias intensas, en estos suelos.

Los Argiudoles pampeanos presentan un bajo grado de regeneración estructural por fisuración (Sasal *et al.*, 2006), siendo los factores biológicos los de mayor peso

para su regeneración. Por lo tanto, mientras la estabilidad estructural oscile entre moderadamente estable e inestable será difícil que un nivel elevado de macroporosidad pueda mantenerse en el corto plazo.

Los CC aumentaron el stock de COS hacia el secado 2005 en $\sim 3 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Fig. 5). Este se mantuvo durante la cosecha de maíz, y disminuyó en una magnitud similar durante la fase CC-soja, volviendo al valor inicial a la cosecha de soja. Esta evolución respondió a: 1) diferencias en los aportes anuales de C entre fases (los aportes medios de biomasa aérea estimados fueron $5,4 \pm 0,4$ y $3,5 \pm 0,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para las fases CC-Maíz y CC-Soja, respectivamente y $3,8 \pm 0,2$ y $1,8 \pm 0,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para las fases Maíz y Soja sin CC), 2) diferencias de precipitaciones entre fases (658 y 1.286 mm para CC-Maíz y CC-Soja, respectivamente).

El stock de Cs mostró una tendencia al aumento hacia el segundo secado para luego volver a la situación inicial (Fig. 5). Esto podría deberse a pequeños efectos acumulativos de fracciones lábiles durante los períodos de aporte, que pueden ser fácilmente perdidos durante épocas lluviosas. Además, los picos alcanzados y su mantención en los stocks de COS y Cs no coincidieron en el tiempo: COS lo alcanzó al secado 2005 y lo mantuvo hasta la cosecha de maíz, mientras Cs lo alcanzó al secado 2006 y luego se perdió. Esto podría estar relacionado con la mayor variabilidad registrada en Cs que no permitió visualizar pequeños cambios de stock entre fechas.

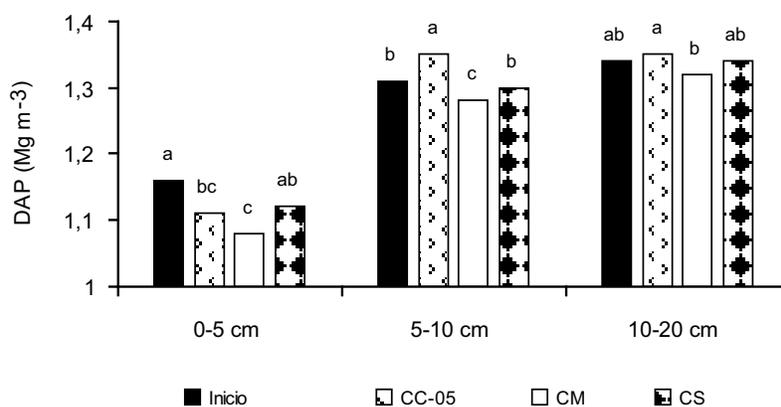


Figura 2. Evolución de la densidad aparente (DAP) durante la introducción de cultivos de cobertura en la secuencia soja-maíz. Letras diferentes en el mismo espesor de suelo, indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre momentos de muestreo: inicio del ensayo, secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05); cosecha de maíz (CM) y cosecha de soja (CS).

Figure 2. Soil bulk density evolution during the inclusion of cover crops in the soybean-corn crop sequence. Different letters within the same soil layer represent significant differences ($p < 0.05$) among evaluation moments: beginning of the experiment (Inicio), 2005 cover crop killing (CC-05); corn harvest (CM) and soybean harvest (CS).

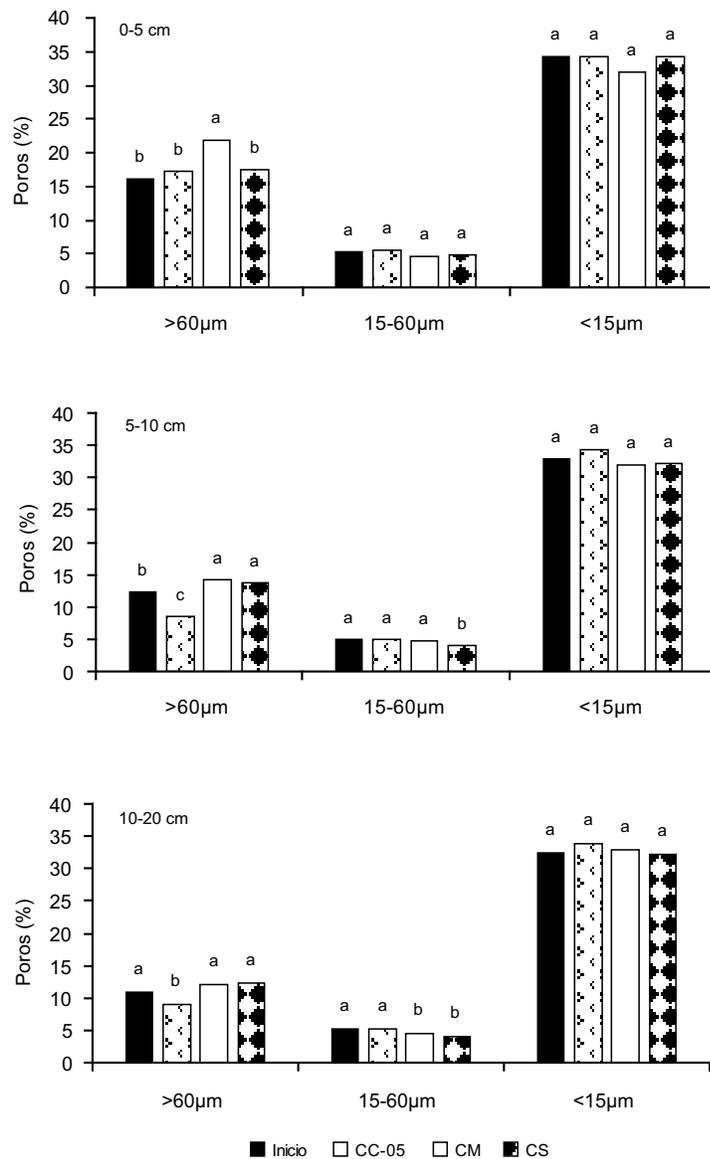


Figura 3. Evolución de la distribución del tamaño de poros durante la introducción de cultivos de cobertura en la secuencia soja-maíz. Letras diferentes en el mismo espesor de suelo indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre momentos de muestreo: inicio del ensayo, secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05); cosecha de maíz (CM) y cosecha de soja (CS).

Figure 3. Evolution of pore size distribution during the introduction of cover crops in the soybean-corn crop sequence. Different letters within the same soil layer mean significant differences ($p < 0.05$) between times of evaluation: beginning of the experiment (Inicio), 2005 cover crop killing (CC-05); corn harvest (CM) and soybean harvest (CS).

La rotación soja-maíz que incluyó CC tuvo un efecto significativo sobre el stock de COS, excepto luego de avena-vicia, la cual no se diferenció con el testigo (si se diferenció $p < 0,10$) (Fig. 6). En promedio, los CC aumentaron en $1,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ con respecto a la rotación soja-maíz sin CC ($36,9$ vs $35,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). Además,

los tratamientos que incluyeron cebada y vicia produjeron $0,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ adicionales con respecto a la rotación con los CC restantes. Varios autores reportaron que el uso de CC en las rotaciones agrícolas aumenta el COS (Franzluebbers, 2005; Carneiro Amado *et al.*, 2006; Sainju *et al.*, 2006).

Figura 4. Relación entre la estabilidad estructural del suelo (EE) y las precipitaciones acumuladas durante el ensayo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre momentos de muestreo: secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05); cosecha de maíz (CM); secado cultivos de cobertura 2006 (CC-06) y cosecha de soja (CS).

Figure 4. Relationship between soil structural stability and cumulative rainfall throughout the experiment. Different letters mean significant differences ($p < 0.05$) between times of evaluation: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM), 2006 cover crops killing (CC-06) and soybean harvest (CS).

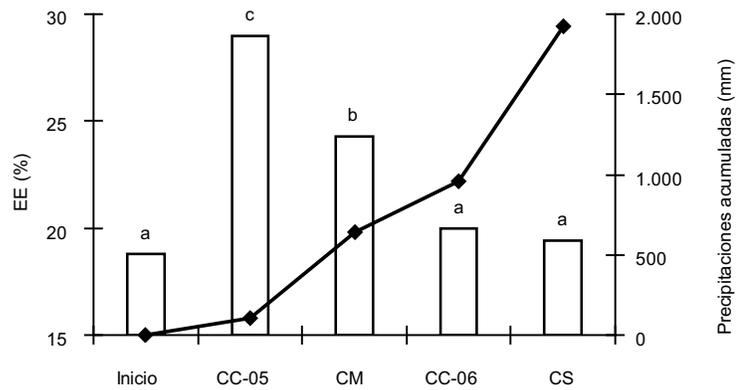


Figura 5. Evolución del carbono orgánico del suelo (COS) y carbono orgánico lábil (Cs) durante el ensayo. Letras diferentes entre barras (normal) y entre puntos (cursiva) significan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre momentos de muestreo; secado cultivos de cobertura 2005 (CC-05); cosecha de maíz (CM); secado cultivos de cobertura 2006 (CC-06) y cosecha de soja (CS).

Figure 5. Evolution of soil organic carbon (SOC) and labile carbon (Cs) throughout the experiment. Different letters between bars (normal) and between points (italics) mean significant differences ($p < 0.05$) between times of evaluation: 2005 cover crop killing (CC-05), corn harvest (CM), 2006 cover crops killing (CC-06) and soybean harvest (CS).

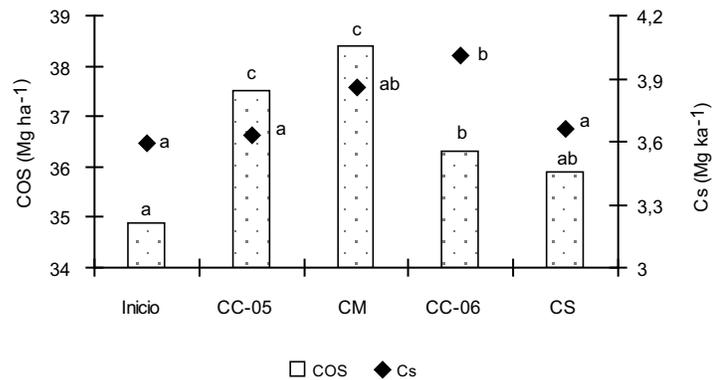
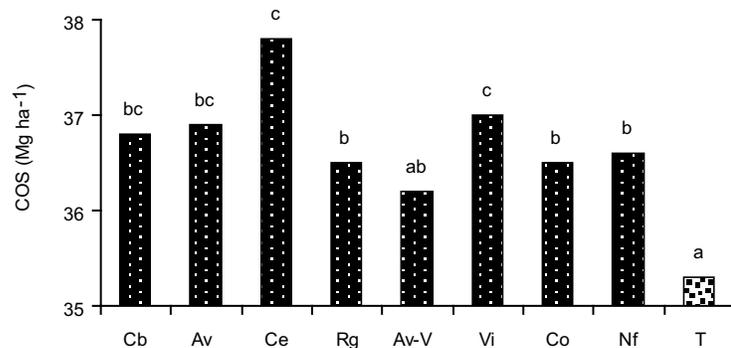


Figura 6. Valores medios de carbono orgánico del suelo (COS) para cada tratamiento. Letras diferentes significan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos; Cb: Cebadilla, Av: Avena, Ce: Cebada, Rg: Ray Grass, Av-V: Avena-Vicia, Vi: Vicia, Co: Colza, Nf: Nabo forrajero, T: Testigo.

Figure 6. Mean values of soil organic carbon (SOC) for each treatment. Different letters mean significant differences between treatments ($p < 0.05$); Cb: rescue grass, Av: oats, Ce: barley, Rg: ryegrass, Av-V: oats+vetch, Vi: vetch, Co: rape, Nf: forage radish, T: control.



CONCLUSIONES

Los CC introdujeron mejoras temporarias en las propiedades físicas y químicas edáficas, que estuvieron relacionadas con los momentos de aporte de C al sistema y condicionadas por los períodos de lluvias intensas. Entre

las propiedades físicas, el nabo forrajero se destacó como generador de porosidad en la base del horizonte A1 (tecnología de descompactación biológica subsuperficial de corto plazo) y avena como estabilizadora del sistema poroso. Entre las propiedades químicas, si bien el Cs se

comportó como el COS frente a la variación de biomasa de C aportado, registró variaciones de menor importancia que éste. El efecto acumulado de la rotación, mostró un mayor aporte de COS al sistema en presencia de CC, destacándose particularmente la avena. Por lo tanto, dentro de un manejo planificado de sistemas agrícolas, la utilización de CC tendría un efecto prometedor sobre la acumulación de Carbono en el largo plazo.

En base a los resultados obtenidos, resulta necesario seguir evaluando el efecto de los CC sobre las propiedades físicas y químicas del suelo en el mediano y largo plazo. Además, profundizar en nuevas mezclas para probar posibles efectos sinérgicos de las diferentes familias/especies sobre las propiedades del suelo en relación a las especies puras. Así, la mezcla de avena con nabo forrajero podría generar ambos beneficios: bio-porosidad y estabilidad del sistema poroso; esta consociación ya se encuentra bajo estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del Grupo Gestión Ambiental de Suelos y Aguas de la EEA Pergamino de INTA, por su colaboración en los trabajos de laboratorio y de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abiven, S; S Menasseri & C Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1-12.
- Álvarez, C; C Scianca; M Barraco & M Díaz Zorita. 2008. Impacto del manejo de cereales de cobertura invernal sobre propiedades edáficas y producción de soja. Pp. 424 en: XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Argentina.
- Andriulo, A & G Cordone. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la Región Pampeana Húmeda. Pp. 65-95 En: JL Panigatti; H Marelli; D Buschiazzo & R Gil (eds.). Siembra Directa. Hemisferio Sur.
- Andriulo, A; A Irizar; L García; L Hanuch & F Rimatori. 2008. Efecto de los monocultivos de soja y maíz sobre el aporte de carbono y algunas propiedades edáficas luego de 20 años bajo siembra directa. Pp. 338. En: XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Argentina.
- Basanta, MV; ML Ghiotti; JP Giubergia & E Lovera. 2010. Fracciones de carbono orgánico en un haplustol bajo sistemas de agricultura continua en la región central de Córdoba. Pp. 199. En: XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Bezerra de Oliveira, L. 1968. Determinação do macro e micro porosidade pela «mesa de tensão» em mostras de solo com estrutura indeformada. 3: 197-200.
- Burke, W; D Gabriels & J Bouma. 1986. Soil structure assessment. Pp Pages. In: W Burke; D Gabriels & J Bouma (eds.). A.A. Balkema. Rotterdam.
- Carneiro Amado, TJ; C Bayer; PC Conceição; E Spagnollo; B Costa de Campos & M da Veiga. 2006. Potential of carbon accumulation in no-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 35: 1599-1607.
- Cazorla, C; C Galarza; I Moreno & J Cisneros. 2010. Impacto del aporte de carbono de residuos en el carbono total y particulado y la estabilidad de agregados del suelo. Pp. 216. En: XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentino.
- Constantin, J; B Mary; G Aubrion; F Laurent; A Fontaine; P Kerveillant & N Beaudoin. 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agr. Ecosyst. Environ.* 135: 268-278.
- Cosentino, DJ; AO Costantini & C Galarza. 2008. Efectos del cultivo de cobertura y la fertilización sobre algunas propiedades de un argiudol pampeano y el rendimiento del cultivo de maíz. Pp. 7. En: XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Argentina.
- Douglas, JT & MJ Goss. 1982. Stability and organic matter of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil Till. Res.* 2: 155-175.
- Franzluebbers, AJ. 2005. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Soil Till. Res.* 83: 120-147.
- Hillel, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Pp 413. London Academic Press, Inc.
- Huggins, DR; RR Allmaras; CE Clapp; JA Lamb & GW Randall. 2007. Corn-soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 145-154.
- Irizar, A. 2010. Cambios en la reserva 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 de Magister Ciencia del Suelo. Universidad de Buenos Aires.
- Kemper, WD. 1965. Aggregate stability. Pp. 511-519. In: CA Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 1: Agronomy. Vol.9. Am. Soc. Agron. Inc. Madison.
- Lavado, R. 2006. La Región Pampeana: historia, característica y uso de sus suelos. Pp. 1-11. En: R Álvarez (ed.). Materia orgánica: Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Buenos Aires. Argentina.
- Liu, A; BL Ma & AA Bomke. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 2041-2048.
- Magdoff, F & R Weil. 2004. Soil organic matter in Sustainable Agriculture. Pp. 45-65. En: F Magdoff & R Weil (eds.). Soil Organic Matter Management Strategies.
- Metay, A; JA Alves Moreira; M Bernoux; T Boyer; JM Douzet; B Feigl; C Feller; F Maraux; R Oliver & E Scopel. 2007. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). *Soil Till. Res.* 94: 122-132.
- Monnier, G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 16: 327-400, 471-534.
- Page, A. 1982. Methods of soils analysis. Parts I and II. Pp Pages. En: A Page (ed.). American Society of Agronomy. Madison.
- Restovich, SB & AE Andriulo. 2010. Cultivos de cobertura como antecesores de maíz: dinámica de nitrógeno, agua y efecto sobre el rendimiento. Pp. 291. En: IX Congreso Nacional de Maíz. Simposio nacional de sorgo. Rosario. Santa Fe. Argentina.

- Restovich, SB; MC Sasal; AB Irizar; F Rimatori; ML Darder & AE Andriulo. 2005. Rotación con maíz vs. monocultivo de soja: efecto sobre los stocks de carbono y nitrógeno edáficos. Pp. 208. *En: VIII Congreso Nacional de Maíz*. Rosario. Santa Fe. Argentina.
- Rice, C; K Fabrizzi & P White. 2007. Benefits of soil organic carbon to Physical, Chemical and Biological. Pp. 155-162. *In: J Kimble; C Rice; D Reed; M S; R Follet & R Lal (eds.)*. Soil carbon management, Economic, Environmental and Societal Benefits. CRC Press Taylor & Francis. New York.
- Richter, M; IMizuno; S Aranguez & S Uriarte. 1975. Densimetric fractionation of soil organo-mineral complexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 26 112-123.
- 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 soil in Georgia, USA. *Soil Till. Res.* 63: 167-179.
- Sainju, UM; BP Singh; WF Whitehead & S Wang. 2006. Carbon Supply and Storage in Tilled and Nontilled Soils as Influenced by Cover Crops and Nitrogen Fertilization. *J. Environ. Qual.* 35: 1507-1517.
- SAS. 2001. SAS/STAT User's guide. SAS Institute Inc. 8.2. Cary, N.C.
- Sasal, MC & AE Andriulo. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L. (Nabo forrajero). *RIA.* 34: 131-150.
- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Scianca, C; C Álvarez; M Barraco; M Pérez & A Quiroga. 2006. Cultivos de cobertura en sistemas orgánicos. Aporte de carbono y dinámica de malezas. Pp. 370. *En: XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Salta-Jujuy. Argentina.
- Setter, S & W Horwath. 2004. Strategies for Managing Soil Organic Matter to Supply Plant Nutrients. Pp. 269-293. *In: F Magdoff & R Weil (eds.)*. Soil organic matter in Sustainable Agriculture.
- Topp, G; W Reynolds; F Cook; J Kirby & M Carter. 1997. Physical attributes of soil quality. Pp. 21-58. *In: E Gregorich & M Carter (eds.)*. Soil Quality for crop production and ecosystem health. Elsevier. Canada.
- Villamil, MB; GA Bollero; F Darmody; FW Simmons & DG Bullock. 2006. No-till corn/soybean systems including winter cover crops: effects on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1936-1944.