

CULTIVOS DE COBERTURA: EFECTOS SOBRE LA MACROPOROSIDAD Y LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE UN SUELO FRANCO-LIMOSO

MARÍA FLORENCIA VARELA^{1,2}; PATRICIA LILIA FERNÁNDEZ¹; GERARDO RUBIO^{1,2}
& MIGUEL ÁNGEL TABOADA^{1,2,3} *

1 Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía UBA, Av. San Martín 4453, C1417DSE - Ciudad Autónoma de Buenos Aires;

2 CONICET;

3 Instituto de Suelos Castelar. Las Cabañas y De Los Reseros s/n (1712) Villa Udaondo Castelar/Hurlingham. Buenos Aires.

* Autor para correspondencia: mtaboada@cni.inta.gov.ar

Recibido: 28-04-10

Aceptado: 25-02-11

RESUMEN

Los suelos franco-limosos manejados con siembra directa a menudo poseen porosidad estructural baja e inestable. Con el objetivo de determinar la capacidad de los cultivos de cobertura (CC) de mejorar la porosidad y estabilidad estructural de estos suelos se llevaron a cabo experimentos de campo y de invernáculo. Ambos tuvieron tratamientos con y sin CC (avena, *Avena sativa* L.), en rotación con soja (*Glicine max* L. Merr.). Luego de los CC se midieron densidad aparente (DA), el índice de inestabilidad estructural (IE) y en el ensayo de invernáculo además, se midió la evolución de la distribución de tamaño de poros (DTP). En ambos ensayos la introducción de CC no disminuyó la DA, aunque incrementó la estabilidad del suelo ($P < 0,05$), lo cual pudo deberse a los efectos tanto de las raíces como de los residuos de los CC. La DTP no presentó diferencias por efecto de los tratamientos, pero mostró variaciones temporales significativas ($P < 0,05$) que provocaron generación de meso (517,5%) y macroporosidad (52,7%) en respuesta a mecanismos abióticos que operaron en todos los tratamientos, como son los ciclos de humedecimiento y secado. Otros trabajos en suelos limosos de la región también muestran ausencia de respuesta a cambios en el manejo, por lo cual este trabajo confirmaría la escasa resiliencia en el corto plazo de la porosidad estructural en suelos franco limosos pampeanos.

Palabras clave. Propiedades físicas, porosidad estructural, agregación del suelo, avena, monocultivo de soja.

COVER CROPS: EFFECTS ON SOIL MACROPOROSITY AND SOIL STRUCTURAL STABILITY IN A SILT LOAM SOIL

ABSTRACT

No-till (NT) silt loam topsoils have often a low and unstable structural porosity. The objective of this study was to determine the capability of cover crops (CC) of improving the structural porosity and stability of silt loam soils under NT. Greenhouse and field experiments were carried out on a silt loam soil (Typic Argiudoll) with and without CC (oat, *Avena sativa* L.) in crop sequences with soybean (*Glicine max* L. Merr.). Soil bulk density (DA) and aggregate instability index (IE) were measured after the CC in both experiments. In the greenhouse experiment, soil pore size distribution (DTP) was measured. The use of CC did not change DA, but soil IE was significantly lower in crop sequences with CC ($P < 0.05$) both under field and greenhouse conditions. Stability increases were likely due to the effect of CC residues and root mass. No differences in DTP were found between treatments, although a significant effect of sampling date was observed ($P < 0.05$). Changes in DTP were due to significant increases in mesopore (517.5%) and macropore (52.7%) volumes. Such changes occurred in all the treatments, probably due to the soil wetting-drying cycles. The results found in this study agree with other studies carried out on silt loams in the same region, which also found a lack of effect of tillage practices on soil porosity. A low soil structural resilience of silt loam soils in the short-term is corroborated.

Key words. Soil physical properties, structural porosity, soil aggregation, oats, soybean monoculture.

INTRODUCCIÓN

Los suelos de textura franco-limosa son conspicuos en Pampa Ondulada de la Argentina (Senigaglia & Ferrari, 1993; INTA, 2010). En estos suelos se han documentado pérdidas de carbono orgánico causadas por la labranza convencional, lo que ha conducido a una extendida degradación estructural de su capa superficial (Taboada *et al.*, 1998; Taboada *et al.*, 2004; Sasal *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009). En los últimos años, la siembra directa (SD) pasó a ser el sistema de cultivo preponderante en la zona, lo cual significó un cambio en la pendiente de

degradación de los suelos. Sin embargo, la adopción de esta práctica no siempre ha representado una mejora en la calidad estructural de los suelos degradados (Taboada *et al.*, 1998; Micucci & Taboada, 2006; Sasal *et al.*, 2006; Strudley *et al.*, 2008; Álvarez *et al.*, 2009). La SD ha conducido, en algunos casos, a la formación de estructuras superficiales masivas, que muestran el desarrollo de compactación superficial (Taboada *et al.*, 1998; Cosentino & Pecorari, 2002), y de agregados y poros laminares (Barbosa *et al.*, 1999; Bonel *et al.*, 2005; Sasal *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009). Ello sucede especialmente en suelos en

los cuales prevalecen limos finos (2-20 μm) y en rotaciones con alta proporción de soja (*Glicine max* L. Merr.) (Sasal *et al.*, 2006). Se ha documentado también que la porosidad estructural de estos suelos raramente alcanza el umbral de 10% en volumen de suelo, necesario para evitar problemas en la penetración y oxigenación de las raíces (Taboada *et al.*, 1998; Micucci & Taboada 2006; Taboada *et al.*, 2008). La expansión de soja en forma de monocultivo puede comprometer la capacidad productiva de los suelos (Paruelo *et al.*, 2005), principalmente debido a la escasa cantidad de residuos que deja el cultivo, aún cuando es realizado bajo SD (Bathke & Blake, 1984). Sumado a ello, la ausencia de stand de plantas durante los meses invernales supone que afecta negativamente la estabilidad estructural de los suelos.

La recuperación de la estructura superficial en los suelos limosos degradados es uno de los principales desafíos tecnológicos a enfrentar en la región. Una de las alternativas es la incorporación de cultivos de cobertura (CC) invernales (Lal *et al.*, 2007). Estos cultivos permiten explorar, mediante sus raíces, nuevos volúmenes de suelo y generar la porosidad estructural faltante (Villamil *et al.*, 2006). Se espera que así mejore la estabilidad estructural mediante la incorporación de materia orgánica lábil, que actuaría como núcleo en la formación de macroagregados (Six *et al.*, 2000) y el entramado físico de raíces finas y pequeños agregados que daría lugar a la formación de agregados más grandes estables al agua (Oades, 1993; Denef *et al.*, 2002). Existen también mecanismos abióticos que pueden contribuir a la regeneración estructural de los suelos limosos. Estos mecanismos dependen principalmente de la capacidad de expansión-contracción del suelo durante los ciclos de humedecimiento y secado (H/S) (Dexter, 1988; Oades, 1993). Los suelos limosos no son completamente rígidos, sino que son capaces de sufrir cambios significativos de volumen y agrietamiento al secado (Barbosa *et al.*, 1999; Taboada *et al.*, 2008). Trabajando con suelos franco limosos, Taboada *et al.* (2004) hallaron que la regeneración estructural de los mismos fue el resultado de efectos de interacción entre los ciclos de H/S y la vegetación. El objetivo del trabajo fue evaluar la capacidad de los CC para mejorar en el corto plazo la porosidad estructural y la estabilidad estructural de suelos franco-limosos. La hipótesis de trabajo a poner a prueba es que es posible lograr mejoras en la calidad de la estructura y de la porosidad estructural luego de un ciclo de CC.

MATERIALES Y MÉTODOS

La hipótesis fue puesta a prueba mediante experimentos llevados a cabo en condiciones de campo y de invernáculo en suelo Argiudol Típico, franco limoso (25% arcilla y 61,4% limo, 2,78% carbono orgánico) de la Serie Hansen (INTA, 1972), el cual cubre gran superficie en el sudoeste de la provincia de Santa Fe.

Experimento a campo

El ensayo a campo se llevó a cabo en el establecimiento «El Casco» (S 33°18'23.3"; W 61°58' 2.3"). Todas las parcelas experimentales fueron cultivadas con soja durante el verano y tuvieron distinto manejo durante la época invernal: barbecho y CC. Los tratamientos fueron, entonces: a) Sj: soja-barbecho invernal; y b) Sj/CC: soja-cultivo de cobertura invernal. El diseño que se aplicó fue de parcelas al azar con 3 repeticiones. El cultivo de cobertura fue avena (*Avena sativa* L.) sembrada en el mes de abril y secada con herbicida glifosato en el mes de noviembre.

Se realizaron dos muestreos, el primero antes de la siembra del CC y el segundo al final del ciclo del mismo. Se tomaron muestras de densidad aparente (DA) (5 submuestras por parcela), en las profundidades 0-5 cm y en el intervalo de 5-20 cm. Se analizaron las diferencias de DA entre tratamientos, las cuales dado que se deben a cambios por manejo pueden ser atribuidas a variaciones de porosidad estructural (Dexter, 1988). Los valores de DA obtenidos a campo fueron relacionados al valor de densidad máxima (Dmáx) obtenida a partir del Test de Proctor (ASTM, 1982) y convertidos a valores de compactación relativa (CR). Los valores de CR se calcularon con la ecuación [1]:

$$CR = (DA / Dmáx) * 100 \quad [1]$$

En el segundo momento de muestreo se tomaron muestras no disturbadas desde los primeros 10 cm (dos submuestras por cada parcela) para determinar el índice de inestabilidad estructural (IE), según la metodología descrita por De Leenheer y De Boedt (Burke *et al.*, 1986). Según esta técnica, valores elevados de IE denotan baja estabilidad de agregados, debido a que se calcula el cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados.

Experimento en invernáculo

Un segundo estudio fue conducido en condiciones controladas a fin de determinar la evolución temporal de los parámetros físicos de suelo, así como también los efectos acumulados de las distintas rotaciones.

El suelo utilizado en el ensayo de invernáculo fue recolectado del mismo sitio donde se llevó a cabo el experimento de campo, a una profundidad entre 0-20 cm. Se tamizó (4 mm), se homogeneizó y colocó en macetas de 5 L de capacidad a razón de 3,5 kg por maceta. Previo al comienzo del ensayo se realizaron durante 120 días 6 ciclos de humedecimiento y secado a fin de asentar y estructurar el suelo. El ensayo simuló secuencias agrícolas que incluyen soja como cultivo principal, en rotación con avena como CC o en forma de monocultivo. A su vez se incorporaron dos tratamientos control: uno donde solo se desarrolló el CC y un testigo absoluto sin cultivo. Quedan así definidos los tratamientos descritos en la Figura 1: a) CC/Sj = CC - barbecho / soja; b) Sj = barbecho - barbecho / soja - ; c) CC = CC - barbecho / barbecho; y d) T = barbecho / barbecho (testigo sin cultivo). Con el objetivo de detectar efectos acumulados se realizaron dos ciclos de cultivos. En el primer ciclo se realizaron muestreos luego de cada cultivo, mientras que en el segundo sólo se realizó un muestreo luego de la cosecha de soja. Tanto las se-millas de avena como las de soja fueron pre-germinadas y luego sembradas en las macetas; después de 7 días fueron raleadas, quedando 5 plantas de

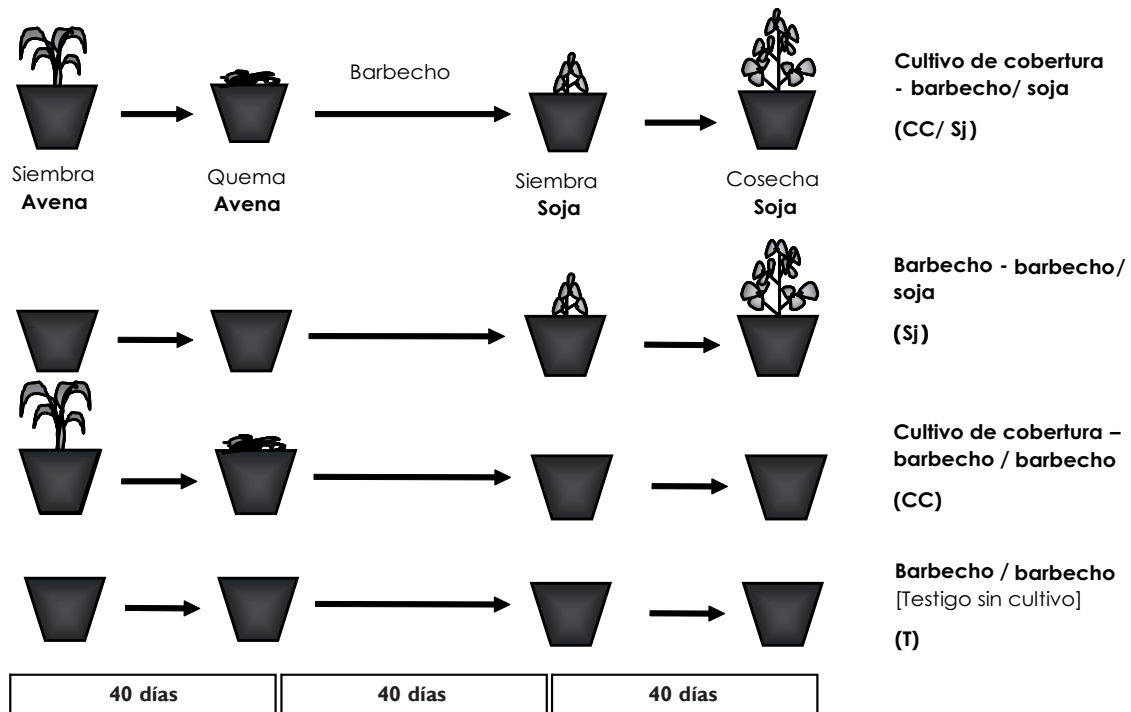


Figura 1. Esquema de los tratamientos del ensayo de invernáculo durante un ciclo. Cada secuencia fue repetida dos veces durante el experimento (dos ciclos).

Figure 1. Diagram of treatments during one cycle at the greenhouse experiment. Each sequence was repeated two times during the experiment (two cycles).

avena y 1 de soja por cada maceta. Las semillas de soja fueron inoculadas con *Bradyrhizobium japonicum*. Durante el período del ensayo se regó periódicamente a fin de mantener la humedad en el rango 60-90% de capacidad de campo. Es decir que, las macetas estuvieron sujetas a ciclos de H/S. El diseño de ensayo fue completamente aleatorizado con 4 repeticiones.

Se tomaron muestras de suelo intactas de la parte superficial de las macetas (muestreos destructivos), para determinar DA . A fin de determinar si las variaciones de DA corresponden a cambios de porosidad estructural, se midió también en muestras intactas la distribución de tamaño de poros (DTP) usando la olla de presión de Richards (Dane & Hopmans, 2002). Estos muestreos se realizaron para todos los tratamientos en cinco momentos: a) siembra de avena (comienzo del ensayo); b) secado de avena (40 días); c) siembra de soja (80 días); d) cosecha de soja (120 días, final del primer ciclo); y e) cosecha de soja (240 días, final del segundo ciclo). Se utilizó la ecuación [2] para calcular el diámetro (D) de los poros más pequeños drenados mediante una presión determinada (Carter & Ball, 1993)

$$D (\mu\text{m}) = 300 / \text{Presión (KPa)} \quad [2]$$

El volumen de agua removido entre dos tamaños de poros determinados equivale al espacio poroso para ese rango. Las

presiones utilizadas fueron 6, 20 y 30 KPa, correspondiendo a diámetros de 50, 15 y 10 μm , respectivamente. Los resultados se expresaron como porcentaje en volumen de suelo (cm^3 de poros / 100 cm^3 de suelo). Al final del ensayo se tomaron muestras para determinación del índice de IE descripto por De Leenheer y De Boodt (Burke *et al.*, 1986).

Análisis estadístico

La evolución temporal de las variables DA y DTP fue analizada mediante ANVA según medidas repetidas en el tiempo. Los resultados de IE fueron analizados mediante ANVA. En todos los casos, si existían diferencias significativas, las medias de los tratamientos se compararon con el test diferencia mínima significativa (LSD), $\alpha = 0,05$.

RESULTADOS

Experimento de campo

La variable DA fue medida en dos profundidades (0-5 y 5-20 cm) y analizada en forma independiente, consi-

derando la evolución en cada tratamiento y profundidad. En ninguna de las dos profundidades hubo interacción significativa «tratamiento x tiempo», por lo cual se analizaron los efectos principales (tratamiento y tiempo) para cada caso. El análisis temporal de la variable *DA* mostró distintos comportamientos según la profundidad evaluada. En la capa 0-5 cm, se manifestaron incrementos significativos de *DA* por efecto del tiempo: la *DA* aumentó desde $1,16 \pm 0,02 \text{ Mg m}^{-3}$ hasta $1,27 \pm 0,02 \text{ Mg m}^{-3}$ para el tratamiento Sj/CC y desde $1,19 \pm 0,02 \text{ Mg m}^{-3}$ hasta $1,21 \pm 0,03 \text{ Mg m}^{-3}$ para el tratamiento Sj. No hubo para esta profundidad efecto de los tratamientos. Sin embargo, la evolución de la *DA* en la capa subsuperficial 5-20 cm mostró una respuesta diferente. En este caso no hubo efecto del tiempo, aunque sí de los tratamientos, pues Sj/CC presentó una *DA* significativamente menor que Sj. La *DA* aumentó desde $1,22 \pm 0,03 \text{ Mg m}^{-3}$ hasta $1,23 \pm 0,04 \text{ Mg m}^{-3}$ para el tratamiento Sj/CC y desde $1,27 \pm 0,02 \text{ Mg m}^{-3}$ hasta $1,32 \pm 0,02 \text{ Mg m}^{-3}$ para el tratamiento Sj. La *DAmáx* calculada para este suelo tuvo un valor de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$. Las *CR* calculadas en base a ello, muestran que el suelo del tratamiento Sj/CC varía desde el 84 hasta el 90% para la capa superficial, y desde el 86 hasta el 87% para la capa subsuperficial; mientras que para Sj, las variaciones ocurren desde el 92 al 95% para la capa superficial y desde 90 a 93% en la capa subsuperficial. Los resultados de *IE* muestran que el índice fue significativamente menor ($P < 0,05$) en Sj/CC que en Sj (Fig. 2A). Esto indica que hubo incrementos de estabilidad estructural debido a la incorporación de CC.

Experimento de invernáculo

Al comienzo del ensayo luego de los ciclos de H/S, la *DA* fue $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$, coincidiendo con valores hallados a campo en este suelo (Fernández *et al.*, 2006). No hubo interacciones significativas «tratamiento x tiempo» para ninguna de las variables evaluadas (*DA* y *DTP*), por lo cual se analizaron los efectos principales (tratamiento y tiempo) para cada caso. No hubo efecto tratamiento para las variables *DA* y *DTP*, pero sí efecto significativo del tiempo (Figs. 3 y 4). La *DA* se mantuvo a lo largo del ensayo en el rango de $1,09$ - $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$, presentando pequeñas variaciones entre las fechas de muestreo (Fig. 3). La *DTP* medida al comienzo del ensayo muestra que la porosidad del suelo se distribuyó de la siguiente manera: 14,2% de macroporos $>50 \mu\text{m}$, 1,5% de mesoporos de 50 - $15 \mu\text{m}$, 9,2% de mesoporos de 15 - $10 \mu\text{m}$, y 32,5% de poros $<10 \mu\text{m}$. Esta *DTP* presentó cambios importantes en las distintas fechas de muestreo del ensayo (Fig. 4). Luego del período de barbecho del primer ciclo se observó en promedio para todos los tratamientos, un incremento del 517,5% en los mesoporos de 50 - $15 \mu\text{m}$, lo cual sucedió a expensas de una disminución significativa de 19,4% en los macroporos $>50 \mu\text{m}$ y de 69,4% en los mesoporos de 15 - $10 \mu\text{m}$. En este momento, también hubo un incremento en los poros $<10 \mu\text{m}$ del 4,0%. Al momento de cosecha del cultivo de soja del primer ciclo, no hubo cambios significativos en ninguno de los rangos de poros respecto a la fecha de muestreo anterior. En el último muestreo (al final del segundo ciclo) se manifestó un incremento de 52,7% en macroporos

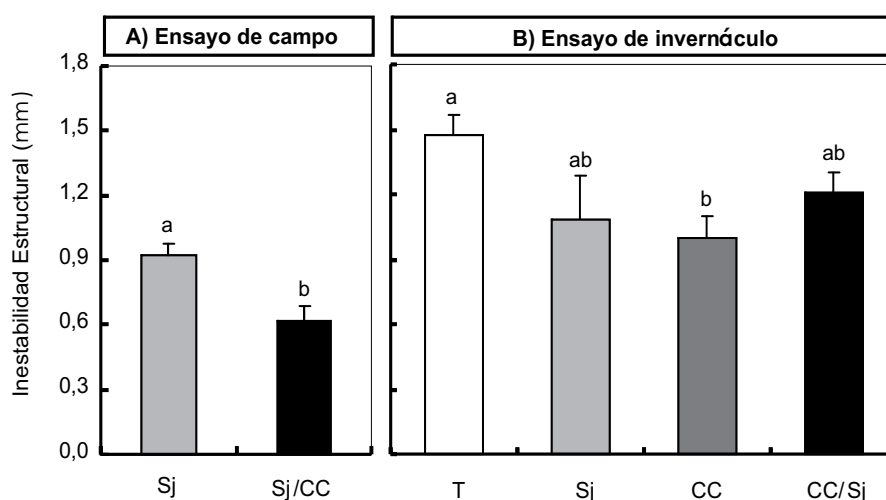


Figura 2. Índice de Inestabilidad Estructural para los tratamientos soja (Sj) y soja (Sj/CC) en el ensayo a campo y para los tratamientos testigo (T), soja (Sj), cultivo de cobertura (CC), y cultivo de cobertura-soja (CC/Sj), al final del segundo ciclo del ensayo en invernáculo. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los tratamientos para cada ensayo. Las barras indican el error estándar de la media. Figure 2. Structural instability index for soybean (Sj) and soybean (Sj/CC) treatments at field experiment and control (T), soybean (Sj), cover crops (CC), and cover crops-soybean (CC/Sj) treatments at the end of the second cycle of the greenhouse experiment. Different letters indicate significant differences between treatments ($P < 0,05$). Standard errors of a mean are indicated by bars.

Figura 3. Densidad Aparente (DA) durante los dos ciclos del ensayo en invernáculo para los tratamientos testigo (T), soja (Sj), cultivos de cobertura (CC), y cultivos de cobertura-soja (CC/Sj). La barra superior indica el manejo en cada periodo de tiempo: CC: cultivo de cobertura; B: barbecho y Sj: soja. * Indican diferencias significativas por efecto tiempo respecto a la fecha anterior (P<0,05). Las barras indican el error estándar de la media.

Figure 3. Bulk Density during two cycles of greenhouse experiment, in control (T), soybean (Sj), cover crops (CC) and cover crops – soybean (CC/Sj) treatments. Upper bars indicate management at each time period: CC: cover crops, B: fallow and Sj: soybean. * Indicate significant differences between sampling times respect to preceding date (P<0.05). Standard errors of a mean are indicated by bars.

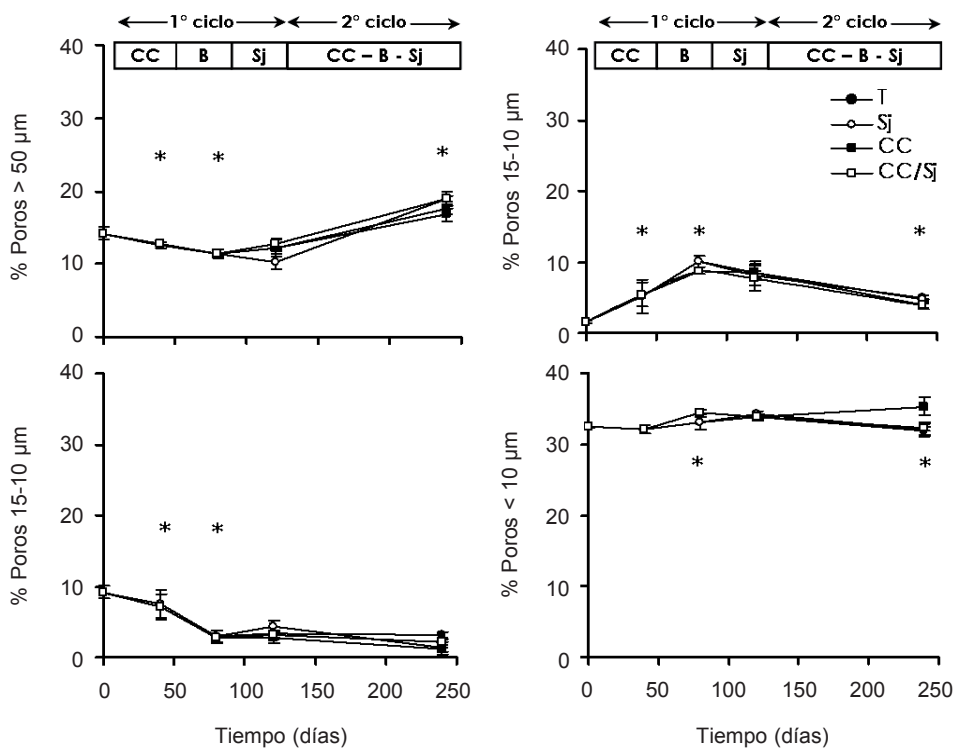
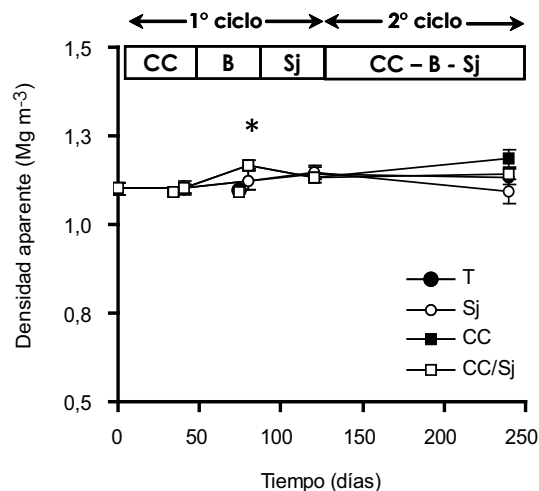


Figura 4. Distribución de tamaño de poros (DTP, poros >50μm; 50-15μm; 15-10μm y <10μm) durante los dos ciclos del ensayo en invernáculo para los tratamientos testigo (T), soja (Sj), cultivos de cobertura (CC), y cultivos de cobertura -soja (CC/Sj). La barra superior indica el manejo en cada periodo de tiempo: CC: cultivo de cobertura; B: barbecho y Sj: soja. * Indican diferencias significativas por efecto tiempo respecto a la fecha anterior (P<0,05). Las barras indican el error estándar de la media.

Figure 4. Pore size distribution (DTP, pores >50μm; 50-15μm; 15-10μm y <10μm) during two cycles of greenhouse experiment, in control (T), soybean (Sj), cover crops (CC) and cover crops – soybean (CC/Sj) treatments. Upper bars indicate management at each time period: CC: cover crops, B: fallow and Sj: soybean. * Indicate significant differences between sampling times respect to preceding date (P<0.05). Standard errors of a mean are indicated by bars.

>50 μm a expensas de una disminución en mesoporos de 50-15 μm (43,3%) y poros <10 μm (3,1%). Se detectaron diferencias significativas en *IE* medido al final del ensayo (Fig. 2B), presentando nuevamente menor inestabilidad de agregados el tratamiento CC respecto del tratamiento T.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran una coincidencia entre lo hallado en el campo y en el invernáculo con el mismo suelo: la introducción de CC condujo a mejoras de estabilidad estructural, no acompañadas por cambios de porosidad estructural. Este resultado difiere en parte de la hipótesis de trabajo, particularmente en lo que se refiere a los cambios de *DA* y *DTP* debido a la incorporación de CC.

La falta de efecto de los CC sobre la *DA* encontrada en este trabajo difiere de lo que muestra una parte importante de la literatura, en la cual se hallaron disminuciones de *DA* en la capa superficial del suelo en respuesta a la introducción de CC (Lal *et al.*, 1979; Wilson *et al.*, 1982; Latif *et al.*, 1992; Villamil *et al.*, 2006). Esta disminución fue atribuida en estos trabajos a una mayor cantidad de residuos incorporados al suelo, así como también a la presencia de raíces. Kladivko (1994) sostiene que aunque los residuos permanezcan en la superficie, como sucede en SD, los materiales orgánicos pueden incorporarse lentamente a medida que son degradados, originando la disminución en *DA*. Las causas por las cuales no se produjeron mejoras en la porosidad por la introducción de CC en nuestro ensayo posiblemente estén relacionadas con el corto tiempo transcurrido entre el secado del CC y el muestreo, o también a la falta de efecto histórico de varios años con CC. Sin embargo, existen muchos antecedentes que refieren la escasa respuesta de la macroporosidad de estos suelos a cambios en el manejo (Taboada *et al.*, 1998; Micucci & Taboada, 2006; Taboada *et al.*, 2008). En síntesis, o bien la porosidad de este suelo no responde a la acción de las raíces como factor de recuperación, o bien se requieren mediciones a mayor plazo que permitan que se expresen estos efectos.

En el ensayo de campo se encontraron distintos comportamientos para la evolución de *DA* en cada profundidad. El incremento en *DA* de la capa superficial fue mayor en el tratamiento Sj/CC, lo cual probablemente se relacione a la mayor intensidad de tránsito de maquinaria en operaciones de siembra (Hamza & Anderson, 2005). En este caso se superó el valor óptimo de 83-86% de *CR* propuesto por Carter *et al.* (1990). En la capa subsuperficial se presentaron menores incrementos de *DA* para el trata-

miento Sj/CC, en este caso probablemente en respuesta al desarrollo radical de los CC. El tratamiento Sj superó el valor crítico de *CR* de 90%, llegando a alcanzar el 93% de *CR* en la capa subsuperficial en la misma fecha.

En el ensayo de invernáculo no se observaron cambios de *DA* en respuesta a las distintas rotaciones, aunque se manifestó un incremento significativo por efecto del tiempo. El incremento en *DA* registrado luego del barbecho del primer ciclo puede responder a un reacomodamiento de las partículas de suelo, posiblemente debido al riego.

La *DTP* medida en el ensayo de invernáculo también varió con el tiempo, pero no entre tratamientos. Por ello, la generación de meso- y macro-porosidad en este ensayo debe atribuirse a mecanismos abióticos que operaron en todos los tratamientos, como son los ciclos de H/S (Dexter, 1988; Taboada *et al.*, 2004). Villamil *et al.* (2006) verificaron en un suelo franco-limoso incrementos significativos en el volumen de poros de transmisión (macroporos) y de almacenamiento (mesoporos) con el uso de CC. A diferencia de ello, en nuestro experimento no se manifestó ningún efecto biótico relacionado a la exploración del suelo por parte de las raíces de los CC. Probablemente el comportamiento abiótico, es decir, la respuesta frente a los ciclos de H/S resultó ser más importante, minimizando de esta forma los efectos radicales de los CC sobre la porosidad.

Los resultados del primer y segundo ciclo muestran comportamientos distintos en cuanto a la evolución de la *DTP*. La diferencia presentada entre estos ciclos puede estar relacionada a los distintos números de ciclos de H/S. El primer ciclo coincidió con la época estival, en que las macetas fueron regadas con mayor frecuencia. Estas condiciones promueven la ruptura de los agregados (Denef *et al.*, 2001; Taboada *et al.*, 2004), lo cual justifica la disminución de macroporosidad observada en el primer período del ensayo. El segundo ciclo se llevó a cabo durante el otoño e invierno, cuando la demanda atmosférica fue menor, y consecuentemente, los ciclos H/S fueron más largos y el suelo permaneció húmedo por más tiempo. Estas condiciones promueven la agregación y la coalescencia (Bresson & Moran, 1995; Drewry *et al.*, 2004). Varios trabajos realizados en la región muestran valores de porosidad estructural marcadamente inferiores a los hallados en el presente (Taboada *et al.*, 1998; Micucci & Taboada, 2006; Taboada *et al.*, 2008). A pesar de las disminuciones de macroporosidad que tuvieron lugar en el primer ciclo, en ninguna de las fechas de muestreo se detectaron porcentajes de macroporos menores al valor límite del 10% por debajo del cual se afecta la penetración y oxigenación de las raíces (Lal & Shukla, 2004).

El incremento en la estabilidad estructural en respuesta a la incorporación de los CC hallados a campo y en invernáculo confirma la capacidad de los CC de generar estabilidad en los suelos limosos. Este incremento podría relacionarse con la influencia tanto de las raíces como de los residuos de los CC (Six *et al.*, 2004; Taboada *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005). Debido a los distintos períodos de desarrollo que tuvieron los CC en los diferentes experimentos, se esperarían diferencias en la calidad de los residuos de los CC (concentración de lignina, celulosa, relación C:N) aportados al suelo. Estas diferencias de labilidad de los residuos podría condicionar los efectos sobre la estabilidad estructural (Abiven *et al.*, 2009). A pesar de ello en ambos casos se evidenciaron cambios favorables sobre la estabilidad de agregados en el corto plazo.

Los valores de *IE* del ensayo de campo fueron menores que los hallados en invernáculo. Esto podría deberse a que al principio del experimento de invernáculo, el suelo estaba seco y suelto como consecuencia de la ruptura entre las partículas individuales de suelo durante el proceso de molido y tamizado (Materochera *et al.*, 1994). Luego del humedecimiento durante los ciclos de H/S iniciales y los riegos posteriores, pudo haberse producido la aglomeración y la coalescencia de las partículas (Bresson & Morán, 1995; Taboada *et al.*, 2004). El proceso de tamizado se asimila en cierto modo a una operación de labranza, ya que en él se destruyen los macroagregados existentes en el suelo (Dexter, 1988; Six *et al.*, 2004). Considerando esto, los valores de *IE* obtenidos en el ensayo de invernáculo alcanzaron magnitudes similares a suelos de la región manejados con labranza convencional, y los índices obtenidos en el ensayo de campo se asemejan a los hallados bajo sistemas de SD (Álvarez *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

a) Se registró similitud de resultados en el campo y en invernáculo: los CC incorporados en las secuencias de cultivos lograron incrementar la estabilidad estructural pero no la porosidad estructural, lo cual difiere de la hipótesis de trabajo; y b) los resultados confirman la escasa resiliencia de la porosidad estructural en suelos franco limosos pampeanos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 931 y PICT 1991) y la Universidad de Buenos Aires (UBACyT G014). Agradecemos al Sr. R. Blúa, propietario del establecimiento «El Casco», por su colaboración durante la ejecución del experimento 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 Biology & Biochemistry* 41: 1-12.
- Álvarez, CR; MA Taboada; FH Gutiérrez Boem; A Bono; PL Fernández & P Prystupa. 2009. Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
- ASTM International. 1982. Standard test methods for moisture relations using a 5.5 lb (2.5 kg) hammer and 12 inch (304.8 mm) drop. Pp. 836-842. *In: American Society for Testing Materials (ed.)*. ASTM Standards in Building Codes. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA.
- Barbosa, O; MA Taboada & DJ Cosentino. 1999. Contracción al secado de agregados en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 17: 1-7.
- Bathke, GR & GR Blake. 1984. Effects of soybeans on soil properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1398-1401.
- Bonel, BA; HJM Morrás & V Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23(1): 1-12.
- Bresson, LM & CJ Moran. 1995. Structural change induced by wetting and drying in seedbeds of hardsetting soil with contrasting aggregate size distribution. *Eur. J. Soil Sci.* 46: 205-214.
- Burke, W; D Gabriels & J Bruma. 1986. Soil structure assessment. AA. Balkema, Rotterdam, pp. 92.
- Carter, MR. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- Carter, MR & BC Ball. 1993. Soil Porosity. Pp. 581-588. *In: MR Carter (ed.)* Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Cosentino, DJ & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16
- Dane, JH & JW Hopmans. 2002. Pressure plate extractor. [3]. *In: Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* JH Dane and GC Topp (eds.). Book series: 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA: 688-690.
- Denef, K; J Six; H Bossuyt; SD Frey; ET Elliott; R Merckx & K Paustian. 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 33: 1599-1611.
- Denef, K; J Six; R Merckx, & K Paustian. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant Soil* 246: 185-200.
- Dexter, AR. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11: 199-235.
- Drewry, JJ; RJ Pato & RM Monaghan. 2004. Soil compaction and recovery cycle on a Southland dairy farm: implications for soil monitoring. *Australian Journal of Soil Research* 42: 851-856.
- Fernández PL; CR Álvarez; M Correa Luna & MA Taboada. 2006. Propiedades físicas en sistemas de producción mixta y de agricultura continua en siembra directa. XX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Salta. Resumen página 152.

- Hamza, MA & WK Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82(2): 121-145.
- INTA. 1972. Carta de Suelos de la Republica Argentina. Buenos Aires.
- INTA. 2010. <http://www.inta.gov.ar/suelos/>
- Kladivko, EJ. 1994. Residue effects on soil physical properties. p. 123-141. *In: PW Unger (ed.) Managing agricultural residues.* Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Lal, R; GF Wilson & BN Okigbo. 1979. Changes in Properties of an Alfisol Produced by various crop covers. *Soil Science* 127(6): 377-382.
- Lal, R & MK Shukla. 2004. Principles of soil physics. Marcel Dekker, Inc. New York-Basel, 716 p.
- Lal, R; DC Reicosky & JD Hanson. 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res.* 93: 1-12.
- Latif, MA; GR Mehuys, AF Mackenzie, I Alli & MA Faris. 1992. Effects of legumes on soil physical quality in a maize crop. *Plant Soil* 140: 15-23.
- 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.
- Materechera, SA; JM Kirby; AM Alston & AR Dexter. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant Soil* 160: 57-66.
- Micucci, FG & MA Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 86: 152-162.
- Oades, JM. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Paruelo, JM; JP Guerschman & SR Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 87: 14-23.
- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 87: 9-18.
- Senigagliaesi, C & M Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *In: Buxton, R; RA Shibles; BL Forsberg; KH Asay; GM Paulsen & RF Wilson (eds.). D.R. International Crop Science.* Crop Science Society of America, Madison, WI, pp. 27- 35.
- Six, J; K Paustian; ET Elliott & C Combrink. 2000. Soil structure and soil organic matter: I Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.
- Six J; H Bossuyt; S Degryze & K Denef. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79: 7-31.
- Strudley, MW; TR Green & JC Ascough II. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Tillage Res.* 99: 4-48.
- Taboada, MA; FG Micucci; DJ Cosentino & RS Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Tillage Res.* 49: 57-63.
- Taboada, MA; OA Barbosa; MB Rodríguez & DJ Cosentino. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- Taboada, MA, OA Barbosa & DJ Cosentino. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
- Villamil, MB; GA Bollero; RG 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.
- Wilson, G; R Lal & B Okigbo. 1982. Effects of cover crops on soil structure and on yield of subsequent arable crops grown under strip tillage on an eroded alfisol. *Soil and Tillage Research* 2(3): 233-250.