

RESPUESTA EN EL CORTO PLAZO DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS A LA INTRODUCCIÓN DE CULTIVOS DE COBERTURA

MARIO CASTIGLIONI^{1*}; RICARDO NAVARRO PADILLA¹; MAXIMILIANO EIZA²; ROMINA ROMANIUK²; MARCELO BELTRAN² & FERNANDO MOUSEGNE²

Recibido: 09-05-16

Recibido con revisiones: 11-08-16

Aceptado: 11-08-16

RESUMEN

Para evitar la degradación física del suelo se necesitan estrategias de gestión sostenibles. En este sentido, la intensificación en la secuencia de cultivos genera un uso más eficiente de los recursos ambientales, aumentando el aporte de carbono al suelo y mejorando su condición física. El objetivo del presente trabajo fue estudiar en el corto plazo (un año), la incidencia de dos cultivos de cobertura (CC) con características contrastantes (CC Trigo y CC Vicia) y la de una situación bajo barbecho invernal (Barbecho), sobre distintas propiedades físicas del suelo, analizando además su relación con el rendimiento de dos cultivos de verano (maíz y soja). Para cumplir con dichos objetivos, se evaluó la respuesta de un Argiudol bajo siembra directa (SD), ubicado en el partido de San Antonio de Areco (Pcia. de Bs. As.). Se determinó la lámina de agua disponible de los primeros 60 cm de suelo en distintos momentos del ensayo. A la cosecha de los cultivos de verano se determinaron a dos profundidades las siguientes propiedades: densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración, estabilidad de agregados, conductividad hidráulica saturada y porosidad estructural, como así también los rendimientos de soja y maíz. Las parcelas ocupadas durante el invierno con CC, no presentaron al momento de la siembra, floración y cosecha de los cultivos de verano, menor contenido hídrico en los primeros 60 cm de suelo respecto al Barbecho. Se comprobó en el corto plazo y sobretodo en el estrato superficial, el efecto favorable de los CC sobre la mayoría de las propiedades físicas evaluadas. En algunos casos se generaron respuestas distintas del suelo, según el CC presente. La estabilidad de agregados de los primeros centímetros de suelo a la cosecha del maíz, fue la variable más sensible para detectar los cambios sufridos, mientras que la resistencia mecánica a la penetración fue la menos eficaz.

Palabras clave. Rendimientos maíz y soja, estabilidad estructural, agua disponible, barbecho invernal.

SHORT TERM EFFECTS OF COVER CROPS ON SOME SOIL PHYSICAL PROPERTIES

ABSTRACT

Physical soil degradation can be reduced developing sustainable management strategies. In this sense, the intensification of crop sequence generates more efficient use of environmental resources, increasing soil carbon and improving soil physical properties. The aim of this work was to study in the short term (one year), the incidence of two cover crops with contrasting characteristics (wheat and vetch) and a winter fallow situation, on different soil physical properties, analyzing their relationship with two summer crop yields (corn and soybean). To achieve these objectives, the response of an Argiudoll under no tillage, located in San Antonio de Areco (Pcia. Bs. As.), was evaluated. The water available at different times in the top soil 60 cm was assessed. At summer crop harvest moment, bulk density, penetration resistance, aggregate stability, saturated hydraulic conductivity, structural porosity were determined at two depths, as well as the soybean and corn yields. Compared with the control, plots occupied during winter with cover crops did not present less soil water content in the first 60 cm at sowing, flowering and harvesting of summer crops. In the short term and mainly in the surface layer, the cover crops changed most of the soil physical properties evaluated. In some cases different soil responses were generated, according to the cover crop present. Aggregate stability of the top few centimeters of the corn crop soil, was the most sensitive variable to detect changes due to cover crops, while the penetration resistance was less effective.

Key words. Corn and soybean yields, aggregate stability, available water, winter fallow.

¹ Facultad de Agronomía (UBA)

² INTA

* Autor de contacto: castigli@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

Para evitar la degradación estructural del suelo y mantener o mejorar su calidad física y química, se necesitan estrategias de gestión sostenibles (Torres *et al.*, 2001; Verhulst *et al.*, 2010). En este sentido, la intensificación en la secuencia de cultivos genera un mayor y más eficiente uso de los recursos ambientales, a partir de la presencia de cobertura vegetal viva durante un intervalo de tiempo superior, obteniéndose un aporte frecuente y continuo de residuos vegetales, provenientes no sólo de la parte aérea, sino también a partir de la descomposición de las raíces (Caviglia *et al.*, 2011; Novelli, 2013). Este comportamiento incrementa los niveles del carbono orgánico (Luo *et al.*, 2010) y genera un desarrollo favorable de distintas propiedades físicas como la densidad aparente, porosidad efectiva y la formación y estabilización de los agregados (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008). Estos beneficios son el resultado de una continua actividad radicular y de los microorganismos del suelo, en comparación con lo que sucede en los sistemas agrícolas que incluyen largos períodos de barbecho (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008). Una de las estrategias utilizadas para la intensificación en la secuencia de los cultivos, es la introducción de cultivos de cobertura (CC) en la rotación, los cuales son implantados intercalados en el tiempo respecto a aquellos destinados a la producción de granos (Bodner *et al.*, 2008). Este tipo de cultivos no aporta un beneficio económico directo, pero condiciona de manera eficaz al suelo para aquellos que son destinados a cosecha, aumentando la protección superficial del suelo, favoreciendo así la conservación de los recursos ambientales (Bodner *et al.*, 2013). En este sentido, la inclusión de cultivos de cobertura en los sistemas de producción agrícola bajo siembra directa, protegen al suelo de la erosión hídrica y eólica (Zhu *et al.*, 1989; Blanco-Canqui *et al.*, 2013), favorecen las propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas (Fronning *et al.*, 2008; Blanco-Canqui *et al.*, 2011), compitiendo a su vez favorablemente con las malezas (Teasdale *et al.*, 2007) y teniendo un rol importante en la dinámica del nitrógeno del suelo (Salmerón *et al.*, 2011). La utilización de este tipo de cultivos es promovida actualmente como una práctica adecuada para complementar la siembra directa en la Región Pampeana, especialmente en los sistemas agrícolas con monocultivo de soja (*Glycine max*), puesto que permiten incrementar la cobertura del suelo (Álvarez *et al.*, 2010).

Blanco-Canqui *et al.* (2011) observaron mejoras en la infiltración de un suelo con CC bajo siembra directa, lo que resultó en una menor pérdida de agua por escurrimiento

superficial, pudiendo esto incidir a su vez en una menor tasa de erosión y en un mayor rendimiento de los cultivos para producción de granos en los años secos (Yunusa & Newton, 2003). Williams & Weil (2004) y Carfagno *et al.* (2014) consideraron efectivos a los CC para disminuir la compactación edáfica, debido a su efecto en la generación de bioporos, los cuales son utilizados posteriormente por las raíces del cultivo subsiguiente, pudiendo extender a mayor profundidad su sistema radicular. Sin embargo, algunos estudios (Wagger & Denton, 1989; Villamil *et al.*, 2006) no han mostrado un efecto significativo de esta práctica sobre la densidad aparente, porosidad y conductividad hidráulica. En este sentido, Carof *et al.* (2005) sugirieron que la cobertura del suelo generada por la presencia de restos vegetales de los cultivos de cobertura, puede resultar en una menor conductividad hidráulica debido a una menor presencia de fisuras en la superficie del suelo. También puede ocurrir una disminución temporal en la tasa de infiltración, como resultado de la obturación de poros por las raíces provenientes del CC (Swardji & Eberbach, 1998; Bodner *et al.*, 2008).

Dada la cantidad de factores involucrados y la fuerte interacción que hay entre ellos durante el ciclo de los CC y de aquellos destinados a la producción de granos (Galantini, 2008), los resultados de incluir esta práctica agrícola en la rotación resultan muy variables entre sitios (Unger & Vigil, 1998). Blanco-Canqui *et al.* (2011) y Carfagno *et al.* (2013) mencionan que el efecto de los CC sobre las propiedades físicas del suelo es variable, dependiendo de la especie utilizada como CC, del suelo, del sistema de labranza empleado, de la historia del lote y del clima. Es por estas razones que es necesario expandir los ensayos e incrementar su investigación, de acuerdo a la región y al sistema de manejo, a fin de poder brindar recomendaciones certeras, considerando no solo la maximización de los rendimientos, sino también la conservación de los suelos.

Los CC y su efecto sobre el suelo han sido estudiados fundamentalmente en el mediano (Sainju *et al.*, 2003; Villamil *et al.*, 2006; Carfagno *et al.*, 2013) y largo plazo (Blanco-Canqui *et al.*, 2011; Steele *et al.*, 2012). Al mismo tiempo, Mukherjee & Lal (2015) mencionan que hay poca documentación acerca del impacto de los CC sobre la calidad del suelo en el corto plazo (1-3 años). Por estos motivos, el objetivo del presente trabajo fue estudiar en el corto plazo (un año), el efecto de dos CC con características contrastantes (CC Trigo y CC Vicia) y la de una situación bajo barbecho invernal (Barbecho), sobre distintas propiedades físicas del suelo, analizando además su relación con el rendimiento de dos cultivos de verano (maíz y soja).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio, características climáticas y edáficas

El estudio se desarrolló en un lote de producción agrícola correspondiente al establecimiento "La Fe", ubicado en el partido de San Antonio de Areco (Pcia. de Bs. As.) (34°11'23"S 59°34'00"O).

La temperatura media anual correspondiente al área bajo estudio es de 16,5 °C, produciéndose las temperaturas medias mensuales más bajas en junio y julio (10,2 y 9,6 °C), mientras que las medias mensuales más altas ocurren de diciembre a marzo (entre 20,3 y 23,4 °C). Por su parte, la precipitación media anual regional es de 1084 mm, ocurriendo el 75% de las mismas en primavera-verano.

De acuerdo a la carta de suelos (INTA, 2009), la unidad cartográfica correspondiente al área de estudio presenta un 100% de la serie Capitán Sarmiento. Dicha serie es por superficie y capacidad productiva, la más importante del partido de San Antonio de Areco, habiendo sido clasificada como un Argiudol abruptico, fino, illítico, muy profundo, térmico (USDA-NRCS, 2010). Se tomaron muestras de suelo para determinar su textura, siendo la misma en los primeros 40 cm de suelo franco limosa (arcilla: 25,9%; limo: 62,7%; arena: 11,4%).

En la Figura 1 se detalla el comportamiento mensual de las precipitaciones registradas durante el año 2014 y el primer semestre de 2015. A su vez, se ilustran las lluvias y tempera-

turas medias mensuales, calculadas a partir del registro realizado por la AER INTA San Antonio de Areco desde 1982 hasta el año 2015, incluyendo también las fechas en que se realizó la siembra y secado de los CC.

Según se observa en la misma, las precipitaciones mensuales previas a la siembra de los CC (junio de 2014), fueron superiores en todos los meses respecto al promedio histórico. Por su parte, durante el desarrollo del ensayo hubo momentos de mayor y menor precipitación registrada respecto a dicho promedio. No obstante, la lámina de lluvia acumulada entre junio de 2014 y junio de 2015 fue de 1103 mm, siendo este valor similar a la media correspondiente para dicho período. Pese a ello, febrero y marzo de 2015 fueron los meses en que ocurrió el mayor déficit de lluvias respecto a los registros medios (Fig. 1).

Características del ensayo

Durante los diez años previos al inicio del ensayo, el lote estuvo bajo agricultura continua con siembra directa (SD), siendo la sucesión de cultivos desde el año 2008 hasta el 2014 la siguiente: maíz-barbecho de invierno-soja-maíz-verde de invierno-verde de invierno-verde de invierno/soja. En junio de 2014 se inició el ensayo, siendo las especies utilizadas como CC las siguientes: vicia, trigo, avena y una consociación de avena + vicia. También se consideró una situación testigo, sobre la cual no se implantaron CC (barbecho de invierno cubierto con rastrojos del cultivo previo). Para el presente trabajo se analizaron únicamente los resultados correspondientes a las par-

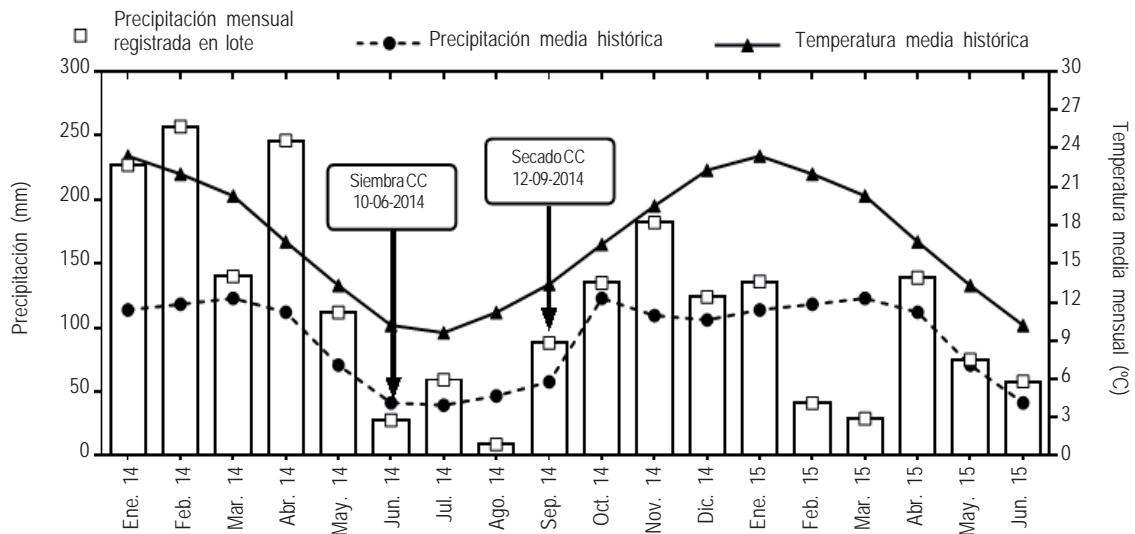


Figura 1. Lluvias mensuales registradas en el lote, lluvias y temperaturas medias mensuales históricas registradas por la AER INTA San Antonio de Areco.

Figure 1. Monthly rainfall, monthly average rainfall and temperatures recorded by the AER INTA San Antonio de Areco.

celas con dos CC contrastantes (CC Trigo y CC Vicia) y el testigo (Barbecho). Las densidades de siembra implementadas para el trigo y la vicia fueron de 110 y 70 kg ha⁻¹, respectivamente. A la siembra, la vicia fue inoculada con *Rhizobium leguminosarum biovar viceae*. El ciclo de los CC se interrumpió el 12 de setiembre de 2014 con 4 L ha⁻¹ de glifosato (48% principio activo). Dicho momento se definió teniendo en cuenta que la gramínea y la leguminosa llegaran a floración, logrando una elevada producción de materia seca, sin comprometer la fecha de siembra óptima de los cultivos de verano. Las parcelas donde se establecieron los tratamientos con los CC y el testigo (8 x 30 m), a la siembra de los cultivos de verano se subdividieron en parcelas de 8 x 15 m, sembrándose soja y maíz en cada una de ellas. El cultivo de soja se sembró el 27 de noviembre de 2014, a una distancia entre hileras de 0,35 m, inoculándose con *Bradyrhizobium* sp. La siembra de maíz se realizó el 17 de diciembre de 2014 a 0,70 m entre hileras, con una densidad de 72.000 plantas ha⁻¹. En el tratamiento Barbecho, al secado de los CC también se aplicó glifosato, mientras que durante el crecimiento de los cultivos de maíz y de soja, fue necesario el control manual de malezas debido a que dicho tratamiento comenzó a poblarse con rama negra (*Conyza sumatrensis*). En las parcelas donde se habían implantado los cultivos de cobertura, no fue necesaria esta práctica ya que no hubo presencia de malezas. La toma de muestras y la determinación de resistencia mecánica a la penetración se realizó luego de la cosecha de los cultivos de verano (junio de 2015), con la excepción del contenido de agua, que se hizo en distintos momentos del estudio.

El ensayo corresponde a un diseño de parcelas divididas con dos factores (cultivos de cobertura y cultivos de grano), en el que se implementaron tres bloques, cada uno de los cuales incluyó tres tratamientos conformados por dos CC (CC Trigo y CC Vicia) y un testigo (Barbecho). Sobre cada uno de dichos tratamientos se implantaron dos cultivos de grano (soja y maíz). Si bien el ensayo contempló también dos niveles de fertilización del maíz (0 y 150 kg ha⁻¹ de N), para el presente trabajo los resultados de las propiedades físicas y de rendimiento de los cultivos de verano correspondieron a la situación sin fertilización.

Propiedades físicas evaluadas

Lámina de agua disponible (LAD). Resulta de la diferencia entre el contenido hídrico edáfico al momento del muestreo y el correspondiente al punto de marchitez permanente (pmp). El contenido de humedad edáfica se determinó en todas las parcelas por el método gravimétrico, en distintos momentos del ensayo (siembra y secado de los CC; siembra, floración y cosecha del maíz y soja) y a distintas profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm). Para cada profundidad se tomaron 2 muestras por parcela con barreno de 2 cm de diámetro, siendo posterior-

mente los valores de humedad gravimétrica promediados y afectados por la densidad aparente del suelo correspondiente a cada profundidad. El pmp y el contenido de agua a capacidad de campo fueron determinados en laboratorio mediante olla de presión (Richards, 1965). Ambos procedimientos se realizaron sobre muestras tomadas a tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm) en un sector del lote, donde también fueron extraídas muestras de suelo para establecer la densidad aparente correspondiente a las profundidades de 20-40 cm y 40-60 cm. La densidad aparente utilizada para el cálculo de la LAD de los primeros 20 cm, fue obtenida en cada una de las parcelas del ensayo. La LAD fue calculada para cada parcela, momento de muestreo y profundidad por medio de la ecuación 1:

$$LAD = \sum_i^n \left[p_i * ((\theta_g - \theta_{pmp})) * \frac{Dap}{d_{agua}} \right] \quad (1)$$

donde:

LAD: lámina de agua disponible en el suelo (mm); θ_g : humedad gravimétrica (g g⁻¹), θ_{pmp} : contenido de agua a -15000 cm (g g⁻¹); Dap: densidad aparente del suelo (g cm⁻³); d_{agua} : densidad del agua (g cm⁻³); p: espesor (mm); i: capa; n: número de capas.

Para el presente trabajo se consideró la LAD de los primeros 60 cm de suelo, que resulta de la sumatoria de la LAD correspondiente a los tres estratos de suelo donde se midió el contenido de agua edáfica.

Densidad aparente (Dap). Se determinó por el método del cilindro (Burke *et al.*, 1986), tomando una muestra por parcela y por profundidad (0-7 y 7-14 cm).

Porosidad estructural del suelo (PE). Primeramente se obtuvo la porosidad textural (Stengel, 1979), utilizando tres muestras de suelo correspondientes a cada tratamiento y profundidad evaluada (0-7 y 7-14 cm). El suelo, previamente tamizado con tamiz de 2 mm de malla, se mezcló con una cantidad de agua igual a 1,9 veces su humedad equivalente. La pasta así formada se dejó reposar durante 24 hs, y luego de un segundo mezclado, se filtró con bomba de vacío. Una vez secadas al aire, las muestras fueron quebradas y tamizadas con tamiz de 3 y 2 mm de abertura de malla, siendo utilizada la fracción de suelo que quedó entre ambos tamices. Luego de dejar los agregados en kerosene durante una noche, se determinó su peso sumergiéndolos mediante un dispositivo especialmente diseñado, en un recipiente conteniendo dicho fluido, el cual se encontraba sobre una balanza. De esta manera, el volumen de la fracción de agregados analizada se determinó aplicando el principio de Arquímedes. Los agregados fueron luego secados en estufa y pesados. Con la información de volumen y peso se calculó su

densidad aparente. Posteriormente se calculó la porosidad textural de dicha fracción de agregados mediante la ecuación 2:

$$Pt = (1 - pc / pp) * 100 \quad (2)$$

donde:

Pt: porosidad textural ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

pc: densidad aparente de los agregados de 3 a 2 mm (g cm^{-3})

pp: densidad de partícula (g cm^{-3})

Con esta información y la correspondiente a la porosidad total del suelo, obtenida a partir de la densidad aparente (Dap), se determinó la porosidad estructural (PE). Esta resultó de la diferencia entre la porosidad total y la textural.

Resistencia mecánica a la penetración (RP). Fue determinada hasta una profundidad de 15 cm, mediante un penetrómetro dinámico de cono con punta de 30° y diámetro basal de 1,4 cm (Burke *et al.*, 1986). La RP del suelo fue calculada como el número de golpes requerido para atravesar cada estrato (0-5 cm, 5-10 cm y 10-15 cm). Este valor fue transformado a valores de energía (MPa) considerando las características constructivas del aparato. Se realizaron cinco repeticiones por parcela. Al mismo tiempo se extrajeron 2 muestras de suelo, tomadas a las profundidades mencionadas y en las distintas parcelas, para estimar la humedad volumétrica del suelo y poder relacionar los valores de resistencia a la penetración con los de contenido hídrico.

Conductividad hidráulica saturada (Ksat). Se tomaron muestras de suelo con cilindros metálicos de 6,25 cm de diámetro y 7 cm de altura, a las profundidades de 0-7 y 7-14 cm. Se realizaron tres repeticiones por parcela y para su resolución se aplicó el método de la carga de agua variable (Klute & Dirksen, 1986).

Estabilidad de agregados (DMP). Se determinó de acuerdo al procedimiento de Le Bissonnais (1996). Para ello se utilizó una muestra de suelo compuesta de cinco submuestras por parcela y por profundidad (0-5 y 5-20 cm). Siguiendo esta metodología se realizaron tres pre-tratamientos (humedecimiento rápido, humedecimiento lento y disgregación mecánica). En el laboratorio, las muestras se desterraron manualmente por sus líneas de fractura naturales con la humedad de campo, removiendo raíces y los restos de vegetales presentes, secándose a temperatura ambiente. Una vez secas se tamizaron mediante tamices con abertura de malla de 3 y 5 mm, utilizando luego 6 g de suelo para el desarrollo de cada pretratamiento. En el pretratamiento de humedecimiento rápido, los agregados secos fueron inmersos en agua destilada por 10 minutos. En el pretratamiento de disgregación mecánica, estos fueron saturados en etanol por 30 minutos y posteriormente transferi-

dos a un erlenmeyer con agua destilada y agitados 10 veces por medio de giros completos del erlenmeyer. En el pretratamiento de humedecimiento lento, los agregados se humedecieron por capilaridad con agua destilada durante 60 minutos. Posteriormente, el suelo proveniente de los distintos pretratamientos fue tamizado sumergido en etanol, utilizando un tamiz con abertura de malla de 50 μm . Aquellos agregados que quedaron retenidos sobre dicho tamiz, se secaron a estufa a 40 °C durante 48 h. Posteriormente estos se tamizaron en seco en una columna de 6 tamices con las siguientes aberturas de malla: 2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 200 μm , 100 μm y 50 μm , procediendo posteriormente al pesado de cada fracción de agregados retenida entre tamices adyacentes. Por último se multiplicó la proporción de masa de suelo remanente en cada tamiz por la abertura media de malla de los tamices adyacentes, realizando luego la sumatoria de estos valores parciales. De esta manera se obtuvo el diámetro medio ponderado de los agregados para cada pretratamiento. Con el objetivo de obtener un valor que sintetice los resultados de los tres pretratamientos (Le Bissonnais & Arrouays, 1997; Chenu *et al.*, 2000), se calculó el promedio de los mismos (DMP), parámetro que fue utilizado para comparar el efecto de los CC sobre la estabilidad estructural.

Análisis estadístico

Previo a cualquier análisis de los datos, se verificó si existía interacción de los factores cultivos de cobertura y cultivos de grano sobre los resultados, a fin de realizar el análisis estadístico tomando de manera conjunta o separada los efectos de los mismos sobre los resultados de las propiedades físicas. Se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) y posteriormente para la comparación de medias se utilizó la prueba de diferencia de medias significativas de Fisher (DMS) con $p < 0,05$. También se hicieron análisis de correlación y regresión lineal simple. El procesamiento de datos se realizó mediante el software Minitab 17.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de interacción en los resultados

De acuerdo al análisis de interacción de factores realizado, se pudo comprobar que no existió interacción significativa entre los factores cultivos de cobertura y cultivo de grano para las variables densidad aparente (Dap), conductividad hidráulica saturada (Ksat), porosidad estructural (PE) y resistencia mecánica a la penetración (RP), a las distintas profundidades evaluadas. Sin embargo, para la estabilidad estructural (DMP), se observó interacción entre ambos factores en los dos estratos de suelo considerados para esta propiedad. Por este motivo, el análisis es-

tadístico de los resultados se realizó sin discriminar los efectos de ambos factores para aquellas variables que no presentaron interacciones significativas, mientras que para el DMP este se hizo teniendo en cuenta ambos efectos en forma separada. Por su parte y como se verá más adelante, dado que al realizar las determinaciones de RP, las parcelas provenientes de ambos cultivos de verano presentaban distinto contenido de humedad edáfica, el análisis de esta propiedad se realizó en forma separada para cada uno de ellos.

Lámina de agua disponible

Desde la siembra del maíz hasta su cosecha llovieron 501 mm, que considerando a su vez la lámina de 392 mm caída entre el secado de los CC y la siembra del cultivo de verano, el abastecimiento de humedad tendría que haber sido suficiente como para satisfacer los 650 mm de evapotranspiración máxima necesaria para el desarrollo del maíz (Totis de Zeljkovich & Rebella, 1980). Sin embargo y como se observa en la Figura 2, al momento de la floración de este cultivo (15 de febrero de 2015) el valor de la LAD para los primeros 60 cm de suelo fue muy baja, lloviendo en forma posterior a esa fecha y durante ese mes solo 23 mm, por lo cual los rendimientos pudieron verse afectados. No obstante, del análisis de los rendimientos alcanzados bajo el tratamiento CC Vicia (Fig. 7a), no se

desprende que estos hayan estado afectados por déficit hídricos. Por su parte, desde la siembra de la soja hasta su cosecha llovieron 604 mm, y teniendo en cuenta la lámina de 288 mm caída entre el secado de los CC y la siembra de este cultivo de verano, se consideró que el abastecimiento de humedad alcanzó para el requerimiento de los 500-600 mm de este cultivo. Observando los rendimientos máximos obtenidos por la soja (Fig. 7b), se puede inferir que no hubo importantes restricciones de agua durante su crecimiento.

En la Figura 2 se muestra para distintos momentos del ensayo, el comportamiento de la LAD de los primeros 60 cm del suelo, de acuerdo a los distintos tratamientos.

Según se observa en la misma, únicamente al secado de los CC las parcelas bajo CC Trigo y CC Vicia presentaron una menor LAD ($p < 0,05$) en los primeros 60 cm de suelo respecto al Barbecho. Este comportamiento obedeció al mayor consumo de agua por evapotranspiración ocurrido en las parcelas con CC Trigo y CC Vicia, respecto a aquellas bajo barbecho invernal y sin presencia de vegetación viva que favoreciera la pérdida de agua del suelo. En los posteriores muestreos, los tratamientos con CC presentaron igual o mayor contenido hídrico edáfico respecto al Barbecho. De esta manera, el mayor consumo de agua en las parcelas con cultivos invernales ocurrido durante el desarrollo

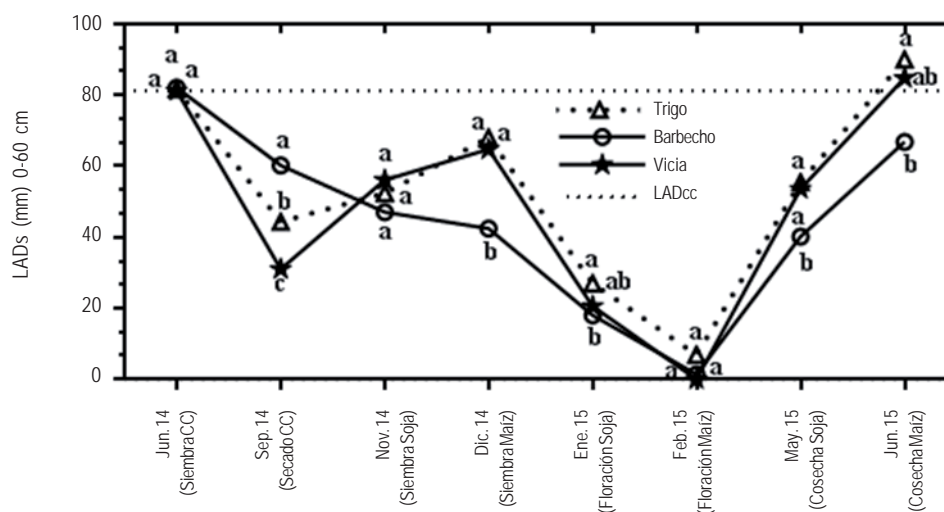


Figura 2. Lámina de agua disponible (0-60 cm) para cada tratamiento y momento de muestreo. LADcc: Lámina de agua disponible para un contenido de agua del suelo (0-60 cm) similar al de capacidad de campo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada momento de muestreo.

Figure 2. Available soil water (0-60 cm) for each treatment and time of sampling. LADcc: Available soil water to a soil water content (0-60 cm) similar to field capacity. Different letters indicate significant differences ($p < 0,05$) between treatments for each sampling time.

de los CC, no pudo haber modificado significativamente el crecimiento y posterior rendimiento del maíz y soja respecto a la situación testigo, dado que en las fechas de muestreo posteriores al secado de los CC, no hubo un menor ($p < 0,05$) contenido de agua edáfica en los tratamientos CC Trigo y CC Vicia. A partir del análisis de correlación efectuado, no se encontró significancia estadística entre el diferente contenido de agua presente en el suelo en los distintos tratamientos y en cada una de las fechas de muestreo, con los rendimientos de soja y maíz.

Densidad aparente

En la Figura 3 se muestran los valores promedio de esta propiedad, para los tratamientos Barbecho, CC Trigo y CC Vicia, a las profundidades de 0-7 y 7-14 cm.

En el estrato superficial se comprobó una disminución significativa ($p < 0,05$) en el corto plazo de la Dap, por efecto del CC Trigo y CC Vicia, con respecto al Barbecho. Dicha disminución fue en promedio de un 4,6%, no observándose diferencias significativas entre CC. Este último comportamiento sucedió a pesar de que el trigo desarrolló mayor biomasa aérea que la vicia (6500 kg ha^{-1} en trigo respecto a 5800 kg ha^{-1} en vicia), que el patrón de crecimiento radical entre ambas especies es distinto y de las diferencias en las características químicas de sus restos vegetales. Restovich *et al.* (2011), evaluando en el corto plazo la respuesta de esta propiedad en la serie Pergamino, a partir de la incorporación de un gran número de CC entre los que se incluyó avena, cebada y vicia, tampoco encontraron al momento del secado de los CC y a la cosecha de los cultivos de grano, un efecto diferencial de las distintas especies utilizadas como CC.

Del análisis de la Figura 3, también se puede comprobar que en la capa subsuperficial (7-14 cm), estrato en el cual generalmente se observa en los sistemas bajo SD una mayor densificación del suelo debida al tránsito de la maquinaria agrícola y por falta de remoción, no hubo un efecto favorable en el corto plazo sobre esta propiedad por la inclusión de los CC.

Steele *et al.* (2012) mencionan que son contradictorios los resultados encontrados en la Dap y la porosidad total, a partir de la implementación de los CC. En este sentido, Villamil *et al.* (2006) hallaron una reducción del 7% en la Dap de los primeros 5 cm de un Argjudol ácuico de los Estados Unidos bajo SD, luego de dos años de CC. Sin embargo, en el mencionado estudio no se corroboraron diferencias en esta propiedad a partir de los 10 cm de profundidad. Restovich *et al.* (2011) tampoco encontraron efectos favorables de distintos CC sobre la Dap, en el estrato de 5 a 10 cm de un suelo de Pergamino bajo SD, al año de iniciado el ensayo. A su vez, Steele *et al.* (2012) detectaron en suelos franco limosos de Estados Unidos bajo SD, que durante el período de crecimiento de los CC era cuando fundamentalmente se establecían mejoras en la Dap superficial. Según estos autores, la reducción en los niveles de densificación del suelo lograda por los CC, se debería principalmente a la mayor cantidad de residuos que quedan sobre el suelo, como consecuencia del aumento en el contenido de carbono orgánico y también por la presencia de raíces activas en los primeros centímetros del suelo durante un mayor número de meses del año, respecto a las situaciones bajo barbecho invernal.

Contrariamente, Waggoner & Denton (1989) trabajan en un suelo franco arenoso bajo siembra directa, no

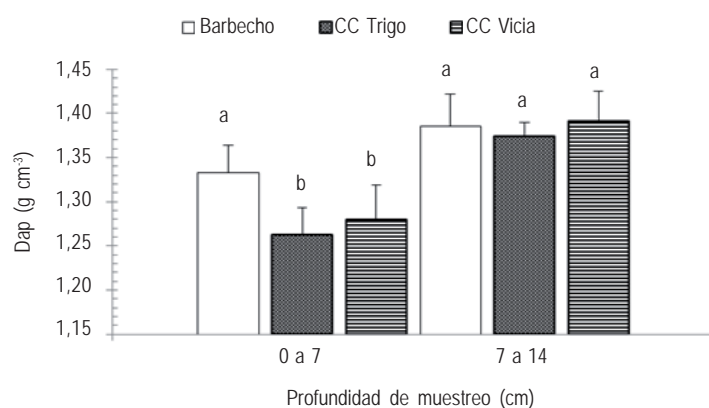


Figura 3.

Densidad aparente al momento de la cosecha de los cultivos de verano. Letras diferentes en el mismo espesor de suelo (0-7 o 7-14 cm), indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos, medida por el test de Fisher. Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media Figure 3.

Bulk density at summer crops harvest moment. Different letters on the same soil depth (0-7 or 7-14 cm) indicate significant differences ($p < 0,05$) between treatments, as measured by the Fisher test. Vertical lines above each bar represent the standard deviation of the mean.

encontraron diferencias en esta propiedad luego de tres años de la implementación de la práctica de CC. Moore *et al.* (2014), después de 9 años de incorporar al centeno como CC en una rotación maíz-soja bajo SD, no hallaron efectos de dicha gramínea sobre la Dap en los primeros 10 cm de suelos francos y franco arcillosos.

En el presente estudio, aunque la tasa de disminución lograda en esta propiedad fue baja, es de destacar que las mejoras observadas en los primeros 7 cm del suelo, fueron halladas al primer año de haber implementado la inclusión de los CC.

Porosidad estructural

En la Figura 4 se pueden observar los resultados medios obtenidos de las mediciones realizadas de porosidad estructural en ambas profundidades, comparando los mismos entre los distintos tratamientos.

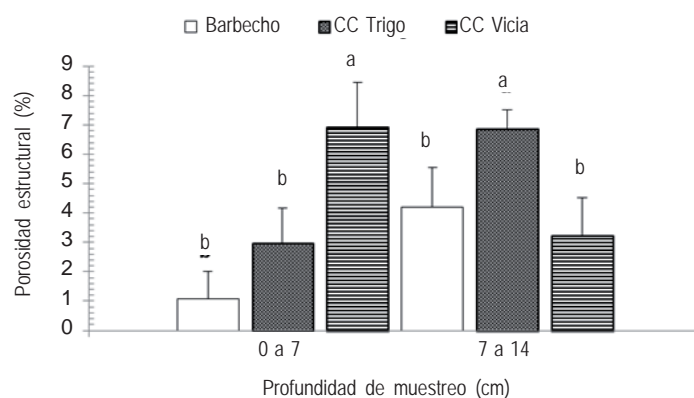
La porosidad estructural de ambas profundidades fue significativamente afectada por al menos uno de los CC. De esta manera, el valor medio de esta propiedad fue mayor en el estrato superficial ($p < 0,05$) de las parcelas que habían estado con CC Vicia, mientras que en el subsuperficial la porosidad estructural fue mayor ($p < 0,05$) para el CC Trigo, siendo en ambas profundidades los resultados menos favorables para el Barbecho. De acuerdo a lo señalado, en el corto plazo y a las dos profundidades evaluadas, hubo diferencias entre CC respecto a su efecto sobre esta propiedad. Estas diferencias encontradas entre CC, podrían deberse a la diferente arquitectura radicular de las dos especies evaluadas, comportamiento que no fue detectado cuando se analizó la densidad aparente. Carof *et al.* (2007) trabajando en un suelo franco de Francia bajo SD,

hallaron a los dos y tres años de iniciado el ensayo, que las parcelas con CC presentaban poros funcionales más largos y mayor cantidad de túbulos en el suelo superficial, respecto a aquellas que no incluían dicha práctica. Sin embargo, y contrariamente a lo sucedido en el presente estudio, estos autores no pudieron diferenciar los efectos generados sobre dicho tipo de poros, por las raíces de las leguminosas respecto a los producidos por las raíces más fibrosas de las gramíneas. Otros investigadores (Obi & Nnabude, 1988; Willoughby & Kladvko, 2002; Blanco-Canqui *et al.*, 2011; Carfagno *et al.*, 2014) también determinaron aumentos en la macroporosidad del suelo ante la presencia de CC.

Hoegenauer (2014) menciona que los CC afectan la macroporosidad principalmente a partir del crecimiento y posterior descomposición de sus raíces. Chen & Weil (2009) señalan que la creación de bioporos por parte de las raíces de los cultivos de invierno, podría generar pasos de baja resistencia para el desarrollo de las raíces de los cultivos de verano, como también que estos efectos favorables serían más evidentes en los sistemas bajo SD, dado que estos canales formados por las raíces no serían alterados por las labranzas. A su vez, dichos autores mencionan la distinta capacidad de las diferentes especies vegetales, en su capacidad para penetrar los estratos de suelo compactados. Por su parte, Bodner *et al.* (2014) sostienen que la influencia de las raíces en el entramado de poros es controlado tanto por el tipo de suelo como por las características de las raíces presentes. En este sentido, Yunusa & Newton (2003) reportaron diferencias entre especies en sus efectos sobre las propiedades hidráulicas del suelo. Estos autores también sugieren, que el diámetro de las raíces es uno de los

Figura 4.
Porosidad estructural al momento de la cosecha de los cultivos de verano. Letras diferentes en el mismo espesor de suelo (0-7 ó 7-14 cm), indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos, medida por el test de Fisher. Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media

Figure 4.
Structural porosity at summer crops harvest moment. Different letters on the same soil depth (0-7 or 7-14 cm) indicate significant differences ($p < 0,05$) between treatments, as measured by the Fisher test. Vertical lines above each bar represent the standard deviation of the mean.



rasgos principales de las plantas anuales, que imponen las características del espacio poroso generado.

De manera distinta a lo encontrado en el presente trabajo, Restovich *et al.* (2011) ensayando con distintos CC bajo SD y una situación de barbecho invernal en un suelo de la serie Pergamino, luego del primer año no determinaron diferencias entre ninguno de los tratamientos evaluados en el volumen ocupado por los macroporos en dos estratos de suelo (0-5 cm y 5-10 cm). De la misma manera, Wagger & Denton (1989) al evaluar un estudio de 3 años desarrollado en un suelo franco arenoso bajo SD, tampoco encontraron efectos de distintos CC sobre la macroporosidad.

De acuerdo a lo mencionado previamente, en el presente estudio se pudo comprobar el efecto favorable y a corto plazo sobre la porosidad estructural, de la incorporación de vicia y trigo en la rotación como cultivos de cobertura, existiendo diferencias entre ambos cultivos en la profundidad a la cual favorecieron en mayor medida el desarrollo de esta propiedad.

Resistencia mecánica a la penetración

En la Tabla 1 se detallan los valores medios de RP y de contenido de agua volumétrica al momento de realizar las determinaciones, discriminados de acuerdo al tratamiento evaluado, cultivo para producción de granos y profundidad.

Debido a la falta de diferencias en el contenido hídrico de los suelos para una misma profundidad y cultivo de verano, se pudieron realizar las comparaciones de RP entre los distintos tratamientos para un mismo estrato e igual cultivo para producción de grano.

Por otra parte y según se observa en la Tabla 1, el contenido de humedad edáfica fue diferente en las parcelas con distintos cultivos de verano, debido a que las determinaciones no fueron realizadas en el mismo momento. Considerando que los valores de pmp y capacidad de campo determinados en laboratorio fueron de $16,58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y $30,81 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente, la humedad edáfica en las parcelas con antecesor maíz estuvo más cerca del valor de capacidad de campo, mientras que en aquellas con

Tabla 1. Resistencia a la penetración y contenido de agua volumétrica promedio, de acuerdo a los distintos tratamientos evaluados y según las distintas profundidades del suelo.

Table 1. Penetration resistance and volumetric water content of the different treatments and according to the several soil depths.

Cultivo de verano	Profundidad (cm)	Tratamientos	Resistencia a la penetración (Mpa)	Humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
Maíz	0-5	Barbecho	1,76 a	19,95 a
		Trigo	1,53 a	25,73 a
		Vicia	1,53 a	24,73 a
	5-10	Barbecho	3,40 a	22,24 a
		Trigo	3,74 a	36,10 a
		Vicia	3,87 a	37,26 a
	10-15	Barbecho	3,16 a	32,96 a
		Trigo	2,52 a	36,98 a
		Vicia	2,86 a	30,66 a
Soja	0-5	Barbecho	4,69 a	13,96 a
		Trigo	2,09 b	13,37 a
		Vicia	2,54 b	17,80 a
	5-10	Barbecho	12,6 a	16,10 a
		Trigo	8,99 a	25,52 a
		Vicia	9,01 a	22,24 a
	10-15	Barbecho	14,44 a	19,39 a
		Trigo	13,43 a	19,73 a
		Vicia	10,34 a	18,78 a

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para una misma propiedad, profundidad y cultivo de verano, medida por el test de Fisher.

Different letters indicate statistically significant differences ($p < 0.05$) between treatments for the same property, depth and summer crop, as measured by the Fisher test

antecesor soja estuvo más cerca del pmp. Esta es la causa por la que los valores de RP en estas últimas fueron muy superiores a los encontrados en aquellas con antecesor maíz, acentuándose esta tendencia a partir de los 5 cm de suelo. Es de destacar también, que salvo los primeros 5 cm correspondientes a los tratamientos que incluyeron maíz, las restantes observaciones de RP superaron los 2 MPa, valor que normalmente se menciona en la bibliografía como umbral para el desarrollo normal de las raíces (Chen *et al.*, 2005).

También se observa en la Tabla 1 que no hubo un efecto significativo de los distintos tratamientos evaluados sobre esta propiedad, independientemente de la profundidad considerada y del cultivo de grano evaluado, con la excepción de lo sucedido en el estrato de 0 a 5 cm en las parcelas bajo soja. En esta última situación mencionada, los tratamientos que estuvieron previamente con CC mostraron una menor RP del suelo ($p < 0,05$). Sin embargo, no se pudo comprobar un efecto diferencial entre los dos CC sobre esta propiedad.

Coincidiendo con estos resultados, Sanchez *et al.* (2012) comprobaron que los CC no promovían cambios en el corto plazo en la RP de los primeros 10 cm de un Oxisol de Brasil. Por su parte, Cáceres Díaz *et al.* (2008) observaron en suelos Haplustoles óxicos y Argiacuoles vérticos de la provincia de Chaco, que la inclusión de los CC sorgo, soja y moha, no aportaban diferencias significativas en el índice de cono respecto a una situación con monocultivo de algodón.

De acuerdo a los resultados del presente trabajo, la resistencia a la penetración sería una propiedad menos

efectiva que la densidad aparente, en detectar los cambios de corto plazo producidos por la inclusión de cultivos de cobertura.

Conductividad hidráulica saturada

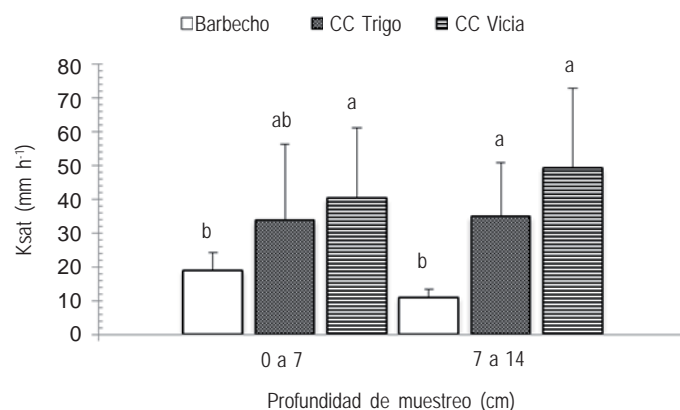
En la Figura 5 se pueden observar los resultados promedio de Ksat, obtenidos por profundidad y tratamiento.

En el estrato superficial (0-7 cm) solo el tratamiento CC Vicia presentó una mayor Ksat ($p < 0,05$) respecto al Barbecho, sin lograr las parcelas con CC Trigo, diferenciarse de las otras dos situaciones evaluadas. Contrariamente, a mayor profundidad (7-14 cm) ambos CC generaron una mayor ($p < 0,05$) Ksat respecto al Barbecho, sin encontrar diferencias entre CC. El rango de resultados de Ksat obtenido en el presente trabajo, coincide con el determinado en laboratorio por Sasal *et al.* (2010), realizado con muestras correspondientes a un ensayo de distintas sucesiones de cultivos bajo SD, en un Argiudol ácuico de Entre Ríos. Al mismo tiempo, los valores de Ksat observados en la Figura 5, son muy inferiores a los determinados en el trabajo anteriormente mencionado (Sasal *et al.*, 2010), con muestras de suelo provenientes de una pastura.

Keisling *et al.* (1994), en un ensayo de larga duración realizado en un suelo limoso de Arkansas (USA), determinaron que al usar gramíneas como CC, la Ksat era mayor en los primeros 10 cm, en comparación a los tratamientos que no presentaban dicha práctica agronómica. Contrariamente, Wagger & Denton (1989) en un estudio de tres años evaluando el efecto de diferentes especies de CC sobre un suelo franco arenoso, no encontraron cambios en la Ksat de los primeros 20 cm, respecto al barbecho invernal.

Figura 5. Conductividad hidráulica saturada (Ksat) al momento de la cosecha de los cultivos de verano. Letras diferentes en el mismo espesor de suelo (0-7 o 7-14 cm), indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) medida por el test de Fisher. Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.

Figure 5. Saturated hydraulic conductivity (Ksat) at summer harvest moment. Different letters on the same soil depth (0-7 or 7-14 cm) indicate significant differences between treatments ($p < 0,05$), measured by Fisher test. Vertical lines above each bar represent the standard deviation of the mean.



Las raíces de los cultivos generan nuevos poros, pero al mismo tiempo obturan los ya formados, dando como resultado respuestas contrastantes respecto al movimiento de agua en el suelo. En este sentido, diversos autores (Angulo Jaramillo *et al.*, 1997; Swardji & Eberbach, 1998; Bodner *et al.*, 2008) explicaron la disminución en la Ksat obtenida en sus ensayos, a partir del efecto de la obturación de poros por parte de las raíces. Por su parte, en otros estudios (Azevedo *et al.*, 1998; Rasse *et al.*, 2000; Cameira *et al.*, 2003), se sugirió que la mayor tasa de movimiento de agua observada, era generada por la acción del crecimiento radicular.

En el presente trabajo, al año de haber sido incorporados los CC, se observaron mejoras en la Ksat de ambos estratos estudiados. En este sentido, los dos CC propiciaron un incremento promedio del 100% y 400% en la capacidad de transporte de agua dentro del suelo para las profundidades de 0-7 y 7-14 cm, respectivamente. No obstante, este comportamiento no se pudo relacionar con los resultados obtenidos de densidad aparente, porosidad estructural y resistencia a la penetración. En este sentido, Alaoui *et al.* (2011) mencionan que si bien la densidad aparente es el parámetro más frecuente utilizado para medir el grado de compactación de un suelo, no siempre es un indicador sensible de los efectos generados por la densificación, particularmente respecto al transporte de agua dentro del suelo. Según estos autores, esto se debería a que para un mismo estado de compactación registrado en un mismo suelo, la geometría y conectividad de los poros puede ser diferente. De esta manera, si bien dicha técnica de medición define de manera global el estado de densificación de un suelo, no evalúa la conectividad y continuidad del sistema de poros que conducen el agua a flujo saturado.

Estabilidad de agregados

En la Figura 6 se detallan los valores del DMP promedio (Le Bissonnais, 1996), de acuerdo a los distintos tratamientos evaluados y según el cultivo de verano implementado, para dos profundidades: 0-5 (Fig. 6a) y 5-20 cm (Fig. 6b).

Según las clases de estabilidad estructural establecidas por Le Bissonnais (1996), de 0 a 5 cm todos los tratamientos evaluados se ubicaron dentro de la categoría "estable", ya que dicho índice varió entre 1,3 y 2 mm. En el estrato más profundo sucedió algo similar, con la excepción de la situación testigo bajo el cultivo de soja, obteniendo

en dicho caso un DMP levemente inferior a 1,3 mm, por lo que su clase de estabilidad estructural fue "media".

No obstante esta homogeneidad encontrada en la categoría de estabilidad estructural del estrato superficial, se pudieron establecer diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. De esta manera y de acuerdo a lo observado en la Figura 6a, en los primeros 5 cm la estabilidad de agregados a la cosecha del maíz fue favorecida por el CC Trigo y en menor medida por el CC Vicia, respecto al Barbecho. A su vez a la cosecha de la soja (Fig. 6a), la estabilidad estructural proveniente de las parcelas con ambos CC no fue diferente entre dichos tratamientos, pero superior a la obtenida en el Barbecho ($p < 0,05$).

Restovich *et al.* (2011) al evaluar el efecto de distintos CC, encontraron diferencias significativas en la estabilidad estructural de los primeros 5 cm de un Argiudol de Pergamino. Según estos autores, estas diferencias se dieron solamente entre el CC avena y el barbecho invernal, sin poder visualizar el mismo comportamiento en otros CC evaluados. A su vez, este efecto favorable no persistió a la cosecha de los cultivos de grano como tampoco al segundo año del ensayo. Dapaah & Vyn (1998) también reportaron incrementos en la estabilidad de los agregados en los primeros 7 cm de suelos franco arenosos y francos, luego de un solo año de la implementación de los CC. Estos autores pudieron determinar, una mayor persistencia del efecto favorable del ryegrass sobre la estructura del suelo, respecto a la generada por el trébol rojo y el rábano.

Las especies vegetales influyen en la formación y estabilización de los agregados, a partir del efecto físico del entramado de sus raíces y a través de sus residuos orgánicos que se incorporan al suelo. Estos restos vegetales constituyen una fuente de energía para los microorganismos del suelo, los cuales secretan sustancias orgánicas que actúan como cementantes de las partículas (Blankiship *et al.*, 2016). En este sentido, Wright *et al.* (1999) encontraron que algunos compuestos producidos por los hongos (glycoproteína y glomalina) eran esenciales para la estabilidad de los agregados, y que su máximo efecto se generaba a partir de la falta de remoción del suelo y del activo crecimiento de las raíces. Amezketa (1999) menciona que el diferente patrón de raíces sumado a su distinto funcionamiento y fisiología, afectan la estructura del suelo y que en ese sentido las monocotiledóneas son superiores a las dicotiledóneas y las pasturas mejores que los cereales, ya

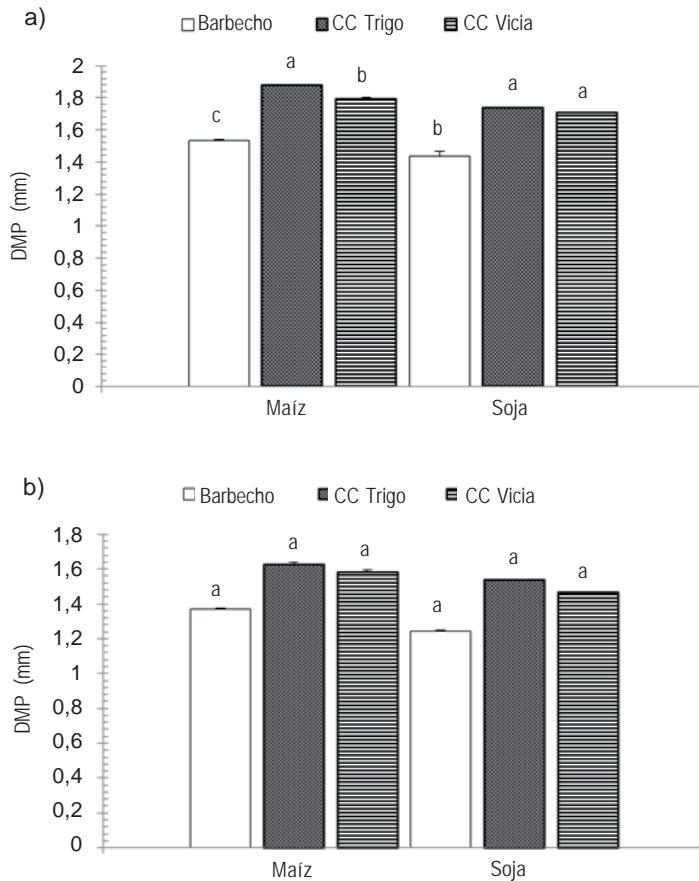


Figura 6. Diámetro medio ponderado (DMP) de los agregados correspondientes a los distintos tratamientos evaluados a dos profundidades (6 a: 0-5 cm; 6 b: 5-20 cm). Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos según el cultivo de grano antecedente, medida por el test de Fisher. Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.

Figure 6. Aggregate mean weight diameter (DMP) corresponding to different treatments evaluated at two depths (6a: 0-5 cm; 6b: 5-20 cm). Different letters above bars indicate significant differences ($p < 0,05$) between treatments for each summer crop, as measured by the Fisher test. Vertical lines above each bar represent the standard deviation of the mean.

que las primeras presentan mayor biomasa radicular que las segundas. Sin embargo, si bien Haynes & Beare (1997) encontraron que la estabilidad estructural bajo el cultivo de distintas gramíneas era favorecida por una mayor longitud y masa radicular, estos mismos autores pudieron determinar que las leguminosas (con un menor desarrollo de raíces), generaban una mejor o igual condición estructural que la desarrollada por las gramíneas. Estos autores asociaron estas diferencias de comportamiento, a la diferente composición de las poblaciones microbianas rizosféricas encontradas entre ambos tipos de especies vegetales. Por su parte, Miller & Radcliffe (1992) al igual que Curtin *et al.* (1994) señalaron que debido a la baja relación C/N presente en las leguminosas, es posible estabilizar los agregados más rápidamente debido a la mayor tasa de descomposición de sus rastrojos. En la bibliografía se mencionan varios ejemplos contradictorios de los efectos de distintas especies sobre la estabilidad estructural (Amezqueta, 1999). Sin embargo, los resultados son coincidentes en que

una mayor intensificación en la secuencia de cultivos, condiciona favorablemente a esta propiedad (Novelli, 2013; Kraemer, 2015).

En el presente trabajo, en el estrato de 5 a 20 cm, se observó una tendencia similar a la encontrada en superficie (Fig. 6b), aunque las diferencias encontradas en el DMP promedio no fueron significativas entre ninguno de los tratamientos evaluados, independientemente del cultivo de verano implementado. Por lo tanto, al considerar la distinta profundidad de muestreo, se comprobó que el estrato superficial fue donde más evidencias se observaron en el corto plazo respecto al efecto diferencial de los distintos tratamientos evaluados.

Relación entre los cambios generados en las propiedades físicas con el rendimiento de los cultivos de verano

No obstante el efecto favorable de los CC sobre las propiedades físicas analizadas, al vincular el resultado de

las mismas con los rendimientos de ambos cultivos de verano, solo se pudo comprobar en maíz una relación positiva de sus rendimientos con la porosidad estructural de los primeros 5 cm (coeficiente de correlación: 0,83; $p < 0,01$), mientras en soja solo existió una relación significativa de sus rendimientos con la resistencia mecánica a la penetración del estrato de 5 a 10 cm (coeficiente de correlación: -0,68; $p < 0,05$). En la Fig. 7 (a y b) se detallan las características de la relación entre los parámetros mencionados.

Según se observa en la misma, los rendimientos de maíz y de soja se ordenaron en función de los cambios que cada variable física experimentó. Sin embargo, únicamente en el maíz los distintos tratamientos se agruparon de acuerdo al valor de PE y del rendimiento, mientras que en soja similares valores de producción de grano y de RP fueron encontrados en tratamientos diferentes. A su vez, la mejor PE (0-5 cm) generada a partir del CC Trigo, no generó beneficios en los rendimientos del maíz, respecto a los obtenidos en el tratamiento Barbecho (Fig. 7a).

Por lo tanto y según lo analizado, las mejoras obtenidas en las propiedades físicas a partir de la incorporación de los CC, no habrían sido los principales factores que incidieron en el rendimiento de ambos cultivos de verano.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de las precipitaciones ocurridas durante el ensayo, se pudo inferir que las condiciones climáticas vigentes durante el mismo no habrían afectado negativamente el desarrollo de los cultivos de verano. Sin embargo, en el momento de la floración del maíz, la lámina de agua disponible fue muy baja para todos los tratamientos analizados, a pesar de lo cual los rendimientos máximos obtenidos por dicho cultivo fueron normales. Por su parte, y si bien hubo un mayor consumo de agua durante el crecimiento de los CC respecto al Barbecho, las parcelas ocupadas durante el invierno con vicia y trigo, no presentaron un menor contenido hídrico en los primeros 60 cm de suelo a la siembra, floración y cosecha de los cultivos

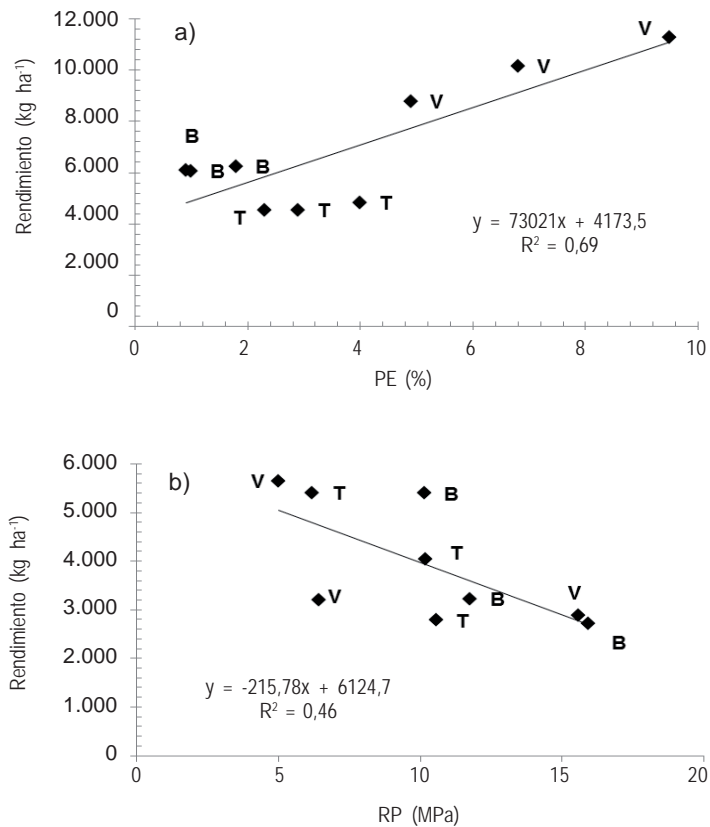


Figura 7. Relación entre los rendimientos de maíz (a) y soja (b) con la PE (0-5 cm) y RP (5-10 cm), respectivamente. B: Barbecho, T: CC Trigo, V: CC Vicia.

Figure 7. Relationship between corn yields (a) and soybean (b) with PE (0-5 cm) and RP (5-10 cm), respectively. B: Winter fallow, T: CC Wheat, V: CC Vetch.

de verano. En el estrato superficial, las distintas propiedades edáficas evaluadas respondieron mayoritariamente y en el corto plazo, en forma favorable a la acción de los CC evaluados. A su vez, se comprobaron diferencias superficiales en la PE y en el DMP promedio determinado luego del maíz, entre los tratamientos con distintos CC. Para el primer caso fue más favorable la acción del CC Vicia, mientras que para el segundo fue el CC Trigo. En profundidad, solo hubo un mejoramiento de la Ksat producido por ambos CC, mientras que la PE fue incrementada solo a partir del CC Trigo. De acuerdo a los resultados vistos en el presente trabajo, la estabilidad de los agregados de los primeros centímetros de suelo determinada a la cosecha del maíz, fue la propiedad física más sensible en detectar los cambios rápidos generados por los CC, mientras que la resistencia mecánica a la penetración fue la menos efectiva, independientemente de la profundidad y del cultivo de verano considerado. En la búsqueda de alternativas para reducir los procesos de escurrimiento y erosión, los CC aparte de brindar una protección física al suelo interceptando la energía de la lluvia, son una herramienta útil de manejo, en la medida que mejoran en el corto plazo la condición física edáfica superficial.

BIBLIOGRAFÍA

- Alaoui, A; J Lipiec & HH Gerke. 2011. A review of the changes in the soil pore system due soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Till. Res.* 115-116: 1-15.
- Álvarez, C; C Scianca; M Barraco & M Díaz-Zorita. 2010. Cambios en suelos bajo siembra directa con cereales de invierno de cobertura. *En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Rosario, Mayo - Junio de 2010.
- Álvaro-Fuentes, J; JL Arrúe; R García & MV López. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145: 390-396.
- Amezqueta, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *J Sustain. Agr.* 14(2/3): 83-151.
- Angulo-Jaramillo, R; F Moreno; BE Clothier; JL Thony; G Vachaud; E Fernandez-Boy & JA Cayuela. 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disc infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 27-32.
- Azevedo, AS; RS Kanwar & R Horton. 1998. Effect of cultivation on hydraulic properties of an Iowa soil using tension infiltrometers. *Soil Sci.* 163: 22-29.
- Blanco-Canqui, H; MM Mikha; R Presley & MM Claassen. 2011. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 1471-1482.
- Blanco-Canqui, H; JD Holman; AJ Schlegel; J Tatarko & T Shaver. 2013. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: Effects on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77: 1026-1034.
- Blankinship, JC; SJ Fonte; J Six & JP Schimel. 2016. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem. *Geoderma* 272: 39-50.
- Bodner, G; W Loiskandl; G Buchan & HP Kaul. 2008. Natural and management-induced dynamics of hydraulic conductivity along a cover-cropped field slope. *Geoderma* 146: 317-325.
- Bodner, G; P Scholl; W Loiskandl & HP Kaul. 2013. Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties. *Geoderma* 204: 120-129.
- Bodner, G; D Leitner & HP Kaul. 2014. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant Soil* 380: 133-151.
- Burke, W; D Gabriels & J Bruma. 1986. Soil structure assessment. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 92.
- Cáceres Díaz, R; J Gutiérrez; R Luque & J Petkoff Bankoff. 2008. Abonos verdes en el monocultivo de algodón con siembra convencional y su efecto sobre la resistencia mecánica a la penetración. *En: Resúmenes XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo.* Potrero de los Funes, San Luis, 13 al 16 de mayo de 2008. Buenos Aires. 1 Cd-Rom.
- Cameira, MR; RM Fernando & LS Pereira. 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil Till. Res.* 70: 131-140.
- Carfagno, PF; M Eiza; A Quiroga; F Babinec; C Chagas & R Michelena. 2013. Agua disponible en monocultivo de soja con cultivos de cobertura y barbechos reducidos en la región semiárida y subhúmeda pampeana. *Ciencia del Suelo* 31(1): 67-81.
- Carfagno, PF; MJ Eiza; JM Rivera Vazquez; A Quiroga & F Babinec. 2014. Cultivos de cobertura: efecto sobre la porosidad y el rendimiento de soja. *En: Actas en CD del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional «Materia Orgánica y Sustancias Húmicas.* 5 al 9 de mayo de 2014. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Carof, M; S de Tourdonnet & J Roger-Estrade. 2005. Changes of structural porosity due to climatic and biological activities under no-till cropping systems with permanent living cover crops: Impacts on soil hydrodynamic properties. *Proc. III World Congress Conservation Agriculture, Nairobi, Kenya [CD].*
- Carof, M; S de Tourdonnet; Y Coquet; V Hallaire & J Roger-Estrade. 2007. Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use Manage.* 23: 230-237.
- Caviglia, OP; VO Sadras & FH Andrade. 2011. Yield and quality of wheat and soybean in sole- and double-cropping. *Agron J.* 103: 1081-1089.
- Chen, G & RR Weil. 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil* 331: 31-43.
- Chen, Y; C Cavers; S Tessier; F Moreno & D Lobb. 2005. Short-term tillage effects on soil cone index and plant development in a poorly drained, heavy clay soil. *Soil Till. Res.* 82: 161-171.
- Chenu, C; Y Le Bissonnais & D Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1479-1486.
- Curtin, D; CA Campbell; RP Zentner & GP Lafond. 1994. Long-term management and clay dispersibility in two Haploborolls in Saskatchewan. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 962-967.
- Dapaah, HK & TJ Vyn. 1998. Nitrogen fertilization and cover crop effects on soil structural stability and corn performance. *Commun. Soil Sci. Plan.* 29: 2557-2569.

- Fronning, BE; KD Thelen & D Min. 2008. Use of manure, compost and cover crops to supplant crop residue carbon in corn stover cropping systems. *Agron. J.* 100: 1703-1710.
- Galantini, J. 2008. Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Editorial de la Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. 308 p ISBN 978-987-655-009-3.
- Haynes, RJ & MH Beare. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* 29(11/12): 1647-1653.
- Hoegenauer, KL. 2014. Conservation system impacts on soil properties and water-use efficiency in the southeastern U.S. coastal plain. Tesis de Maestría. Universidad de Auburn, Alabama, Estados Unidos.
- INTA. 2009. Carta de suelos de la República Argentina: hoja 3560-4 Capitán Sarmiento. http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/3560/C_Sarmiento/index.htm
- Keisling, TC; HD Scott; BA Waddle; W Williams & RE Frans. 1994. Winter cover crops influence on cotton yield and selected soil properties. *Commun. Soil Sci. Plan.* 25(19-20): 3087-3100.
- Klute, A & C Dirsken. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: A. Klute (ed) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2nd. Ed. *Agronomy* 9: 687-734.
- Kraemer, FB. 2015. Influencia de los factores composicionales y la evolución estructural en el comportamiento hidro-físico de suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. Tesis de Doctor. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. FAUBA. Argentina.
- Le Bissonnais, Y & D Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 39-48.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-37.
- Liebman, M & AS Davis. 2000. Integration of soil, crop, and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Res.* 40: 27-47.
- Luo, Z; E Wang & OJ Sun. 2010. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. *Geoderma* 155: 211-223.
- Miller, WP & DE Radcliffe. 1992. Soil crusting in the southeastern United States. In: Summer, ME & BA Stewart (eds). *Soil crusting: Chemical and physical processes.* Adv. Soil S. Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Minitab. 2007. Minitab Statistical Software Release 15 for Windows. Minitab Inc. State College, Pennsylvania.
- Moore, EB; MH Wiedenhoef; TC Kaspar & CA Cambardella. 2014. Rye cover crops effects on soil quality in no-till corn silage-soybean cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78: 968-976.
- Mukherjee A & R Lal. 2015. Short-term effects of cover cropping on the quality of a Typic Argiaquolls in Central Ohio. *Catena* 131: 125-129.
- Novelli, LE. 2013. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Tesis de Doctor. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. FAUBA. Argentina.
- Obi, ME & PC Nwabude. 1988. The effect of different management practices on the physical properties of a sandy loam soil in southern Nigeria. *Soil Till. Res.* 12(1): 81-90.
- Rasse, DP; A J M Smucker & D Santos. 2000. Alfalfa root and shoot mulching effects on soil hydraulic properties and aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 725-731.
- Restovich, S; A Andriulo & C Améndola. 2011. Introducción de los cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: efecto sobre algunas propiedades de suelo. *Ciencia del Suelo* 29(1): 61-73.
- Richards, LA. 1965. Physical condition of water in soil. In: CA Black (ed), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties Including Statistics of Measurement and Sampling.* Agronomy 9. Am. Soc. Agron., Madison, WI, pp. 128-152.
- Sainju, UM; WF Whitehead & BP Singh. 2003. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools. *Can. J. Soil Sci.* 83:155-165.
- Salmerón, M; R Isla & J Caverro. 2011. Effect of winter cover crops species and planting methods on maize yield and N availability under irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* 123: 89-99.
- Sanchez, E; MF Maggi; AM Genú & MML Muller. 2012. Winter cover crops, plant biomass production and soil resistance. *Appl. Res. & Agrotec.* 5 (3): 33-40.
- Sasal, MC; MG Castiglioni & MG Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- Steele, MK; FJ Coale & RL Hill. 2012. Winter annual cover crop impact on no-till soil physical properties and organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76: 2164-2173.
- Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.* 30(1): 27-51.
- Suwardji, P & PL Eberbach. 1998. Seasonal changes of physical properties of an Oxyc Paleustalf Red Kandosol after 16 years of direct drilling or conventional cultivation. *Soil Till. Res.* 49: 65-77.
- Teasdale, JR; LO Brandsaeter; A Calegari & FS Neto. 2007. Cover crops and weed management. In: MK Upadhyaya & RE Blackshaw (eds) *Non-chemical weed management.* CAB Int., Chichester, UK. p. 49-64.
- Torres, LG; JR Benites & AM Vilela. 2001. Conservation agriculture: A worldwide challenge. FAO, Rome.
- Totis de Zeljkovich, LE & CM Rebella. 1980. Necesidades de agua de un cultivo de maíz en la región de Pergamino. Congreso Nacional de Maíz, 3º, Pergamino. Actas. Pergamino, A.I.A.N.B.A. pp 211-220.
- Unger, PW & MF Vigil. 1998. Cover crops effects on soil water relationships. *J. Soil Water Conserv.* 53(3): 200-207.
- USDA-NRCS. 2010. Keys to Soil Taxonomy, Eleventh Edition. Soil Survey Staff.
- Verhulst, N; B Govaerts; E Verachtert; A Castellanos-Navarrete; M Mezzalama & P Wall. 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems? In: R Lal & B A Stewart (eds), *Food security and soil quality.* Adv. Soil S. CRC Press, Boca Raton FL. p. 137-208.
- Villamil, MB; GA Bollero; FW Darmody; RG Simmons & DG Bullock. 2006. No-till corn/soybean systems including winter cover crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1936-1944.

- Wagger, MG & HP Denton. 1989. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no-till corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1206–1210.
- Williams, SM & RR Weil. 2004. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1403-1409.
- Willoughby, GL & EJ Kladvko. 2002. Water infiltration rates following reintroduction of *Lumbricus terrestris* into no-till fields. *J. Soil Water Conserv.* 57: 82-88.
- Wright, SF; JL Starr & IC Paltineanu. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1825-1829.
- Yunusa IAM & PJ Newton. 2003. Plants for amelioration of subsoil constraints and hydrological control: the primer-plant concept. Plants for soil management. *Plant Soil:* 1-21.
- Zhu, JC; CJ Gantzer; SH Anderson; EE Alberts & PR Beuselinck. 1989. Runoff soil and dissolved nutrient losses from no-till soybean with winter cover crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1210-1214.