

## Capítulo 15

### **Uso combinado de la descompactación mecánica y centeno (Secale cereale) como cultivo de cobertura**

### **Combined use of mechanical decompaction and rye (Secale cereale) as a cover crop**

Joaquín Eiza Maximiliano<sup>1\*</sup>  
*eiza.maximiliano@inta.gob.ar*

Patricia Carfagno

*Autor de contacto*

---

<sup>1</sup> INTA Instituto de Suelos Nicolas Repetto y Los Reseros s/nº (1686), Hurlingham, INTA Provincia de Buenos Aires.

## ÍNDICE CAPÍTULO 15

■ RESUMEN .....	480
■ ABSTRACT .....	481
■ INTRODUCCIÓN .....	482
■ SITIOS DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA UTILIZADA .....	485
■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	486
■ CONCLUSIÓN .....	492
■ AGRADECIMIENTOS .....	492
■ BIBLIOGRAFÍA .....	493

## ■ RESUMEN

El mayor impacto físico de las prácticas agrícolas sobre los suelos son la compactación y la erosión. Existen evidencias del efecto negativo sobre las propiedades físicas del suelo inducido por la siembra directa (SD) asociadas al monocultivo, con la formación de estructuras superficiales masivas, que muestran el desarrollo de compactación superficial y de agregados y poros laminares con disminución en la emergencia de plántulas, menor desarrollo radicular y disminuciones en el rendimiento. Una práctica es la remoción mecánica de capas compactadas mediante el uso de implementos descompactadores o escarificadores (e.g. *para-till*, *paraplow*, *cultivie*). Otra alternativa para la protección y la generación biológica de porosidad superficial es la incorporación de cultivos de cobertura (CC) invernales, que mediante la exploración de sus raíces generan un efecto positivo sobre la macro y meso porosidad. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de cada una de dichas prácticas en suelos compactados, como también el uso combinado de ambas prácticas en la recuperación de suelos compactados y sobre algunas propiedades físicas y el rendimiento de soja. En un Hapludol se evaluó el efecto combinado de la descompactación mecánica y la implantación de centeno con determinaciones de materia seca del CC y rendimiento de soja. Contenidos de humedad, al momento de secado de los CC, y a la siembra de soja, densidad aparente (DA). Se realizaron determinaciones de resistencia mecánica a la penetración (RMP) hasta los 80 cm de profundidad, con un penetrómetro Eijkelkamp digital. Se registró una disminución de la DA, RMP y aumento de la porosidad total, infiltración. Con lo cual, las prácticas combinadas de descompactación mecánica y la inclusión de centeno como CC mostraron mejoras la condición física del suelo y la consecuente mejora de los rendimientos de soja.

### Palabras clave

compactación,  
resistencia a la penetración,  
rendimiento, soja.

## ■ ABSTRACT

The greater physical impact of agricultural practices on soils are compaction and erosion. There are evidences of the negative effect on the physical properties of the soil induced by the no till (NT) associated with the monoculture, with the formation of massive surface structures, which represent the development of surface compaction and of aggregates and lamellar pores with decrease in the emergence seedlings, lower root development and decreases in yield. One practice is the mechanical removal of compact layers through the use of scarifiers (for example, para-till, paraplow, cultivie). Another alternative for the protection and biological generation of surface porosity is the incorporation of winter cover crops (CC), which by exploring their roots generate a positive effect on macro and meso porosity. The objective is to evaluate the effect of each of the practical tests in compact soils, as well as the combined use of both practices in the recovery of compact soils and on some physical properties and the yield of soybean. In one analysis the combined effect of mechanical decompression and rye implantation with dry matter determinations of CC and soybean yield were evaluated. Moisture contents, the time of sectioning of the CC, and a soybean sowing, bulk density (DA). Penetration resistance (RMP) measurements were performed up to 80 cm depth, with a digital Eijkelkamp penetrometer. A decrease of the DA, RMP and increase of total porosity, infiltration was recorded. Thus, the combined practices of mechanical decompression and inclusion of rye as CC showed improvements in soil physical condition and consequently improved soybean yields.

**Keywords** | compaction,  
penetration resistance,  
yield, soybean.

## ■ INTRODUCCIÓN

El cambio sustancial de las prácticas agrícolas durante los últimos 50 años ha sido uno de los principales motivos de la degradación ambiental a través de su impacto sobre el suelo y los recursos hídricos (Zalidis *et al.*, 2002). En las situaciones en que las propiedades del suelo sean alteradas por el cultivo o el pastoreo, es importante determinar si alguno de los cambios inducidos propiciará efectos adversos en el sistema (Batey & McKenzie, 2006). En este sentido, el mayor impacto físico de las prácticas agrícolas sobre los suelos son la compactación y la erosión (Larsen *et al.*, 1994; Zalidis, *et al.*, 2002).

La compactación del suelo puede ser vista conceptualmente de forma estática o dinámica y también desde aplicaciones prácticas. Analizado desde un punto de vista dinámico, la compactación es una deformación física, mientras que desde una interpretación estática es la característica relacionada a la resistencia del suelo interpretada por un incremento en su densidad aparente (DA) (Lal & Shukla, 2004). Cuando se cambia el estado de compactación de un suelo, sólo cambia el estado estático. Dado que el material del suelo y las propiedades del estado determinan las propiedades del comportamiento, el estado compactado indica un probable cambio en dicho comportamiento del suelo (Yavuzcan *et al.*, 2002). En la práctica, la compactación del suelo es un proceso que conduce a la compresión de una masa de suelo en un volumen más pequeño, resultando la deformación en una disminución de la porosidad total y de la macroporosidad y, consecuentemente reduciendo la capacidad de transmisión de agua e intercambio gaseoso (Yavuzcan *et al.*, 2002).

El proceso de agriculturización que ha atravesado Argentina en las últimas décadas aumentó la superficie sembrada bajo siembra directa (SD), que ya supera los 30 millones de hectáreas, representando más del 90% del área a nivel nacional (Nocelli Pac, 2015). Los suelos cultivados bajo SD son sometidos a una alta intensidad de tránsito pesado que genera compactación, especialmente cuando las operaciones se realizan con suelo húmedo y alta presión de neumáticos (Botta *et al.*, 2004).

El principio de la SD es mantener al menos el 30% de la superficie, con los residuos en superficie a fin de aumentar la materia orgánica disponible a largo plazo y tener suficiente energía y nutrientes para los microorganismos heterotróficos. Entre los beneficios de la SD, la presencia de rastrojo en superficie disminuye la velocidad de escurrimiento del flujo hídrico, favorece la infiltración y reduce las pérdidas por evaporación (Dardanelli *et al.*, 1994). Además, según el tipo de suelo y la estructura radical del cultivo implantado, el impacto de la SD sobre las condiciones físicas y el almacenamiento de agua promueve el crecimiento activo de las raíces en gran parte del perfil. Así, en perfiles de suelo como el de los Haplustoles las raíces pueden superar los dos metros de profundidad (Dardanelli *et al.*, 2003) y hacer un uso intensivo del agua acumulada en el perfil.

Otra característica atribuible a este sistema de labranza es la estratificación de distintas propiedades edáficas, entre ellas el contenido de carbono; así, Franzluebbers (2002) concluye que la marcada estratificación del carbono es un buen indicador de la calidad del suelo, independientemente del tipo de suelo y régimen climático. Sin embargo, esta estratificación, normalmente asociada a la SD, ejerce en los suelos de la región pampeana argentina poca o escasa recuperación en la mayoría de las propiedades edáficas evaluadas (Álvarez *et al.*, 2009). Por lo cual, en condiciones de SD se observa un deterioro de la capa superficial, ya que allí la compactación generada por la SD afecta propiedades hidráulicas como la tasa de infiltración. Como consecuencia, en suelos con un alto contenido de limo u arenas finas, la restricción de la entrada de agua constituye una limitante importante al cultivo bajo SD (Álvarez *et al.*,

2009), debido a que la compactación superficial y subsuperficial interactúa fuertemente con las condiciones ambientales durante el ciclo de cultivo (Díaz Zorita, 2004).

Este sistema mejora las condiciones para el tráfico, pero esa mayor resistencia mecánica puede traer modificaciones físicas que conducen a su compactación (Hilbert & Tesouro, 2002; Bonel *et al.*, 2004; Botta *et al.*, 2010). La compactación del suelo como resultado del tráfico incrementa la densidad aparente (DA), la resistencia a la penetración y disminuye la porosidad total. La compactación superficial es función del número de pasadas y de la presión de contacto y la subsuperficial del número de pasadas y de la masa total por eje (Jorajuria *et al.*, 1997).

Existen evidencias experimentales del efecto negativo sobre las propiedades físicas del suelo inducidas por la SD principalmente asociada al monocultivo, en los suelos franco-limosos de la región pampeana, los que, a menudo, poseen porosidad estructural baja e inestable (Varela *et al.*, 2011). Cosentino y Pecorari (2002), Sasal *et al.* (2006) y Strudley *et al.* (2008), entre otros, informan sobre la formación de estructuras superficiales masivas, que muestran el desarrollo de compactación superficial y de agregados y poros laminares por efecto de la SD; estos cambios físicos se expresan más allá de los primeros centímetros de profundidad, sumándose a procesos de compactación sub-superficial. En la región pampeana central argentina se han observado aumentos de la densidad sub-superficial (Rollán *et al.*, 2004), entre otros problemas o efectos que, como Sasal *et al.* (2006) concluyen, suceden especialmente en suelos en los cuales prevalecen limos finos (2-20  $\mu\text{m}$ ) y en rotaciones con alta proporción de soja, manejo característico de la región central de la provincia de Córdoba. Diferentes investigaciones muestran la disminución en la emergencia de plántulas, menor desarrollo radicular y disminuciones en el rendimiento de diferentes cultivos a causa de la compactación de los suelos (Hamza y Anderson, 2005; Sadras *et al.*, 2005).

Estos antecedentes no limitan el alcance de la SD como práctica de manejo sustentable, pero sí generan interrogantes en relación a la conveniencia de realizar tareas de descompactación mecánica. Las recomendaciones acerca de cómo minimizar o remover una excesiva compactación son obstaculizadas por la definición, mediciones, predicciones y la evaluación de la compactación (Yavuzcan, 2000). Por otra parte, ante cambios significativos en otras propiedades químicas, como el nivel del carbono orgánico, se puede mantener la condición de no remoción, dado que la labranza periódica altera la estructura del suelo y afecta negativamente a la productividad de los cultivos (Díaz Zorita *et al.*, 2004).

La compactación de los suelos cultivados es una problemática muy compleja que implica su degradación química, física y biológica. Consecuentemente, aparecen mayores demandas de fertilizantes y pesticidas acompañadas de posibles problemas de erosión conducentes al aumento del escurrimiento. El esfuerzo para roturar los suelos densificados es mayor, ocasionando inmediatos incrementos de gastos de combustible que generan siempre efectos secundarios nocivos, como la producción e incorporación a la atmósfera de gases contaminantes como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , generadores de calentamiento global y cadenas de hidrocarburos parcialmente oxidados. La SD ha permitido disminuir la intensidad de tráfico en cuanto al número de pasadas, pero no en cuanto a la masa que el suelo agrícola, siempre deformable, debe soportar. Como resultado, aparecen asociados al tráfico, problemas de compactación inducida que en muchos casos pueden localizarse en capas subsuperficiales con el consiguiente problema de su difícil remoción.

En tal sentido, un punto a analizar es el efecto que los cambios en las propiedades físicas, inducidas por la SD, ejercen sobre la distribución del espacio poroso. Una manera de caracterizarlo es a través

de la relación funcional entre el contenido hídrico y la energía de retención, ya que, como lo resumieron Rawls *et al.* (1991), dichas funciones se hallan afectadas por un importante número de factores ambientales, edáficos y de manejo, donde la granulometría y mineralogía, así como la geometría y grado de continuidad del espacio poroso, son los principales parámetros a partir de los cuales se puede hacer el cálculo de porosidad. Ferreras *et al.* (2001) estudiaron el efecto de dos sistemas de labranza: vertical y SD, sobre algunas propiedades del suelo y el rendimiento de soja. En la experiencia, realizada sobre un suelo Argiudol típico, se registraron menores valores de porosidad estructural bajo SD. Concluyeron, de esta manera, que esta variable puede incidir sobre el volumen de exploración de raíces y el movimiento de agua y aire. En tal sentido, Carfagno & Eiza (2017), también reportaron una relación directa entre los cambios en la distribución de poros y los rendimientos de soja y maíz bajo SD en un Argiudol típico del norte de la provincia de Buenos Aires, obteniendo incrementos de hasta 15% de porosidad total por la inclusión de cultivos de cobertura (CC).

Una práctica común para intentar revertir los efectos producidos por la compactación es el uso de descompactadores (Melero *et al.*, 2011, Taboada *et al.*, 1998). La remoción mecánica de capas compactadas mediante el uso de implementos descompactadores o escarificadores (e.g. *para-till*, *paraplow*, *cultivie*) ha sido implementada en diferentes investigaciones con resultados variables. En este sentido, Botta *et al.* (2006) encontraron un incremento del 24,5% en el rendimiento de un cultivo de girasol en un Haplustol Entico de La Pampa. Asimismo, Álvarez *et al.*, (2009) evaluaron la resistencia a la penetración (RP) y el efecto de la descompactación sobre el rendimiento de maíz en seis ensayos en Argiudoles Típicos de la Pampa Ondulada, luego de 10 años de agricultura continua bajo SD. Estos autores encontraron que los tratamientos descompactados disminuyeron significativamente la resistencia de los suelos, esta menor resistencia persistió hasta antes de la cosecha de maíz. Asimismo, se encontraron respuestas significativas en rendimiento de maíz bajo el tratamiento descompactado. Contrariamente Jin *et al.* (2007) no encontraron diferencias significativas en los rendimientos de trigo y maíz en descompactación bajo SD en el nordeste de China.

Otro motivo que propicia la densificación de los suelos está relacionado con los altos contenidos de arenas finas y muy finas que presentan estos suelos, que sumado a la escasa cobertura, los expone a procesos de encostrado y sellado, con la consecuente reducción de la porosidad. Una de las alternativas para la protección y la generación biológica de porosidad superficial es la incorporación de CC invernales, que mediante la exploración de sus raíces generan un efecto positivo sobre la macro y meso porosidad (Villamil *et al.*, 2006). En este sentido, Sainju *et al.* (2003) y Ramos *et al.* (2010) hallaron mejoras en la porosidad total y en la estabilidad de agregados superficiales al incluir CC a las rotaciones de cultivos de grano. Asimismo, Latif *et al.* (1992), observaron disminuciones en la densidad aparente (DA) y en la RP, en rotaciones que incluían CC. Camargo & Alleoni (1997) expresaron que el uso de plantas con raíces vigorosas como herramientas generó una ruptura más uniforme de capas compactadas que la implementación de métodos mecánicos. La utilización de CC para mejorar biológicamente estructuras degradadas bajo SD continua es una práctica usualmente utilizada en el sur de Brasil (Campos *et al.*, 1999) pero en Argentina aún no es una práctica ampliamente difundida.


Respecto a cómo afectan los CC invernales el rendimiento del cultivo de verano sucesor, la información es variable. En este sentido, Williams & Weil (2004) obtuvieron rendimientos significativamente mayores en soja, encontrando 200 kg ha<sup>-1</sup> más de soja al incluir centeno como CC antecesor en la rotación. Asimismo, Ruffo *et al.* (2004), en rotaciones maíz-soja, que incluían centeno, vicia y una mezcla

de las dos especies como CC de invierno, concluyeron que los CC no afectaron el rendimiento de soja. Varios autores afirmaron que, los residuos y el desarrollo radicular de los CC aumentaron la infiltración, generando efectos positivos sobre los rendimientos de los cultivos sucesores (Colla *et al.*, 2000; Schwenke *et al.*, 2001; Blackshaw, 2008).

En contraposición a lo expresado anteriormente, algunos autores consideran que la inclusión de CC, en ambientes áridos y semiáridos, reduce la disponibilidad de agua del suelo y en consecuencia el rendimiento del siguiente cultivo de grano (Salako & Tian, 2003; Nielsen & Vigil, 2005). Así lo afirmaron Singer *et al.* (2007), quienes, en suelos limosos de EE.UU., observaron una disminución del 20 % en el rendimiento de soja que lo atribuyeron al consumo de agua por los CC antecesores. Mientras que, por el contrario, Carfagno *et al.* (2013) mostraron incrementos en la cantidad de agua disponible para el cultivo de grano luego de la inclusión de CC, así como también en la eficiencia de barbecho y en la cantidad de macro- y mesoporos, sin diferencias significativas de rendimiento de soja. Los CC pueden afectar el rendimiento de los cultivos principales, en forma ya sea positiva o negativa. Se pueden esperar incrementos en los rendimientos cuando el CC contribuye a un mejor control de malezas y plagas o a mejoras en las propiedades físicas y químicas del suelo. Los efectos negativos están dados por la competencia por recursos entre el CC y el cultivo de interés, como ya se adelantó, especialmente agua y nutrientes (Rimski-Korsakov *et al.*, 2016).

Debido a los escasos estudios realizados en el país en los que se combina la práctica de descompactación mecánica con la remediación biológica por inclusión de CC invernales, se realizaron diferentes ensayos de campo que evalúan estas prácticas. El objetivo de los mismos fue evaluar el efecto de cada una de dichas prácticas en suelos compactados, como también el uso combinado de ambas prácticas en la recuperación de suelos compactados y sobre algunas propiedades físicas y el rendimiento de soja.

## ■ SITIOS DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

En otoño de 2010 se instaló un ensayo sobre un Hapludol del Oeste de la provincia de Buenos Aires (36°9'50.85"S; 62°21'9.80"O). En este sitio se evaluó el efecto combinado de la práctica de descompactación mecánica y el de implantación de un CC invernale, para lo cual se diseñó un experimento factorial en bloques completos aleatorizados, con tres repeticiones y dos niveles en cada factor: a) grado de compactación (Compactado y Descompactado) en la parcela principal y b) cobertura invernale (Barbecho tradicional, o Testigo, y CC) en el otro factor, generándose, de esta manera cuatro combinaciones posibles. Cada unidad experimental contó con 100 m de ancho y 500 m de largo. En otoño de 2010 se realizó la descompactación en la parcela principal del ensayo con un descompactador de fabricación local **Figura 1** . La siembra del CC invernale se realizó inmediatamente después de la labor mecánica sembrándose centeno (*Secale cereale* var Quehué). Asimismo, en otoño de 2011 se repitió la siembra del mismo CC. Éste se dejó crecer hasta agosto, momento en el que se lo secó con glifosato.

Se determinó manualmente la cantidad de materia seca producida por el CC y el rendimiento de soja de la campaña 2010-2011. Se midieron los contenidos de humedad, determinados gravimétricamente al momento de secado de los CC, y a la siembra de soja y convertidos en humedad volumétrica, afectándolos por la densidad aparente (DA) del suelo (DA), hasta 90 cm de profundidad, en intervalos de 0-15, 15-30, 30-60, 60-90 cm. En agosto de 2010 y en mayo de 2011, se realizaron determinaciones



de resistencia mecánica a la penetración (RMP) hasta los 80 cm de profundidad, con un penetrómetro Eijkelkamp digital con un cono de 1 cm<sup>2</sup> y 60° de ángulo, en los momentos en el que suelo se encontraba a capacidad de campo, expresando los resultados en unidades de presión (MPa). La forma de medir la resistencia mecánica en agosto de 2010 fue a través de transectas de 2 m de longitud y determinaciones cada 0.2 m en cada uno de los tratamientos y en cada bloque del ensayo. En mayo de 2011 se realizaron determinaciones puntuales con repeticiones. Se determinó la DA para las profundidades de 0-10 y 10-20 cm con cilindros de 785 cm<sup>3</sup>. La cosecha del cultivo de grano se realizó manualmente y la trilla de las plantas fue hecha con trilladora estática. Los datos cuantitativos provenientes de las determinaciones analíticas de las diversas variables edáficas y de producción fueron analizados estadísticamente (SAS Institute, 1997).

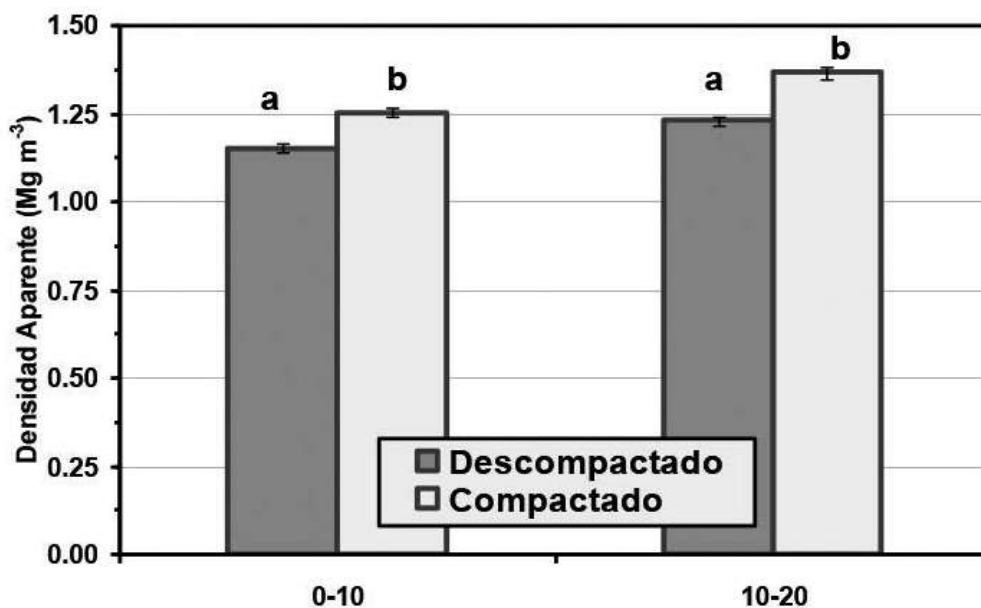


**Figura 1:** Detalle del brazo del descompactador utilizado en el ensayo.

**Figure 1:** Detail of the arm of the decompressor used in the test.

## ■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

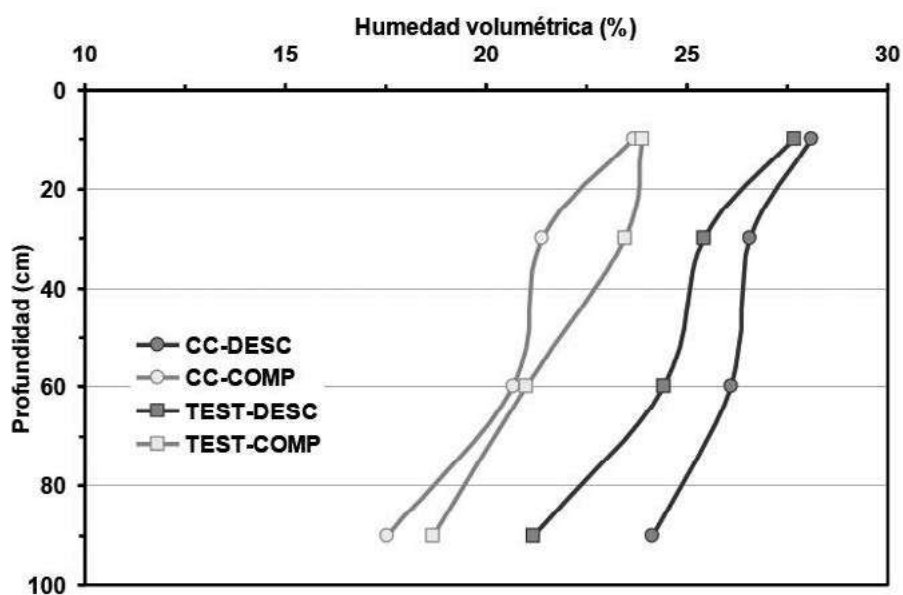
En la **Figura 2** se presenta la DA para 0-10 y 10-20 cm de profundidad, para cada grado de compactación evaluado (Compactado y Descompactado), promedio de ambos niveles de cobertura invernal (Barbecho tradicional y CC). En ambas profundidades no hubo efecto significativo ( $P > 0,05$ ) de la interacción entre el factor descompactación y el factor CC, ni entre niveles de CC (Barbecho tradicional vs. CC). El factor descompactación mostró diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre sus niveles compactado y descompactado. La descompactación mecánica provocó una reducción de la DA respecto al tratamiento sin descompactar de 8 y 10 %, para 0-10 y 10-20 cm de profundidad, respectivamente. Estas diferencias de DA representaron un aumento en la porosidad total en los tratamientos descompactados respecto a los compactados para las profundidades de 0-10 cm (56,5 vs. 52,7 Mg m<sup>-3</sup>) y para 10-20 cm (53,5 vs. 48,4 Mg m<sup>-3</sup>).



**Figura 2:** Densidad aparente (DA) promedio para 0-10 y 10-20 cm de profundidad, promedio de dos niveles de cobertura invernal (Barbecho tradicional y CC). Las líneas verticales representan el error estándar de las medias. Letras diferentes para cada profundidad indican diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ).

**Figure 2:** Average bulk density (DA) for 0-10 and 10-20 cm depth, average of two levels of winter cover (traditional fallow and CC). The vertical lines represent the standard error of the means. Different letters for each depth indicate significant statistical differences ( $P < 0.05$ ).

Estos valores de DA observados por efecto de la descompactación, relacionados con un cambio en la porosidad total se relacionaron con un contenido de humedad volumétrica que acompañó la mayor o menor capacidad de retención de agua en el suelo. En la **Figura 3** se muestran los perfiles de humedad volumétrica hasta los 0,90 m de profundidad para las cuatro situaciones de manejo estudia-

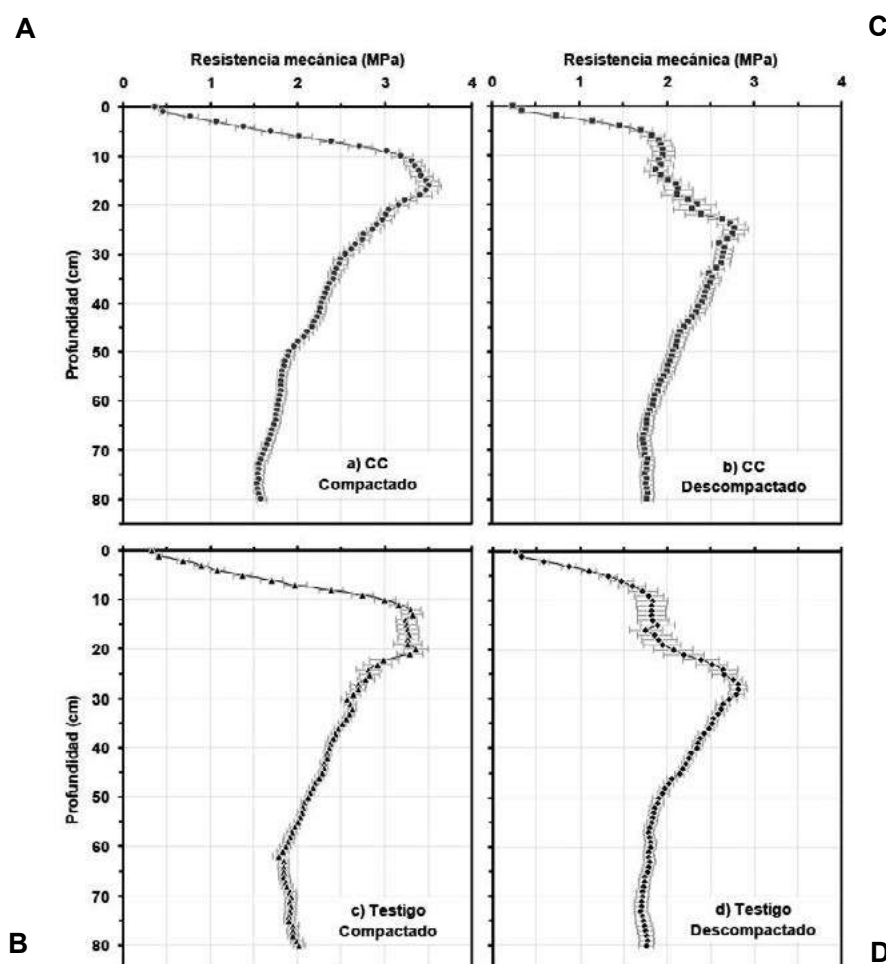


**Figura 3:** Perfiles de humedad volumétrica hasta los 0,90 m de profundidad, en mayo de 2011, para las cuatro situaciones de manejo estudiadas: Compactado y Descompactado, con CC y Testigo.

**Figure 3:** Volumetric moisture profiles up to 0.90 m depth, in May 2011, for the four management situations studied: Compacted and Descompactated, with CC and Control.

das: CC-Compactado, CC-Descompactado, Testigo-Compactado y Testigo-Descompactado. El efecto general de la descompactación resultó en un mayor contenido de humedad para las situaciones descompactadas. Asimismo, el CC-Descompactado tendió a mostrar mayor contenido de humedad que su par Testigo-Descompactado, especialmente a nivel subsuperficial. Según se desprende de estudios de porosidad realizados en el mismo suelo por Carfagno *et al.* (2014), las raíces generadas por el centeno inmediatamente luego de la descompactación mecánica durante el invierno y descompuestas desde el secado del mismo hasta el momento de muestreo, 9 meses después, contribuyeron a cambios en los niveles de la porosidad, especialmente en los rangos de tamaño de los macroporos.

El análisis del perfil de RMP, en el sentido de la profundidad del suelo permite interpretar de forma separada los cambios producidos al implementar la descompactación y la inclusión de centeno como CC invernal. En la **Figura 4** se presentan las RMP promedio para cada uno de los tratamientos hasta los 80 cm de profundidad para mayo de 2011, luego de realizada la cosecha de soja y transcurrido un año desde la descompactación mecánica en el tratamiento correspondiente. Para las situaciones compactadas, tanto Testigo como CC presentaron una elevada RMP, incrementándose desde la superficie hasta los 10 y

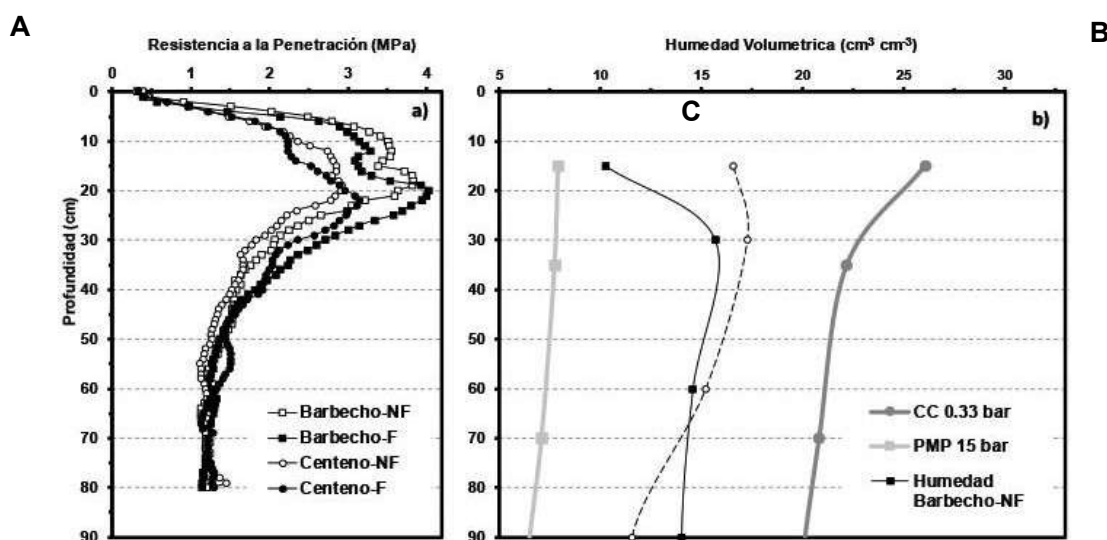


**Figura 4:** Resistencia mecánica a la penetración para cada tratamiento: **A:** CC-Compactado, **B:** CC-Descompactado, **C:** Testigo-Compactado y **D:** Testigo-Descompactado, hasta los 0,80 m de profundidad (mayo de 2011). Las líneas horizontales representan el error estándar de la media para cada profundidad.

**Figure 4:** Mechanical penetration resistance for each treatment: **A:** CC-Compacted, **B:** CC-Descompacted, **C:** Control-Compacted and **D:** Control-Descompacted, up to 0.80 m depth (May 2011). The horizontal lines represent the standard error of the mean for each depth.

15 cm de profundidad, respectivamente para cada tratamiento **Figuras 4A** y **4C**. Esta profundidad a la cual se detectó el máximo de RMP permite inferir que la compactación fue originada como consecuencia de la SD. En ausencia de laboreo los macroporos creados de forma mecánica colapsan, produciéndose el asentamiento y reconsolidación del suelo, lo que propicia el desarrollo de una estructura planar y dominancia de porosidad horizontal (Kay *et al.*, 1985). Los valores umbrales de RMP reportados por la bibliografía varían de 1,5 MPa, a partir de la cual se estima que la actividad de las raíces disminuye el 50%, a 3 MPa donde se produce un detenimiento del crecimiento radical (Gupta & Allmaras, 1987; Glinski & Lipiec, 1990). La situación observada en el presente ensayo indicó que la inclusión del CC, sin descompactación mecánica previa, tendió a aumentar el grado de RMP con un pico máximo a 0,15 m de profundidad. Como se observó en la **Figura 3**, la reducción de la humedad por el consumo de agua del CC, podría haber contribuido a la mayor dureza del suelo. Con respecto a la situación descompactada, ambos tratamientos Testigo y CC presentaron una reducción de la RMP de la capa endurecida hasta los 0,25 m de profundidad, a la cual llegó la herramienta de trabajo, sin observarse grandes diferencias por la inclusión del CC **Figuras 4B** y **4D**, aunque por debajo de la profundidad de labor se generó una capa de mayor RMP, como consecuencia de la pasada misma de la maquinaria. De todas maneras, como se explicó anteriormente, la contribución de centeno como CC invernal, provocó que la humedad determinada en el perfil al momento de medir la RMP, fuera mayor, por lo cual, el aporte de carbono tanto aéreo como radicular, estarían generando una contribución a mediano plazo que será necesario analizar en posteriores investigaciones.

En otros ensayos realizados por nuestro grupo de investigación en Haplustoles del noreste de La Pampa, con inclusión de centeno como CC, sin tratamiento de descompactación, mostrados en la **Figura 4** también se observó un efecto beneficioso del CC a favor de una menor RMP. En este sentido, se observaron cambios de RMP máxima a 20 cm de profundidad de 4 MPa (Barbecho tradicional) a 3 MPa (CC Centeno) **Figura 5**. Estos resultados reafirman el fundamento de realizar una práctica biológica en adición a las labores mecánicas tradicionales. Asimismo, se plantea un beneficio extra que se adiciona a la lista de mejoras, ya reconocida, en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Carfagno *et al.*, 2013).

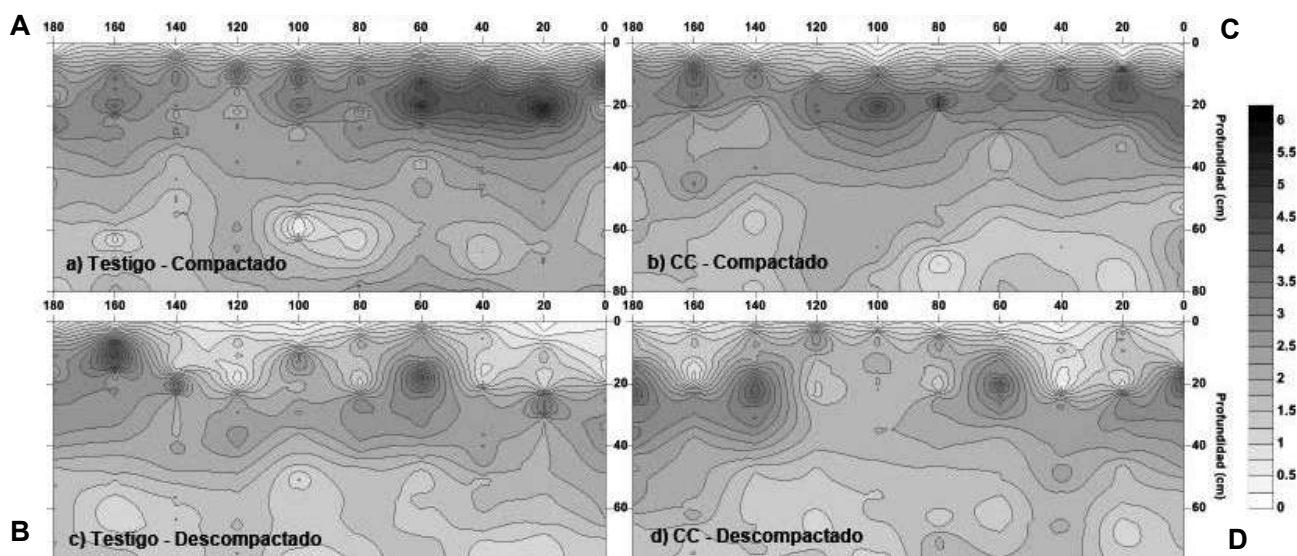


**Figura 5A:** Resistencia mecánica a la penetración promedio para la combinación de tratamientos Barbecho convencional y Centeno, no fertilizados y fertilizados con 100 kg ha<sup>-1</sup> de urea. **B:** Contenido promedio de humedad para los tratamientos Barbecho y Centeno.

**Figure 5A:** Mechanical resistance to the average penetration for the combination of treatments Conventional fallow and Rye, not fertilized and fertilized with 100 kg ha<sup>-1</sup> of urea. **B:** Average moisture for Fallow and Rye treatments.



La realización de un análisis en transecta de la RMP, permite hacer una interpretación del perfil del suelo en dos dimensiones: profundidad y longitud, a fin de conocer el efecto positivo o negativo de la labor o tratamiento implementado. En la **Figura 6** se muestran los perfiles de RMP de secciones de suelos de 2 m de largo y 0,80 m de profundidad en 2011 para los tratamientos Testigos Compactado y Descompactado, y CC Compactado y Descompactado. Para ambas situaciones Testigo (Barbecho tradicional) y con inclusión de CC se observa una capa compactada bastante homogénea alrededor de los 0,20 m de profundidad, con un incremento en la RMP desde la superficie hasta niveles excesivamente altos para el normal desarrollo de las raíces **Figuras 6A** y **B**. Desde esta capa se genera una reducción en profundidad que se mantiene a partir de los 0,60 m. El análisis de esta variable para las situaciones Descompactadas reflejó que la labor mecánica no fue pareja, con resultados heterogéneos hasta los 0,25 m de profundidad **Figuras 6C** y **D**. En estas situaciones se observaron zonas puntuales que mantuvieron RMP altas, como consecuencia de una falta de coincidencia entre pasadas de la maquinaria. De todas maneras, estas zonas funcionarían como soportes para evitar posteriores recompactaciones (Iruña, comunicación personal). Además, la inclusión de un CC propició que estas zonas de mayor resistencia fueran de una magnitud menor a la observada en la situación Testigo-Descompactado. Por otro lado, por debajo de los 0,40 m de profundidad la RMP es menor y más homogénea que en la situación Compactada **Figuras 6C** y **D**.

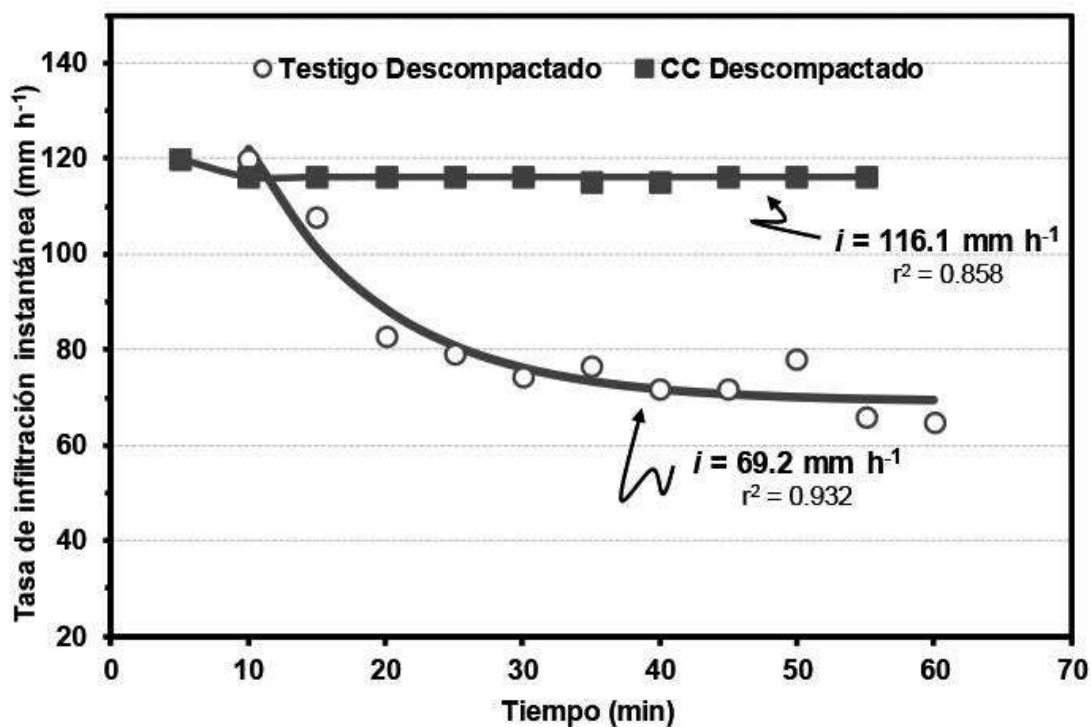


**Figura 6:** Resistencias mecánicas a la penetración de secciones de suelos de 2 m de largo y 0,80 m de profundidad en 2011 para los tratamientos testigo compactado **A:** descompactado **C:** y cultivos de cobertura compactado **B:** y descompactado **D:** La escala de la derecha indica el rango de RMP en MPa.

**Figure 6:** Mechanical resistance to penetration of soil sections of 2 m long and 0.80 m depth in 2011 for the control treatments compacted **A:** descompacted **C:** and cover crop compacted **B:** and descompacted **D:** The scale on the right indicates the RMP range in MPa.

Con relación al movimiento del agua en el suelo, en la **Figura 7** se muestran las tasas de infiltración promedio para los tratamientos evaluados (Testigo-Descompactado y CC-Descompactado), obtenidas a través de ensayos de simulación de lluvia y ajustadas con el modelo no lineal Horton, presentado un ajuste alto en ambas simulaciones ( $r^2 = 0,858$  y  $r^2 = 0,932$ , respectivamente para Testigo y CC). Los tratamientos CC-Descompactado y Testigo (Barbecho tradicional) Descompactado mostraron un comportamiento diferente, ya que el Testigo presentó una tasa de infiltración final de  $69,2 \text{ mm h}^{-1}$ , mientras que al incluir la práctica de centeno como CC combinada con la descompactación aumentó

la infiltración final obteniendo valores de  $116,1 \text{ mm h}^{-1}$ . La combinación del efecto de remoción con generación de macroporos junto al desarrollo radicular del centeno en los espacios generados provocó la infiltración del volumen prácticamente total del agua aplicada.



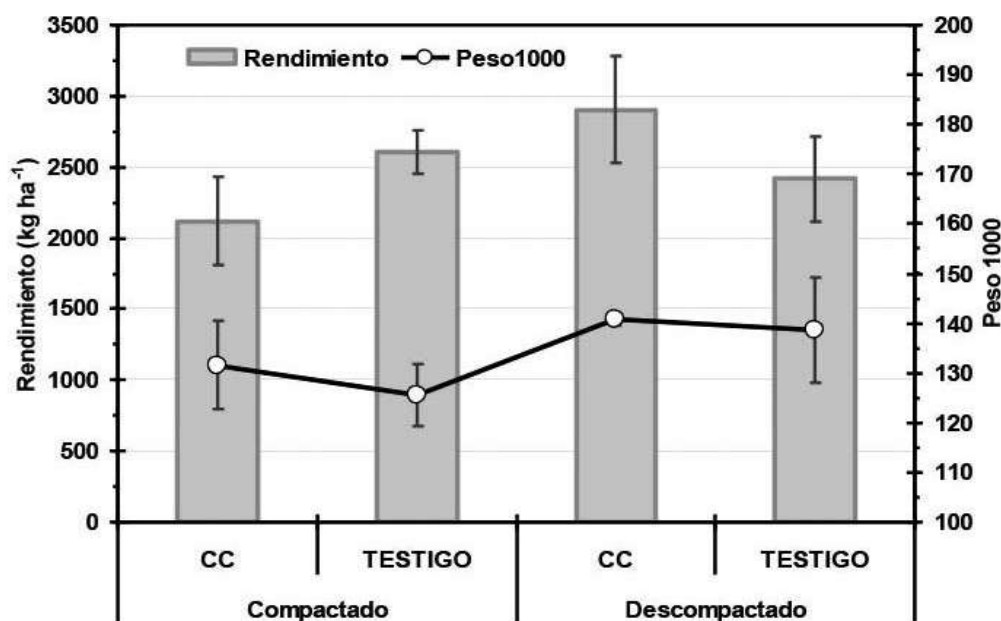
**Figura 7:** Tasas de infiltración promedio para los tratamientos Testigo-Descompactado, y CC-Descompactado obtenidas a través de ensayos de simulación de lluvia y ajustadas con el modelo no lineal Horton. Los símbolos " $i$ " y " $r^2$ " representan los valores de infiltración estabilizada y coeficiente de regresión no lineal, para cada tratamiento.

**Figure 7:** Mean infiltration rates for Control-Decompaction and CC-Decompaction treatments obtained through rain simulation tests and adjusted with the non-linear Horton model. The symbols " $i$ " and " $r^2$ " represent the values of stabilized infiltration and nonlinear regression coefficient, for each treatment.

En la **Figura 8** se muestran los rendimientos promedio y el peso de 1000 granos de soja luego del primer año de ensayo para cada tratamiento. El análisis estadístico indicó que no existieron diferencias estadísticas significativas ( $P > 0,05$ ) para la interacción, ni para los factores Descompactación ni inclusión de CC en esta variable ni el peso de 1000. A pesar de la falta de diferencias significativas, se aprecia una correspondencia entre rendimiento de soja y DAP y humedad volumétrica. En este sentido, CC-Descompactado tuvo el mayor rendimiento, superando a Testigo-Compactado, Testigo-Descompactado y CC-Compactado en 11,3%, 20,1% y 37,1%, respectivamente. Estos resultados coinciden con los de Calonego & Rosolem (2010), quienes también encontraron incrementos en los rendimientos de soja luego del primer año de descompactación. Por otro lado, la descompactación sin la inclusión de CC, representó una pérdida de rendimiento de 7,3%. Esto está indicando que el CC podría haber propiciado un uso más eficiente del agua disponible a través de una mayor captación y colaborando a una mejor conservación del agua a través de una menor pérdida por evaporación directa desde el suelo, que se tradujo en mayor rendimiento de soja.

Sadras *et al.* (2005) concluyeron que, aunque se produzcan cambios en el grado de compactación del suelo y más aún alteraciones en la abundancia radical de los cultivos, ello no implica necesariamente

cambios en la producción. Ya que, si hay suficientes recursos disponibles, por ejemplo, precipitaciones adecuadas, los beneficios inherentes a la práctica de descompactación no se ponen de manifiesto. De todas maneras, en ambientes subhúmedos como en el que se realizó la presente experiencia, la descompactación mecánica y la inclusión de CC pueden alterar la dinámica hídrica, afectando los rendimientos. Con respecto al peso de 1000 granos, aunque sin diferencias significativas, se observaron tendencias por efecto de la descompactación, siendo el peso promedio de 140 y 128,5 g, respectivamente para Descompactado y Compactado.



**Figura 8:** Rendimientos de soja y peso de 1000 granos luego del primer año de ensayo para cada tratamiento. Las líneas verticales representan el error estándar de las medias.

**Figure 8:** Soy yields and weight of 1000 grains after the first year of testing for each treatment. The vertical lines represent the standard error of the means.

## ■ CONCLUSIÓN

La práctica combinada de descompactación mecánica y la inclusión de centeno como CC mostraron, en general, mejorar la condición física del suelo. Para las condiciones planteadas en un suelo Hapludol en un ambiente subhúmedo del oeste de la provincia de Buenos Aires, la combinación de ambas prácticas es la más adecuada para mejorar el estado físico de suelos manejado bajo siembra directa al reducir la densidad aparente (DA) y la resistencia mecánica a la penetración, incrementar la porosidad total del suelo y la disponibilidad de agua y, consecuentemente mejorando los rendimientos de soja.

## ■ AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto INTA AEGA 224012. Los autores agradecen por su colaboración a los encargados de los establecimientos “El Correntino” y “Don Jesús”

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, CR; MA Taboada; C Bustingorri & FH Gutierrez Boem. 2006. Descompactación de suelo en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ci. Suelo* 24: 1-10.
- Alvarez, CR; MT Duggan; ER Chamorro; DD Ambrosio & MA Taboada. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ci. Suelo* 27: 159-169.
- Álvarez, CR; M 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.
- Batey, T & DC McKenzie, 2006. Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use and Management* 22: 123-131.
- Blackshaw, RE. 2008. Agronomic merits of cereal cover crops in dry bean production systems in western Canada. *Crop Protection* 27: 208-214.
- Bonel, BA; J Denoia; M Costanzo; G Giubileo & G Zerpa. 2004. Efecto de la Labor de Escarificado sobre un Argiudol Vértico bajo Siembra Directa continua. *Cien. Inv. Agr.* 31(3): 187-196.
- Botta, G; D Jorajuria; R Balbuena & H Rosatto. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil Till. Res.* 78: 53-58.
- Botta, G; D Jorajuria & H Rosatto. 2006. Light tractor frequency on soil compaction in the rolling Pampa region of Argentina. *Soil Till. Res.* 86: 9-14.
- Botta, GF, A Tolon- Becerra, X Lastra-Bravo & M Tourn. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research* 110: 167-174.
- Calonego, JC & CA Rosolem. 2010. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *Europ. J. Agronomy* 33: 242-249.
- Camargo, OA & LR Alleoni. 1997. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p
- Campos, BC; DJ Reinert; R Nicolodi & LC Cassol. 1999. *R. Bras. Ci. Solo* 23: 383-391.
- Carfagno, P & M Eiza. 2017. Differential porosity study under the soybean-cover crops-soybean sequence in a typical Argiudol of the North of the Province of Buenos Aires. En Actas de XXV Congreso de Aapresid y el VII Congreso Mundial de Agricultura de Conservación. Rosario, Santa Fe. Agosto de 2017.
- Carfagno, P; MJ Eiza; JM Rivera Vazquez; A Quiroga & F Babinec. 2014. Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca.
- 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, P; MJ Eiza, F Babinec & A Quiroga. 2013. Inclusión de cultivos de cobertura en la dinámica hídrica de Hapludoles y Haplustoles del oeste de la provincia de Buenos Aires y noreste de La Pampa. En: Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción. C Álvarez; A Quiroga (Eds.). EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas". 36-49. ISBN 978-987-679-177-9.
- Colla, G; J Mitchell & BA Joyce. 2000. Soil physical properties and tomato yield and quality in alternative cropping systems. *Agron. J.* 92: 924-932.
- 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.
- Dardanelli, JL; OA Bachmeier, HP Salas, EF Lovera & F Núñez Vázquez, 1994. Evaporación en un suelo Haplustol éntico bajo dos sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 12(1):17-21.
- Dardanelli JL; MA Calmon, JW Jones, MP Andrianai, MP Diaz & DJ. Collino, 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *Trans. ASAE* 46:1265-1275.
- Díaz-Zorita, M. 2004. Efecto de la compactación subsuperficial de un Hapludol típico sobre la producción de girasol (*Helianthus annus L.*). *Ciencia del Suelo* 22:40-44
- Glinkski, J & J Lipiec. 1990. Soil Physical Conditions and Plants Roots. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida 250 pp.



- Gupta, SC & RR Allamaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 8:123-149.
- Hamza, MA & WK Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Hilbert, JA & MO Tesouro. 2002. Curved subsoiler field performance and draft requirement. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* (Argentina) 30:14-23.
- Jin, H; L Hongwen; W Xiaoyan; AD McHugh; L Wenying; G Huanwen & NJ Kuhn. 2007. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil Till. Res.* 94: 493-502.
- Jorajuria, D; L. Draghi, & A. Aragon. 1997. The effect of wheel load on the distribution of soil compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium pasture. *Soil and Tillage Research.* 41: 1-12
- Kay, BD; CD Grant & PH Groenevelt. 1985. *SSSAJ.* 49:973-978.
- Lal, R & M Shukla. 2004. Soil Strength and Compaction. In: *Principles of Soil Physics.* Marcel Dekker, New York. 716 pp.
- Larsen, WE; Eynard A; Hadfas A & Lipiec, J. 1994. Control and avoidance of compaction in practice. In: *Soil compaction in crop production* (eds B.D. Soane & C. van Ouwerkerk), pp. 597-625. Elsevier, Amsterdam.
- 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.
- Melero, S., M. Panettieri, E. Madejon Gómez, H. Macpherson, F. Moreno & J.M. Murillo. 2011. Implementation of chiselling and mouldboard ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: Effect on soil quality. *Soil & Tillage Research* 112: 107-174.
- Nielsen, DC & MF Vigil. 2005. Legume green fallow effects on soil water content at wheat planting and wheat yield. *Agron. J.* 97: 684-689.
- Nocelli Pac, S. 2015. Estimación de superficie en siembra directa. Campaña 2014-2015. Informe AAPRESID. 14 pp.
- Pozzolo, OR; JM Gange; HJ Ferrari; JP Hegglin; S Rivarola; C Curró & JJ De Battista. 2010. Comportamiento de Suelos Vertisoles al Tráfico en Sistemas de Siembra Directa y Convencional. Informe EEA INTA Concepción del Uruguay.
- Ramos, ME; E Benítez; P García & A Robles. 2010. Cover crops under different management vs. Frequent tillage in almond orchards in semiarid conditions: effects on soil quality. *Applied Soil Ecology* 44: 6-14.
- Rawls, WJ; TJ Gish & DL Brakensiek, 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.* 16: 213-234
- Rimski-Korsakov, H; C Alvarez & R Lavado. 2016. Cultivos de cobertura invernales en la región pampeana argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 21: 2-6.
- Ruffo, ML; DG Bullock & GA Bollero. 2004. Soybean yield as affected by biomass and nitrogen uptake of cereal rye in winter cover crop rotations. *Agron J.* 96: 800-805.
- Sadras, VO; GJ O'Leary & DK Roget. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91: 131-148.
- 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.
- Salako, FK & G Tian. 2003. Soil water depletion under various leguminous cover crop in the derived savanna of West Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 100: 173-180.
- SAS Institute, SAS/STAT. 1997. Changes and Enhancements through Release 6.12. SAS Institute, Inc. Cary, NC. 1167 pp.
- Sasal, MC; A Andriulo & MA Taboada; 2006. Soil porosity characteristics on water dynamics under direct drilling in Argiudolls of the Argentinean Rolling Pampas. *Soil and Tillage Research* 87:9-18.
- Schwenke, GD; GJ Scmmell; IJ Rochester; RM Norton; KM McCormick; MH Mc Callum; DF Herridge; RR Gault; AM Bowman & MB Peoples. 2001. Factors regulating the contributions of fixed nitrogen by pasture and crop legumes to different farming systems of eastern Australia. *Plant Soil* 228: 29-41.
- Strudley, MW; TR Green & JC Ascough, 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil and Tillage Research* 19: 215-226.
- Singer, WJ; KA Kohler & PB Mc Donald. 2007. Self-seeding winter cereal cover crops in soybean. *Agronomy Journal* 99: 73-79.