

DESCOMPACTACIÓN DE SUELOS FRANCO LIMOSOS EN SIEMBRA DIRECTA: EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS Y LOS CULTIVOS

CARINA R. ÁLVAREZ^{1*}; MARTÍN TORRES DUGGAN², ENRIQUE R. CHAMORRO²;
DIEGO D'AMBROSIO¹ & MIGUEL A. TABOADA^{1,3}

¹Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes; Facultad de Agronomía; Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453; C1417 DSE; Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. ²Tecnoagro; ³IByF; CONICET. (*) Correo electrónico: alvarezc@agro.uba.ar

Recibido: 19-06-09

Aceptado: 13-10-09

RESUMEN

La descompactación mecánica puede mejorar las condiciones físicas de suelos franco limosos que sufren compactación en siembra directa. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1-evaluar la influencia de la descompactación mecánica (e.g. paratill o cultivie) sobre algunas propiedades físicas y químicas de suelos manejados bajo siembra directa; 2- cuantificar el impacto de la descompactación sobre el rendimiento de maíz; 3-evaluar la perdurabilidad de la descompactación sobre variables físicas edáficas, desarrollo de raíces y rendimiento de los cultivos implantados luego del maíz. Durante la campaña 2006/07 se condujeron seis ensayos de campo en lotes de producción de maíz ubicados en la Pampa Ondulada. Se compararon parcelas apareadas en siembra directa continua (TEST) vs. parcelas con pasaje de equipo descompactador a 30 cm (DESC). La resistencia a la penetración disminuyó 37 y 24% ($p < 0,05$) en las capas de 0-25 cm y 0-40 cm, respectivamente, y la tasa de infiltración aumentó ($p = 0,07$) de TEST a DESC en el estado V5-V6 de maíz. No se encontraron efectos de la descompactación sobre la densidad aparente y disponibilidad de nitratos. La descompactación aumentó significativamente ($p < 0,001$) el rendimiento de maíz con una respuesta media de 659 kg ha^{-1} (5,56%) y beneficios económicos positivos en todos los sitios. No se observaron efectos residuales de la descompactación sobre la resistencia a la penetración y el rendimiento de los cultivos subsiguientes al maíz. Los resultados indican que la descompactación produjo efectos positivos de corto plazo sobre la resistencia a la penetración y el rendimiento maíz pero no se observó efecto residual sobre el/ los cultivo/ s subsiguientes.

Palabras clave. Resistencia a la penetración, infiltración, rendimiento, propiedades físicas, maíz, raíces.

DECOMPACTION OF NO-TILLAGE SOILS: EFFECTS ON SOIL PROPERTIES AND CROPS

ABSTRACT

Mechanical decompaction may improve the physical properties of no-tillage silty loam soils. The aims of this study were to: 1- evaluate the influence of mechanical tilling (e.g. paratill or cultivie) on soil physical (gravimetric water content, bulk density, penetration resistance and infiltration rate) and chemical (nitrate content) properties in no-tillage soils; 2- quantify the impact of soil decompaction on maize yield; and 3- evaluate the persistence of soil compaction alleviation on soil penetration resistance, root abundance and crop yields after maize. Six field experiments were conducted in no-tillage maize plots in the Rolling Pampa region. Paired plots were compared: continuous no tillage (TEST) vs. soil compaction alleviation by deep tillage (DESC). Soil penetration resistance decreased by 37 and 24 % ($p < 0.05$) at the 0-25 cm and 0-40 cm soil layers, respectively, and the soil infiltration rate increased ($p = 0.07$) from TEST to DESC at the V5-V6 maize growing stage. No deep tillage effect was observed on soil bulk density and nitrate content. Maize yields were significantly augmented by soil compaction alleviation ($p < 0.001$) with an average response of 659 kg ha^{-1} (5.56%). All sites showed economic benefits. No residual effects were found in soil physical properties, root growth and yield in the following crops. The results indicate short-term effects of soil decompaction by deep tillage on soil penetration resistance and maize yield, but no residual effects on subsequent crops.

Key words. Penetration resistance, soil water infiltration, physical properties, maize, roots.

INTRODUCCIÓN

La compactación excesiva causada por el tránsito de maquinarias pesadas constituye un problema importante en suelos agrícolas de diversas regiones del mundo (Gupta & Allmaras, 1987; Hamza & Anderson, 2005; Spoor, 2006). La preocupación sobre el impacto negativo de la compactación excesiva se ha visto incrementada en los últimos años en la Argentina, en consonancia con la intensificación agrícola y la expansión geográfica de

la siembra directa (Senigagliesi & Ferrari, 1993; Sasal *et al.*, 2006; Botta *et al.*, 2007; Álvarez *et al.*, 2009).

La Argentina ocupa el tercer lugar en el mundo en superficie (18 Mha) manejada bajo siembra directa (Derpsch, 2005). En este sistema de manejo, la compactación del suelo es causada por la alta intensidad de tránsito resultante del pasaje de los tractores utilizados en la protección de los cultivos y en la cosecha. Ello ocurre especialmente cuando estas operaciones son realizadas con

el suelo húmedo y con alta presión en los neumáticos (Botta *et al.*, 2004).

Gran parte de los suelos pampeanos, en particular los de la Pampa Ondulada, se caracterizan por presentar elevada susceptibilidad a sufrir procesos de degradación física. Ello se debe, fundamentalmente, a su prolongada historia agrícola y su textura limosa (limos finos y muy finos, 2-20 μm). Estas características le confieren baja capacidad de regeneración de la estructura y escasa porosidad luego de sufrir la densificación o compactación (Senigagliesi & Ferrari, 1993; Cosentino & Pecorari, 2002; Taboada *et al.*, 2008).

Ha sido suficientemente documentada la influencia negativa que ejerce la compactación excesiva sobre la emergencia de las plántulas, la exploración radical, la producción de biomasa y los rendimientos de los cultivos (Glinski & Lipiec, 1990; Hamza & Anderson, 2005; Sadras *et al.*, 2005).

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos que muestran mayor sensibilidad a sufrir daños en sus raíces y descensos de rendimientos a causa de la compactación (Erbach *et al.*, 1986; Tardieu, 1988; Amato & Ritchie, 2000; Díaz Zorita, 2000; Álvarez *et al.*, 2006; Taboada & Álvarez, 2007). Ello se debe a que es muy sensible al déficit hídrico debido a su acotado período crítico en momentos de alta demanda atmosférica (Sadras & Calviño, 2001). Precisamente, la disponibilidad hídrica es la principal limitante del rendimiento de maíz en la Pampa Ondulada argentina (Maddonni *et al.*, 1999; Álvarez & Grigera, 2005). En esta región, las raíces de maíz responden negativamente a la presencia de capas compactas en el subsuelo, pero no siempre con impacto sobre los rendimientos (Díaz Zorita, 2000; Álvarez *et al.*, 2006; Taboada & Álvarez, 2007).

La remoción mecánica de capas compactadas mediante el uso de implementos descompactadores o escarificadores (*e.g.* «para-till»; paraplow, cultivie) ha tomado creciente difusión en el mundo (Evans *et al.*, 1996; Hamza & Anderson, 2005; Spoor, 2006; Jin *et al.*, 2007). En nuestro país la experiencia es más limitada y no siempre fue llevada a cabo con suelos manejados con siembra directa, o con un cultivo sensible como el maíz (Díaz Zorita, 2000; Ferraris, 2004; Botta *et al.*, 2006). En todos estos trabajos se muestran descensos significativos de la resistencia del suelo a causa de la descompactación, pero se sabe poco acerca de su perdurabilidad y sobre su impacto sobre el rendimiento de los cultivos.

Los antecedentes sobre el efecto de la descompactación sobre los cultivos son variables. Botta *et al.* (2006) hallaron 24,5% de incremento del rendimiento del cultivo de girasol en un Haplustol Éntico de la provincia de La Pampa. En el sur de Australia, con precipitaciones anuales de 273 mm, Sadras *et al.* (2005) hallaron incrementos entre

0 y 43% en el rendimiento del trigo debido a la descompactación. En un trabajo previo, Álvarez *et al.* (2006) observaron mejoras de rendimiento de maíz en el 50% de los seis sitios de la Pampa Ondulada en los que trabajaron. Por el contrario, otros autores no encontraron directamente beneficios. En el nordeste de China, Jin *et al.* (2007) no observaron diferencias significativas a favor de la descompactación en siembra directa en los rendimientos de cultivos de trigo y maíz a lo largo de 10 años. A nivel local, en una evaluación en el sur de Santa Fe, Ferraris (2004) atribuyó la falta de respuesta del maíz a la descompactación a la buena condición hídrica de la campaña.

Estos antecedentes muestran que el impacto de la descompactación sobre los rendimientos varía en función de las condiciones físicas edáficas, la estación de crecimiento, el cultivo, el manejo, y las condiciones climáticas. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1-evaluar la influencia de la descompactación mecánica (*e.g.* paratill o cultivie) sobre algunas propiedades físicas y químicas de suelos limosos manejados bajo siembra directa; 2-cuantificar el impacto de la descompactación sobre el rendimiento de maíz; 3-evaluar la perdurabilidad o residualidad de la descompactación sobre variables físicas edáficas, desarrollo de raíces y rendimiento de los cultivos implantados luego del maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios y diseño experimental

Se realizaron seis ensayos de campo durante la campaña 2006/07 en lotes de producción de maíz ubicados en establecimientos de las provincias de Santa Fe y Buenos Aires (Pampa Ondulada) (Tabla 1). Los lotes tenían una historia de más de 10 años de agricultura continua en siembra directa, manejados con rotaciones trigo/soja de segunda-maíz-soja de primera o trigo/soja de segunda-maíz. Los lotes donde se instalaron los ensayos se caracterizaron por su relieve plano y por ende, no se observaron síntomas de erosión hídrica. Los suelos fueron Argiudoles Típicos que reunieron como característica común el poseer textura franco limosa en su horizonte A. El contenido de materia orgánica promedio fue 31,3 g kg⁻¹ y el contenido de P Bray 1 varió entre 9 y 21 mg kg⁻¹ (Tabla 1).

Los tratamientos fueron: 1-testigo (TEST), siembra directa continua y 2- descompactado (DESC) mediante el pasaje de un escarificador (paratill o cultivie). El diseño experimental fue en franjas apareadas en cada sitio (6 x 300 m). La profundidad media de descompactación fue 30 cm, variando entre 35 y 50 cm el distanciamiento entre púas de los escarificadores. Desde el pasaje del implemento hasta la siembra del cultivo de maíz transcurrieron entre 66 a 120 días según el sitio. El cultivo de maíz fue sembrado a mediados del mes de octubre y cosechado en el mes de abril de

Tabla 1. Principales características de suelo (0-20 cm), manejo y ubicación de los sitios de muestreo.
Table 1. Main topsoil properties (0-20 cm), management and location of study sites.

	Sitios					
	1	2	3	4	5	6
Localidad	Santa Emilia	Santa Emilia	Teodelina	Teodelina	Colón	Colón
Serie predominante	Venado Tuerto	Venado Tuerto	Rojas	Rojas	Rojas	Rojas
Materia orgánica (g kg ⁻¹)	31,9	32,6	32,5	30,3	31,1	29,5
P Bray 1 (mg kg ⁻¹)	14	14	16	21	16	9
Limo (g kg ⁻¹)	600	600	494	494	494	494
Arena (g kg ⁻¹)	149	149	277	277	277	277
pH	5,9	6,0	5,6	5,7	5,9	6,0
Fecha de descompactación	7/8	4/8	2/8	23/7	13/6	26/6
Híbrido	NK 900	AW 190	NK 900	Dekalb 747	AW 190	NK 940
Fecha de siembra	12/10	11/10	19/10	13/10	11/10	18/10

Notas: Sitio 1 y 2: Establecimiento San Alfredo; sitio 3 y 4: Establecimiento Santa Juana; sitio 5 y 6: Establecimiento La Lolita.

2007. Los sitios fueron fertilizados con una dosis promedio de 65 a 100 kg N ha⁻¹ como urea o UAN a la siembra o en estado de seis hojas y 20-30 kg P ha⁻¹ en el momento de la siembra. Posteriormente, en el sitio 2 se sembró soja de primera en octubre de 2007 con una fertilización de 20 kg ha⁻¹ de P. Los sitios 5 y 6 se destinaron al doble cultivo trigo/soja 2da. El trigo se sembró en junio de 2007 con una fertilización media de 67 kg ha⁻¹ de N y 50 kg ha⁻¹ de P y la soja de segunda se sembró a mediados de diciembre de 2007.

Determinaciones

Al inicio del ensayo, cuando el maíz se encontraba en el estadio V5-6, se realizó un muestreo compuesto de los suelos hasta 20 cm de profundidad. Se determinó la distribución de tamaño de partículas por el método de la pipeta (Gee & Or, 2002), y a partir de esta distribución, la clase textural. También se determinó el contenido de materia orgánica total por el método de Walkley & Black (Allison, 1965). En cada sitio se registraron las lluvias ocurridas mediante pluviómetros instalados en cada establecimiento.

En cada tratamiento se determinaron las siguientes propiedades edáficas: a- densidad aparente usando el método del cilindro (Grossman & Reinsch, 2002), insertando cilindros de 5 cm diámetro y 5 cm altura en las capas 0-5 cm y 15-20 cm (n = 4); b- contenido hídrico gravimétrico mediante secado en estufa a 105°C hasta peso constante, cada 20 cm hasta 1 m de profundidad del suelo; c- resistencia a la penetración usando un penetrómetro estático digital con punta de 30° (Lowery & Morrison, 2002) (n = 10); d- tasa de infiltración de agua usando un método rápido propuesto por USDA (1999); y e- el contenido de nitratos en capas de 20 cm hasta 40 cm de profundidad, a través de la diazotación con reactivo SNEDD, sobre muestra húmeda (Daniel & Marban, 1989).

Antes de la cosecha del maíz, se midió la resistencia a la penetración con control del contenido hídrico gravimétrico en todas las situaciones con el objetivo de evaluar la residualidad de la labor de descompactación. Los cultivos de maíz fueron cose-

chados mecánicamente. Se evaluó el rendimiento en grano del cultivo en cinco de los seis sitios experimentales, utilizando tolvas individuales. El sitio no cosechado se debió a problemas de anegamiento y por lo tanto, a falta de piso por excesivas lluvias.

Para continuar con la evaluación de la residualidad de la práctica de descompactación, se determinó la resistencia a la penetración en el siguiente cultivo de verano; así como los rendimientos y el desarrollo radical de los cultivos subsiguientes al maíz realizados en la campaña 2007/08 de los sitios 2, 5 y 6. En esos lotes se realizaron en febrero de 2008 tres calicatas hasta 1 m de profundidad en cada tratamiento en las cuales se determinó la abundancia de raíces utilizando el método de la cuadrícula. La cuadrícula (50 x 100 cm) poseía divisiones internas de 5 x 5 cm (Manichon, 1987). La distribución radical horizontal y vertical de las raíces se evaluó utilizando una escala donde 0 representa ausencia de raíces y 5 la máxima abundancia. En estos sitios se determinó el rendimiento de trigo y/o soja usando cosecha mecánica con tolvas individuales.

Los resultados fueron analizados estadísticamente a través de un diseño de t apareada considerando el conjunto de los sitios. Cuando se analizaron distintas profundidades, la comparación se realizó dentro de cada capa o estrato.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los suelos y clima

Los horizontes A de los suelos estudiados presentaron textura franco limosas con porcentajes de limo mayores en los correspondientes a la Serie Venado Tuerto que los de la Serie Rojas (Tabla 1). Los niveles de ma-

teria orgánica (aproximadamente 30 g kg⁻¹), así como los pH moderadamente ácidos se correspondieron con la historia de uso agrícola nunca inferior a 10 años. Puede decirse que el nivel de degradación de los suelos analizados fue sólo ligera según surge de los parámetros comparativos de otros trabajos hechos en la región (Senigaliesi & Ferrari, 1993; Madonni *et al.*, 1999; Álvarez *et al.*, 2009). En la Figura 1 se muestran las precipitaciones (promedio de todos los sitios) durante el presente trabajo y los valores correspondientes a una serie histórica de 35 años. Las precipitaciones durante el ciclo del maíz totalizaron 890 mm desde octubre 2006 a febrero 2007, resultando muy superior a los valores históricos. Incluso en diciembre y enero, meses que en la región coinciden con el período crítico para la definición del rendimiento de maíz.

Efectos a corto plazo de la descompactación

Los valores de densidad aparente variaron en el tratamiento TEST entre 1,17 y 1,32 Mg m⁻³ en la capa 0-5 cm y entre 1,37 a 1,46 Mg m⁻³ en la capa 15-20 cm (Tabla 2). Los valores más bajos correspondieron al suelo de la Serie Venado Tuerto que posee mayor proporción de limo (Tabla 1). No se observaron diferencias significativas en la densidad aparente de los tratamientos TEST y DESC lo cual demuestra una baja sensibilidad de este parámetro a los distintos manejos. Ello coincide con lo hallado en otros trabajos desarrollados en la región (Botta *et al.*, 2004; Álvarez *et al.*, 2006). Pillatti & de Orellana (2000) propusieron calcular la densidad aparente crítica en suelos pampeanos, usando la siguiente ecuación:

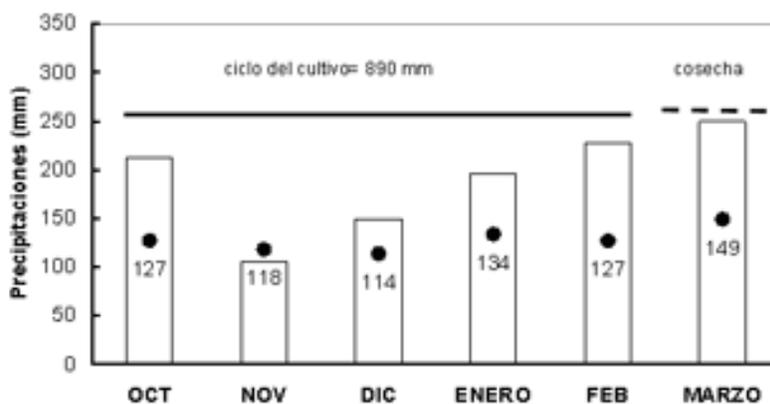


Figura 1. Precipitaciones mensuales durante el ciclo del cultivo de maíz (2007/08). La precipitación media correspondiente a una serie de 35 años (1965-2000) de la localidad de Pergamino es indicada por el símbolo ● y su cantidad.

Figure 1. Monthly precipitation during the maize season (2007/08). The mean precipitation over a 35-year period (1965-2000) for Pergamino is indicated by the ● symbol and the amount.

Tabla 2. Densidad aparente y nitratos a V5-6 para los distintos sitios y tratamientos. P= probabilidad según test de t apareado. TEST: testigo; DESC: descompactado.

Table 2. Soil bulk density and nitrate content (V5-V6) for the different sites and managements. P= paired t test; TEST: control; DESC: deep tilled soil.

Sitio	Densidad aparente Mg m ⁻³				Nitratos mg kg ⁻¹			
	0-5 cm		15-20 cm		0-20 cm		20-40 cm	
	TEST	DESC	TEST	DESC	TEST	DESC	TEST	DESC
1	1,17	1,12	1,37	1,34	115	76	43	37
2	1,28	1,26	1,39	1,46	62	66	25	28
3	1,25	1,28	1,43	1,52	122	121	56	49
4	1,25	1,19	1,46	1,46	131	125	70	76
5	1,32	1,32	1,39	1,42	57	73	26	36
6	1,26	1,36	1,45	1,41	78	66	29	38
Media	1,26	1,26	1,42	1,44	94	88	41	44
p	0,89		0,35		0,44		0,44	

$$Dap\ crítica\ [Mg\ m^{-3}] = 1,52 - 0,0065\ arcilla\ [\%] \quad [1]$$

siendo Dap la densidad aparente del suelo.

En la capa 0-5 cm las densidades aparentes de los suelos correspondientes al presente trabajo fueron siempre inferiores a los valores críticos (1,35-1,37 Mg m⁻³). No sucedió lo mismo en la capa 15-20 cm cuyas densidades fueron en promedio 4% mayores que los valores de densidad aparente crítica.

La Tabla 2 muestra también los contenidos de nitrógeno disponible para el cultivo (nitratos). Como es esperable, existió estratificación del contenido de nitratos en profundidad (capa 0-20 cm > capa 20-40 cm). Los valores del estrato superior duplican aproximadamente a los del inferior. El pasaje del escarificador produce la incorporación parcial del rastrojo y la remoción del suelo, lo cual hace prever cambios en la disponibilidad de nitrógeno. En efecto, Díaz Zorita (2000) observó una reducción del 20% de la cobertura por residuos y una tendencia a incrementar la disponibilidad de nitrógeno por la labor de descompactación en planteos de siembra directa en la Pampa Semiárida. Sin embargo, los resultados del presente trabajo no mostraron diferencias significativas en el contenido de nitratos entre los tratamientos TEST y

DESC. Como los análisis fueron realizados en V5-6, los niveles de nitratos en el suelo pueden estar modificados por la distinta absorción del cultivo según el tratamiento. Asimismo, las intensas lluvias en el mes de octubre pueden haber generado lixiviación de nitratos anulando posibles diferencias.

La infiltración de agua en el suelo tendió a ser mayor ($p = 0,07$) en el tratamiento DESC que en el TEST (Fig. 2). Las diferencias fueron muy evidentes en los sitios 1, 4, 5 y 6. Generalmente, se observó elevada variabilidad entre réplicas en la tasa de infiltración medida en los tratamientos DESC, lo cual se debe al trabajo propio del descompactador. Éste se caracteriza por generar áreas de mayor remoción en la zona de la púa y de menor disrupción hacia los laterales (Spoor, 2006). En sitios 1 y 2 los tratamientos TEST tuvieron bajas tasas de infiltración. Esto estuvo asociado con la presencia de estructuras laminares en el horizonte A, lo cual limita la entrada de agua a los suelos manejados con siembra directa (Sasal *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009). Las tasas de infiltración determinadas en los tratamientos TEST se clasifican como moderada a moderadamente rápida según USDA (1999). La descompactación llevó la clasificación de estos valores a las categorías moderadamente rápida y rápida.

Los tratamientos no presentaron diferencias de contenido hídrico gravimétrico hasta 1 m de profundidad en

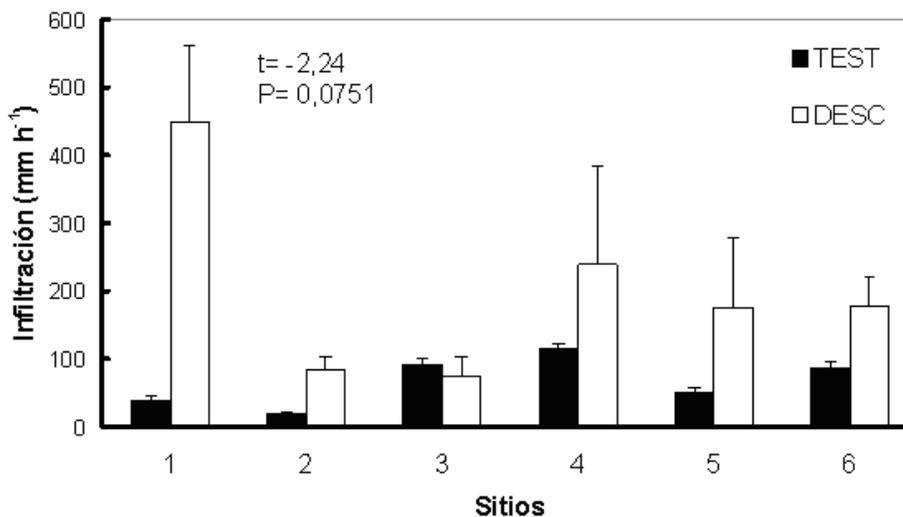


Figura 2. Tasa de infiltración de agua en el suelo en los tratamientos testigo (TEST) y descompactado (DESC). Las barras indican el error estándar de las medias ($n=3$) de cada sitio. La probabilidad indicada corresponde al test de t-apareada para el conjunto de sitios.

Figure 2. Soil water infiltration rate in control (TEST) and in deep tilled soil (DESC) treatments of the different sites. Standard errors of the means ($n=3$) in each site are indicated by bars. The indicated probability corresponds to the paired t-test for all studied sites.

V5-V6, siendo los valores de humedad en todas las situaciones superiores a 25% (Tabla 3). El mayor ingreso de agua al suelo, como consecuencia de una mayor infiltración en el tratamiento DESC pudo haber mejorado la disponibilidad inmediata de agua para las raíces. Sin embargo, ello no se vió reflejado en la medición de humedad edáfica en las primeras etapas del cultivo. Se debe considerar que el contenido de humedad, al igual que los nitratos, se determinó en el estado de V5-V6. Por lo tanto, su valor depende de la absorción realizada por el cultivo hasta el mencionado estadio.

Los valores presentados de resistencia a la penetración corresponden a la media y error estándar de las mediciones realizadas en cada tratamiento y en cada sitio (Fig. 3). No se registraron diferencias significativas en contenido hídrico entre tratamientos (Tabla 3) y además

Tabla 3. Humedad gravimétrica ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ suelo) promedio para los distintos tratamientos en el estadio V5-6 del cultivo de maíz. TEST: testigo; DESC: descompactado. Error estándar entre paréntesis.

Table 3. Mean soil water content ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ soil) for the different treatments (V5-6). TEST: control; DESC: deep tilled soil. Standard error between brackets.

Profundidad (cm)	Humedad ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$)	
	TEST	DESC
0-20	24,1 (0,46)	23,6 (0,81)
20-40	25,7 (0,78)	25,4 (0,48)
40-60	27,1 (0,55)	26,9 (1,09)
60-80	25,4 (0,60)	25,3 (1,11)
80-100	24,5 (0,91)	23,9 (1,27)

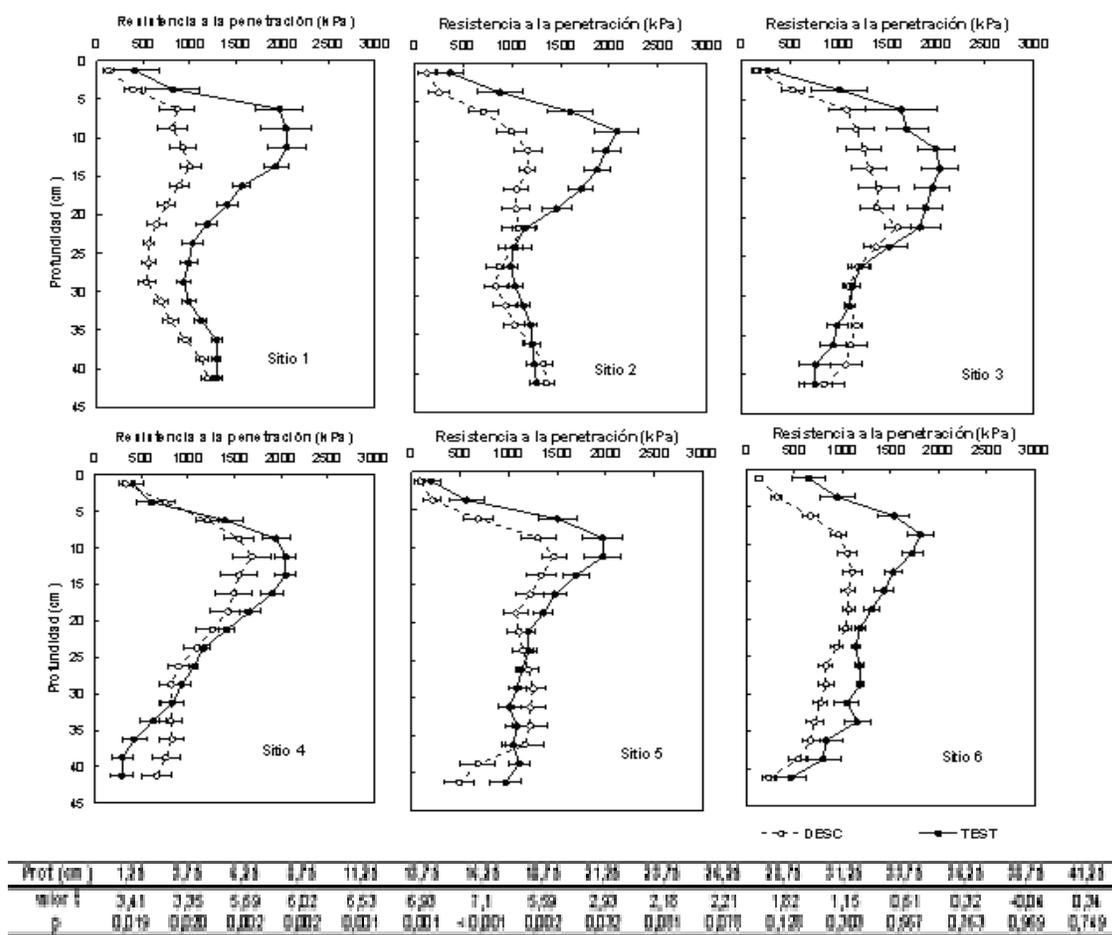


Figura 3. Perfil de resistencia a la penetración medida en el estado V5-6 del cultivo de maíz para los tratamientos testigo (TEST) y descompactado (DESC). Las barras indican el error estándar en cada sitio. El error estándar de las medias de cada sitio es indicado por barras. Los valores de probabilidad para cada profundidad aplicando un diseño de t apareado son mostrados en la tabla.

Figure 3. Profile of soil penetration resistance measured at the V5-V6 growing stage of maize in control (TEST) and deep tilled soil (DESC) treatments of the different sites. Standard errors of the means in each site are indicated by bars. The paired t-tests probability levels in each soil depth are shown in the table.

tampoco fueron elevadas las diferencias de humedad entre sitios. Por lo tanto, pueden realizarse comparaciones directas de resistencia a la penetración. Analizando todos los sitios en conjunto, la resistencia a la penetración fue la variable que presentó mayor sensibilidad a la descompactación. Los tratamientos DESC disminuyeron significativamente la resistencia de los suelos, la cual fue 37% menor que en TEST en la capa 0-25 cm y 24% menor en los primeros 0-40 cm (Fig. 3). Esta menor resistencia en el tratamiento DESC persistió hasta antes de la operación de cosecha del cultivo de maíz (Fig. 4), sugiriendo

una potencial residualidad del efecto de la descompactación sobre el cultivo posterior. El significado de los valores de resistencia puede ser inferido de los umbrales críticos de resistencia a la penetración definidos por la literatura (Boone *et al.*, 1986; Glinski & Lipiec, 1990). Estos umbrales varían de 1.500 kPa (50% de disminución en el crecimiento radical de maíz) a 3.000 kPa (detenimiento del crecimiento radical). Todos los sitios en V5-6 superaron el umbral mínimo en el tratamiento TEST, entre 7 y 20 cm de profundidad, pero no alcanzaron nunca el umbral máximo de 3.000 kPa. En el tratamiento DESC casi todos los

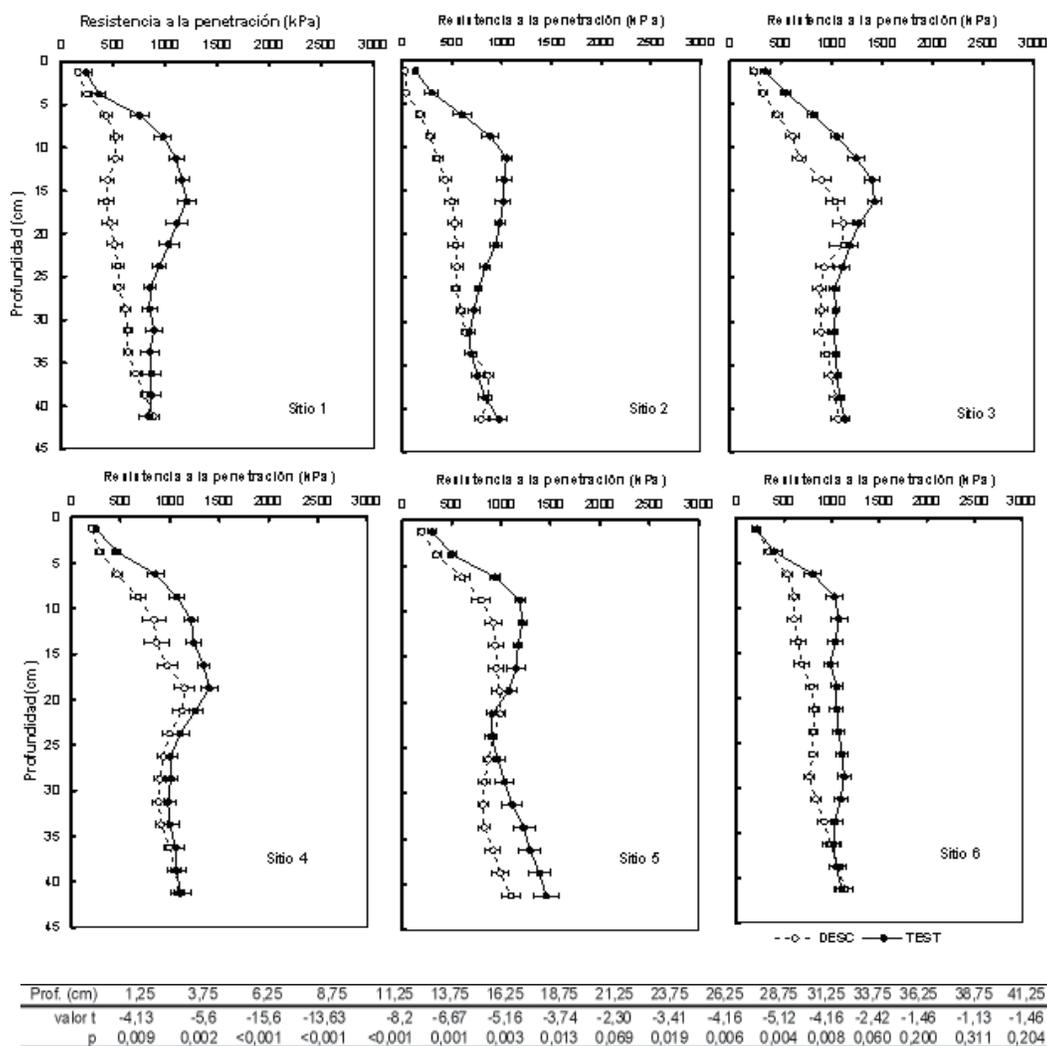


Figura 4. Perfil de resistencia a la penetración medida antes de la cosecha de maíz para los tratamientos testigo (TEST) y descompactado (DESC). Las barras indican el error estándar en cada sitio. El error estándar de las medias ($n=3$) de cada sitio es indicado por barras. Los valores de probabilidad para cada profundidad aplicando un diseño de t apareado son mostrados en la tabla.

Figure 4. Profile of soil penetration resistance measured before maize harvest in control (TEST) and deep tilled soil (DESC) treatments of the different sites. Standard errors of the means ($n = 3$) in each site are indicated by bars. The paired t-tests probability levels in each soil depth are shown in the table.

valores fueron inferiores al umbral inferior (1.500 kPa). Teniendo en cuenta que el nivel de humedad edáfica era adecuado (Tabla 3) en todas las situaciones y profundidades no debe descartarse que los umbrales sean sobrepasados en condiciones de suelo más seco (Gupta & Allmaras, 1987; Glinski & Lipiec, 1990).

El análisis estadístico conjunto efectuado para todos los sitios indica que la descompactación aumentó significativamente los rendimientos de maíz (Tabla 4). La respuesta media del cultivo fue moderada alcanzando 659 kg ha⁻¹ ($p=0,0019$). Expresada en términos relativos fue de 5,56%, variando entre 2,33 y 9,73%. Considerando el precio de maíz en marzo 2007 (370 \$ Mg⁻¹) y un costo de la práctica de descompactación de 90 \$ ha⁻¹, el beneficio económico marginal promedio obtenido fue 154 \$ ha⁻¹, y en ningún sitio el beneficio fue negativo. El nivel de respuesta hallado se asemeja al incremento medio de rendimiento (6,5%; 785 kg ha⁻¹) hallado previamente por Álvarez *et al.* (2006). Dicho trabajo se realizó en una condición climática menos favorable (pero no limitante) en cuanto a precipitaciones (525 mm en la campaña 2005). Estos resultados encuadran al presente trabajo dentro de aquellos antecedentes que hallaron beneficios por parte de la labor de descompactación (Botta *et al.*, 2004; Sadras *et al.*, 2005; Álvarez *et al.*, 2009). La práctica de descompactación suele presentar mayor impacto sobre el rendimiento en condiciones de estrés hídrico moderado, sien-

do este impacto mínimo o nulo en condiciones de estrés hídrico severo o de alta humedad (Sadras *et al.*, 2005). En el presente trabajo, el incremento en el rendimiento de maíz se debió a una mayor disponibilidad hídrica por la mayor infiltración y a una mayor accesibilidad a los recursos (*e.g.* agua, nutrientes) debido a la menor resistencia a la penetración. Esta menor resistencia a la penetración posiblemente condujo a una mayor exploración radical (no medida en maíz).

La magnitud de la respuesta a la descompactación (absoluta o relativa) no pudo ser correlacionada con los valores iniciales de las variables edáficas evaluadas (densidad aparente, infiltración, resistencia a la penetración, materia orgánica, nitratos, textura). Tampoco se pudo correlacionar con la magnitud de la variación de dichas propiedades por efecto de la descompactación o con variables de manejo (*e.g.* días desde la descompactación).

Efecto residual de la descompactación

La residualidad del efecto de la práctica de descompactación fue evaluada en tres de los sitios originales en el cultivo de soja. La resistencia a la penetración sólo presentó diferencias significativas entre tratamientos (TEST < DESC) en los primeros 5 cm, siendo la humedad gravimétrica igual entre tratamientos (Fig. 5). Por lo tanto, no hubo efecto residual de la práctica de descompactación sobre

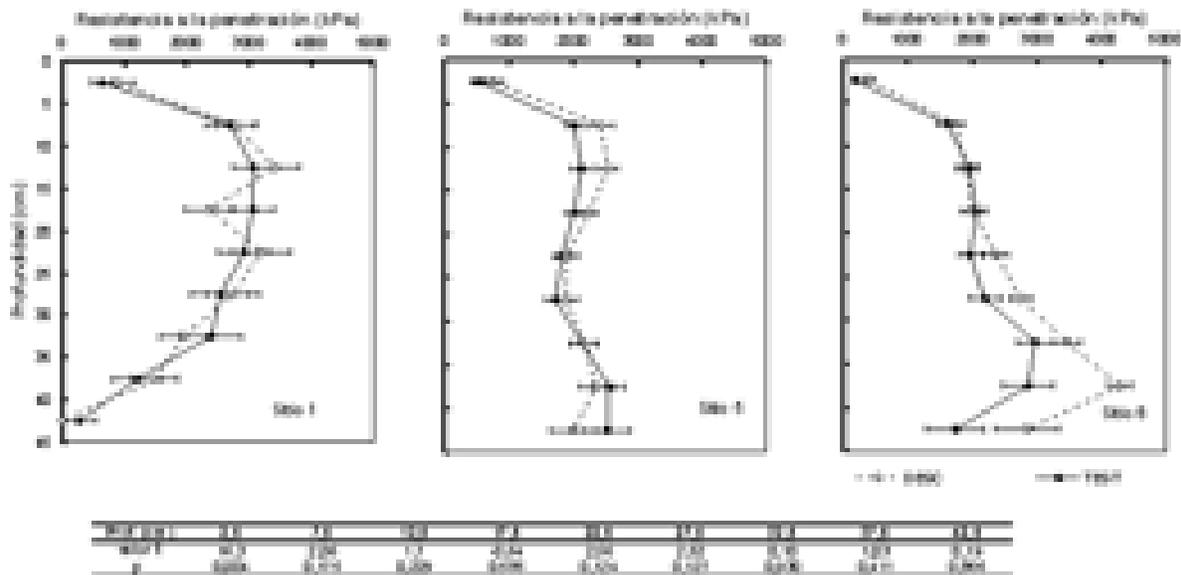


Figura 5. Perfil de resistencia a la penetración medida en el mes de enero 2008 en soja para los tratamientos testigo (TEST) y descompactado (DESC). Las barras indican el error estándar en cada sitio. Los valores de probabilidad para cada profundidad aplicando un diseño de t apareado para el conjunto de sitios son mostrados en la tabla.

Figure 5. Profile of soil penetration resistance, measured on January 2008, in control (TEST) and deep tilled soil (DESC) treatments of the different sites. Standard errors of the means ($n = 3$) in each site are indicated by bars. The paired t-tests probability levels for each soil depth are shown in the table.

la resistencia del suelo. Los valores de resistencia a la penetración en varias profundidades superaron o fueron cercanos a los umbrales de 1.500-3.000 kPa (Boone *et al.*, 1986; Glinski & Lipiec, 1990). Debe destacarse que los valores de resistencia medidos en 2007 fueron superiores a los determinados al inicio de la campaña 2006. Por un lado, el suelo se encontraba con menor humedad en 2007 (contenido hídrico gravimétrico = 17-22% en peso) que en 2006. Pero también, esta mayor resistencia puede ser atribuida a los efectos derivados de las operaciones de cosecha del cultivo. Uno de los efectos negativos de una labor de descompactación es dejar al suelo más vulnerable (menor capacidad portante) a la aplicación de nuevos estreses compactantes (Hamza & Anderson, 2005; Botta *et al.*, 2007). El tiempo de recompactación depende del manejo posterior del tránsito (Evans *et al.*, 1996; Botta *et al.*, 2006). En el momento previo a la cosecha del cultivo de maíz (abril de 2007), el suelo presentaba aún efectos de la labor de descompactación realizada meses atrás. El escenario hídrico a cosecha de ese cultivo de maíz fue extremadamente húmedo pues las precipitaciones alcanzaron 250 mm (Fig. 1). Por lo tanto, la cosecha del cultivo se efectuó con el suelo con mínima capacidad portante. Un escenario de alta intensidad de tránsito no controlado y altos rendimientos del maíz pudo haber contribuido a determinar una baja residualidad de la práctica de descompactación.

La abundancia de raíces de soja se presenta en la Figura 6. El análisis conjunto de los tres sitios indica que sólo se hallaron diferencias significativas entre tratamien-

tos (DESC > TEST) en la capa de 5 a 10 cm. Se percibió una tendencia a mayor desarrollo radical en el tratamiento DESC en los sitios que tuvieron doble cultivo, sugiriendo que el cultivo de invierno sembrado inmediatamente después del maíz pudo aprovechar y estabilizar mejor la residualidad de la práctica de descompactación. Los rendimientos de los cultivos de trigo y soja no presentaron diferencias estadísticas debidas a la descompactación (Tabla 5). Al igual que lo sucedido con el cultivo previo de maíz (Tabla 4), en el sitio 5 se observó una tendencia

Tabla 4. Rendimiento y respuesta del cultivo de maíz a la práctica de descompactación en 5 de los 6 sitios. TEST: testigo; DESC: descompactado.

Table 4. Maize yield and crop response to the different treatments in 5 of the 6 evaluated sites. TEST: control; DESC: deep tilled soil.

Sitio	Rendimiento maíz (kg ha ⁻¹)		Respuesta maíz (kg ha ⁻¹)
	TEST	DESC	
1	11.810	12.391	581
2	11.614	12.133	519
4	12.900	13.200	300
5	11.300	12.400	1100
6	12.516	13.313	797
Promedio	12.028	12.687	659
p	0,0019		

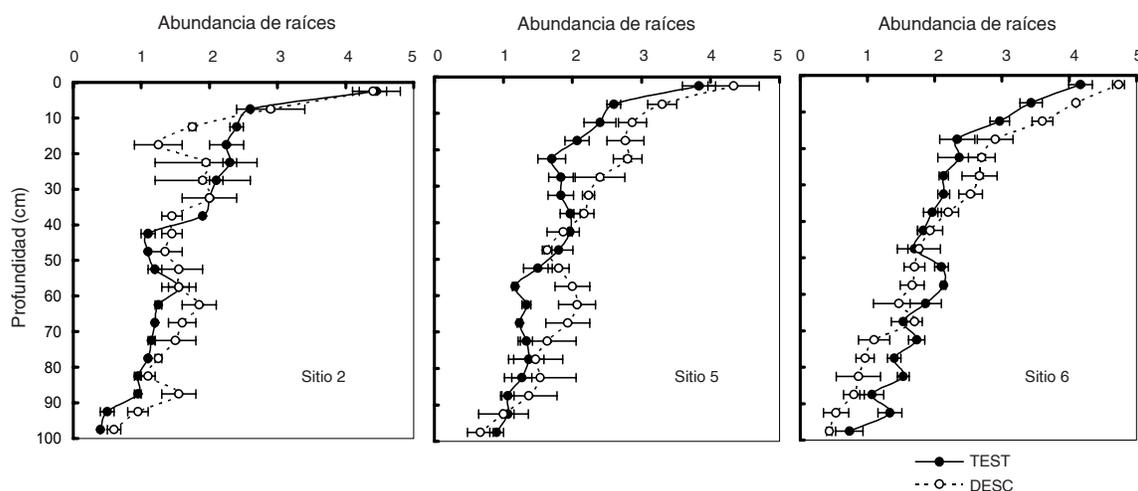


Figura 6. Abundancia de raíces de cultivos de soja de primera (Sitio 2) y doble cultivo trigo/soja (Sitios 5 y 6) en los tratamientos testigo (TEST) y descompactado (DESC). Escala de abundancia: 0 = ausencia y 5 = máxima abundancia. TEST: testigo; DESC: descompactado.

Figure 6. Mean root abundance of full season soybean (Site 2) and double-cropped wheat-soybean (Sites 5 and 6) in the control (TEST) and deep tilled soil (DESC) treatments. Abundance scale: 0 = null and 5 = maximum root abundance.

Tabla 5. Residualidad de la práctica de descompactación medida sobre los cultivos subsiguientes. TEST: testigo; DESC: descompactado (en el cultivo anterior).

Table 5. Persistence of soil decompaction as measured by the yield of subsequent crops. TEST: control; DESC: deep tilled soil.

Sitio	Rendimiento trigo (kg ha ⁻¹)		Rendimiento soja (kg ha ⁻¹)	
	TEST	DESC	TEST	DESC
2			4.826	4.923
5	4.022	4.675	3.138	3.448
6	5.769	6.074	4.425	4.213

a mayor respuesta a la descompactación. Es importante destacar que luego de la descompactación el suelo queda con menor capacidad portante o soporte. Por lo tanto, es muy importante la aplicación de prácticas que prevengan la recompactación del suelo luego del pasaje de un descompactador.

CONCLUSIONES

a. Los suelos franco limosos manejados con siembra directa y cultivados con maíz evaluados en el presente estudio mostraron cambios inmediatos en su resistencia a la penetración y en su tasa de infiltración luego de ser descompactados con implementos de labranza profunda.

b. Pese a que las buenas condiciones hídricas de la campaña hacían prever un escaso nivel de respuesta a la descompactación, los cultivos de maíz tuvieron respuestas en rendimiento y económicas interesantes.

c. Los valores de resistencia a la penetración en V5-6 superaron el umbral mínimo de 1.500 kPa con buen contenido hídrico y se observaron respuestas de rendimiento a la descompactación. Puede considerarse adecuado este valor umbral propuesto como indicador de impedancia para el cultivo.

d. Los cambios de resistencia a la penetración no perduraron de un año al otro, hecho que puede atribuirse tanto a efectos de consolidación natural, como a la mayor vulnerabilidad mecánica en que queda un suelo descompactado frente al tránsito de maquinarias.

e. No se observaron efectos residuales de la descompactación sobre los rendimientos de cultivos de soja de primera y de segunda.

AGRADECIMIENTOS

Los ensayos fueron financiados por los miembros del CREA Santa Isabel. Agradecemos el apoyo recibido por ellos y por los Gerentes y Encargados de los establecimientos durante la ejecución de los mismos. También se contó con la financiación parcial de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2006-1991) y la Universidad de Buenos Aires (UBACYT G403; 2008).

BIBLIOGRAFÍA

- Allison, LE. 1965. Organic carbon. *In: CA Black (ed). Methods of Soil Analysis (Part 2) Chemical and Microbiological Properties.* Publisher: America Society of Agronomy Inc., Madison, Wisconsin, USA. Pp: 1367-1378.
- Álvarez, R & S Grigera. 2005. Analysis of soil fertility and fertilizer effects on wheat and corn yield in the Rolling Pampa of Argentina. *J. Agron. Crop. Sci.* 191: 321-329.
- Álvarez, CR; MA Taboada; C Bustingorri & FH Gutiérrez Boem. 2006. Descompactación de suelo en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo* 24: 1-10.
- Álvarez, CR; MA Taboada; FH Gutiérrez Boem; A Bono; PL Fernández & P Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
- Amato, M & J Ritchie. 2002. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Sci.* 42: 773-780.
- Boone, FR; KH van der Werf; B Kroesbergen; BA ten Hag & A Boers. 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. I. Mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 34: 155-171.
- Botta, GF; D Jorajuria; R Balbuena & H Rossato. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil Till. Res.* 78: 53-58.
- Botta, GF; D Jorajuria; R Balbuena; M Ressia; C Ferrero, H Rossato & M Tourn. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus* L.) yields. *Soil Till. Res.* 91: 164-172.
- Botta, GF; O Pozzolo; M Bomben; H Rosatto; D Rivero; M Ressia; M Tourn; E Soza & J Vázquez. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil Till. Res.* 96: 145-154.
- 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.
- Daniel, P & L Marbán. 1989. Adaptación de un método espectrofotométrico reductivo para la determinación de nitratos. *Boletín de la AAC S* 58:3-8.

- Derpsch, R. 2005. The extent of Conservation Agriculture adoption worldwide: Implications and impact. Proceedings of the Third World Congress on Conservation Agriculture: Linking Production, Livelihoods and Conservation. Nairobi, Kenya, October 3-7, 2005. [CD].
- Díaz-Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Till. Res.* 54: 11-19.
- Erbach, DC; RM Cruse; TM Crosbie; DR Timmons; TC Kaspar & KN Potter. 1986. Maize response to tillage-induced soil conditions. *Trans. ASAE* 29: 690-695.
- Evans, SD; MJ Lindstrom; WB Voorhees; JF Moncrief & GA Nelson. 1996. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil Till. Res.* 38: 35-46.
- Ferraris, GN. 2004. Descompactación de suelos bajo siembra directa. *Revista de tecnología agropecuaria-INTA PERGAMINO*, Enero-abril: 46-48.
- Gee, GW & D Or. 2002. Particle-Size Analysis. p. 255-293. In: JH Dane & GC Topp (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Glinski, J & J Lipiec. 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida. 250 pp.
- Grossman, RB & TG Reinsch. 2002. Bulk Density and Linear Extensibility. p. 201-228. In: J. Dane & GC Top (eds). *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*, SSSA Book Series 5, Madison, WI.
- Gupta, SC & RR Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Science* 6: 65-100.
- 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.
- Lowery, B & J E Morrison, Jr. 2002. Soil penetrometers and penetrability. p. 363- 388. In: JH Dane & GC Topp (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- 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.
- Maddoni, GA; S Urricariet; CM Ghersa & RS Lavado. 1999. Assessing soil quality in the Rolling Pampa (Argentina), using soil properties and maize characteristics. *Agron. J.* 91: 280-287.
- Manichon, H. 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. p. 145-155. In: G Monnier & MJ Goss (eds). *Soil Compaction and Regeneration*. A.A. Balkema. Rotterdam / Boston.
- Pilatti, MA & JA de Orellana. 2000. The ideal soil: II. Critical values of an «ideal soil,» for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *J. Sustainable Agric.* 17: 89-111.
- Sadras, VO & PA Calviño. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower and wheat. *Agron. J.* 93(3): 577-583.
- 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.
- Sasal, MC; A Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics on water dynamics under direct drilling in Argudolls of the Argentinean Rolling Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Senigagliaesi, C & M Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *International Crop Science I.* pp. 27-35. In: DR Buxton; R Shibles; RA Forsberg; BL Blad; KH Asay; GM Paulsen & RF Wilson (eds). *Crop Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.*
- Spoor, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use Manage.* 22: 113-122.
- Taboada, MA & CR Álvarez. 2007. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *R. Bras. Ci. Solo* 32: 769-779.
- Taboada, MA; OA Barbosa & DJ Cosentino. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
- Tardieu, F. 1988. Analysis of spatial variability of maize root density. I. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant Soil* 107: 259-266.
- USDA. 1999. *Soil Quality Test Kit Guide*. USDA-ARS. SCS.