

DESCOMPACTACIÓN MECÁNICA DE SUELOS BAJO SIEMBRA DIRECTA: EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS EDÁFICAS Y EL CULTIVO DE MAÍZ EN LA PAMPA ONDULADA

Carina R. Álvarez^{1*}, Flavio H. Gutiérrez Boem^{1, 2}, Martín Torres Duggan³ y Migual A. Taboada^{2, 4}

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina

* E-mail: alvarezc@agro.uba.ar

² CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

³ Tecnoagro, Buenos Aires, Argentina

⁴ INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Suelos, CIRN, Argentina

Recibido: 24/05/2021

Aceptado: 19/07/2021

RESUMEN

La compactación y/o endurecimiento del suelo en planteos de siembra directa lleva a considerar la posibilidad de realizar prácticas de labranza profunda de manera eventual. Los objetivos de este estudio fueron evaluar los efectos de la descompactación del suelo en siembra directa sobre (i) las propiedades físicas edáficas y (ii) la abundancia de raíces y el rendimiento del cultivo de maíz. Se analizaron seis ensayos de descompactación con repeticiones y otros seis con diseño de parcelas apareadas en la Pampa Ondulada sobre Hapludoles y Argiudoles Típicos. Los tratamientos fueron: testigo y descompactado con labranza sin inversión. Los datos de ensayos con repetición fueron analizados con ANOVA y prueba de Tuckey. En el análisis conjunto de datos provenientes de ensayos con repetición y de parcelas apareadas, se aplicó la prueba de t apareada. La labranza profunda provocó una fuerte reducción de la resistencia a la penetración, mejoró la infiltración, y aumentó la abundancia de raíces en los primeros 10 cm de suelo. El aumento en la disponibilidad y accesibilidad de los recursos a través de una mejor exploración radicular podría explicar el aumento promedio del 6% del rendimiento en grano del cultivo de maíz, incluso cuando las condiciones de la campaña fueron favorables. A la siembra del siguiente cultivo de verano (soja), evaluados sólo en tres sitios, no se observaron efectos residuales de la labor sobre el suelo o las variables del cultivo. Resulta importante la implementación de prácticas preventivas de la compactación luego de la labor para aumentar la residualidad de la práctica.

Palabras clave: siembra directa, descompactación, maíz, infiltración, raíces.

SOIL MECHANICAL ALLEVIATION IN NO-TILLED SYSTEMS: EFFECT ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND MAIZE CROP IN THE ROLLING PAMPAS

SUMMARY

Compaction and or soil hardening in no-tillage systems lead to consider the possibility of a deep tillage practice. The objective of this study was to evaluate the effects of soil compaction alleviation under no-tillage on (i) soil physical properties, (ii) root abundance and maize yield. Six trials with replicates and six with paired plot design were analyzed in the Rolling Pampas on Typic Argiudolls and Hapludolls. Treatments were: control and soil compaction alleviation with non-inversion tillage. In the case of the trials with replication, data were analyzed with ANOVA and Tuckey's test. In the case of the joint analysis of data from the trials with replication and the paired plots, the paired t test was applied. Deep tillage caused a strong reduction in penetration resistance, improved the water infiltration rate, and increased the abundance of roots in the first 10 cm of soil. The increase in the availability and accessibility of resources, as consequence of a better soil exploration by roots, could explain the increase in maize yield, in an average 6% even when meteorological conditions were favorable. At sowing of the next summer crop (soybean) in only three evaluated sites, no residual effects were observed either on soil or crop variables. It is important to implement preventive practices after the labor to increase the persistence of the mechanical alleviation practice.

Key Words: No-tillage, soil mechanical alleviation, maize, infiltration rate, roots.

INTRODUCCIÓN

El laboreo intensivo ha llevado a procesos de degradación de la calidad física de los suelos, como la erosión del suelo, el encostramiento superficial y la formación de pisos de arado, entre otros (Morris *et al.*, 2010). El cambio de sistemas de labranza convencional a siembra directa (SD) ha resultado en mejoras en la estabilidad estructural del suelo, el control de la erosión, mejoras en la economía del agua, ahorro de tiempo operativo, reducción en el uso de combustibles fósiles y un aumento variable en el secuestro de C del suelo (Peiretti y Dumanski, 2014). La SD se practica en casi 180 millones ha en todo el mundo (Kassam *et al.*, 2019), y en más del 90% del área de maíz en la Argentina (Brihet *et al.*, 2020). La Pampa Ondulada argentina se extiende sobre casi 5 millones ha, siendo la producción de cultivos de grano una de las principales actividades, ocupando el 70% de esta superficie. El maíz siempre ha sido un cultivo muy importante en esta región. Hoy en día, es la segunda cosecha de verano más importante después de la soja.

Aunque es esperable una mejor calidad estructural de la capa superficial del suelo bajo SD por mayor contenido de C orgánico y actividad biológica, frecuentemente se desarrolla una compactación poco profunda (10-20 cm), caracterizada por una alta resistencia mecánica (Álvarez *et al.*, 2009a; Álvarez y Steinbach, 2009) y, a veces, valores de densidad aparente más altos (Álvarez y Steinbach, 2009). Además, especialmente en suelos limosos y franco-limosos de la Pampa Ondulada, se reportan tasas de infiltración más bajas en los sistemas de SD, que pueden estar relacionadas con estructuras superficiales desfavorables como la formación de agregados planares y porosidad horizontal (Álvarez *et al.*, 2009a; Álvarez *et al.*, 2014; Sasal *et al.*, 2017). Esta compactación o endurecimiento se puede atribuir al alto tránsito de la maquinaria agrícola y su mayor peso, la falta de rotación de cultivos, el bajo aporte de residuos y la ausencia de remoción mecánica (Botta *et al.*, 2004; Morris *et al.*, 2010; Sasal *et al.*, 2017). Bajo SD, la regeneración estructural de los primeros centímetros del suelo depende de los mecanismos bióticos (raíces, macrofauna, materia orgánica) y abióticos como los ciclos de expansión-contracción del suelo, que dependen del porcentaje y tipo de arcillas, y los ciclos de humedecimiento y secado (Taboada *et al.*, 2004).

Dentro de las propiedades físicas del suelo, la densidad aparente y la resistencia a la penetración son

indicadores esenciales de la calidad física edáfica. La consideración de estas propiedades es útil para evaluar la aptitud del suelo para proporcionar un entorno adecuado para el desarrollo de las raíces, así como para prevenir reducciones del crecimiento y pérdidas de rendimiento de los cultivos (Glinski y Lipiec, 1990). Los poros mayores de 100 μm de diámetro equivalente son cruciales por su influencia en el crecimiento de las raíces (Gibbs y Reid, 1988). Las raíces pueden crecer dentro de los poros existentes cuando estos son más grandes que el diámetro de la raíz, agrandar los poros más pequeños o crear otros completamente nuevos. Por lo tanto, si el suelo inmediatamente alrededor del área de las raíces está compactado, se restringirá el crecimiento de las mismas (Gibbs y Reid, 1988; Glinski y Lipiec, 1990). En tales condiciones, el crecimiento y el rendimiento de los cultivos pueden verse limitados, ya que se restringe el acceso a los recursos (por ejemplo, agua y nutrientes).

Debido a que las limitaciones por compactación subsuperficial del suelo están extendidas en todo el mundo, existe un gran interés en el uso de prácticas de descompactación. Estas prácticas de labranza profunda generalmente reducen la resistencia a la penetración del suelo. Sin embargo, el efecto sobre el crecimiento de las raíces y el rendimiento del cultivo es variable (Schneider *et al.*, 2017) debido a la interacción entre las condiciones ambientales y las propiedades físicas del suelo. La resistencia a la penetración (RP) está inversamente relacionada con el contenido de agua del suelo, aunque suelos con altos contenidos de materia orgánica, tienen similar RP con bajo contenido de agua y con alto contenido de agua. En un suelo compactado, cuando la disponibilidad de agua es restringida, el suelo se endurece limitando el crecimiento de las raíces, mientras que cuando el contenido de agua del suelo es alto, la resistencia a la penetración baja, pero la aireación puede verse afectada por la baja presencia de macroporos (Pilatti y Orellana, 2000). Por lo tanto, el rendimiento de los cultivos puede verse limitado por la compactación en condiciones de suelo muy seco o muy húmedo (Håkansson y Lipiec, 2000). En este contexto, se esperaría un mayor efecto de las prácticas de descompactación sobre el rendimiento de los cultivos en condiciones de sequía moderada por las restricciones al acceso a los recursos del suelo (por ejemplo: agua, nutrientes) en dichas circunstancias.

El maíz es uno de los cultivos más sensibles al estrés hídrico, debido a su acotada etapa crítica de definición del rendimiento alrededor de floración (Sadras *et*

al., 2002). En la región pampeana de la Argentina, este período crítico en maíz temprano a menudo coincide con condiciones de estrés hídrico (Maddonni, 2012). Sadras y Calviño (2001) han observado que la reducción promedio del rendimiento en grano debido a la disminución de la profundidad del suelo fue mayor en el cultivo de maíz que en los de girasol, soja o trigo. Por otro lado, existe escasa información sobre la perdurabilidad de los cambios en las propiedades del suelo y el crecimiento de los cultivos provocados por la descompactación con implementos que no producen inversión del suelo (paratill, paraplow, cultivie, entre otros) en planteos de SD. Varios autores han encontrado diferencias entre el testigo y el descompactado incluso después de 2-3 años de realizada la labor (Mon, 2008; Guecaimburú *et al.*, 2014). Sin embargo, otros estudios han demostrado que los efectos de descompactación son de corta duración, persistiendo sólo durante un ciclo de cultivo (Díaz-Zorita, 2000).

Los objetivos de este estudio fueron: (1) evaluar los efectos de la práctica de descompactación del suelo en sistemas de SD sobre las propiedades físicas edáficas en diferentes etapas de crecimiento del cultivo de maíz y (2) evaluar el efecto de la descompactación sobre la abundancia de raíces, el rendimiento en grano y los componentes del rendimiento del cultivo de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área experimental

El clima de la Pampa Ondulada se define como templado húmedo sin estación seca. La precipitación media anual es cercana a los 950 mm, las mayores precipitaciones se producen de diciembre a marzo y las más bajas se producen en el período invernal (julio a septiembre). Los principales tipos de suelos de la región son Argiudoles y Hapludoles Típicos, desarrollados a partir de sedimentos eólicos (loess) (Rubio *et al.*, 2019). Estos suelos presentan, generalmente, elevados contenidos de limo en superficie, compuestos por una gran proporción de fitolitos y vidrios volcánicos.

Experimentos de campos con repeticiones

Durante las campañas agrícolas de 2004 y 2005, se llevaron a cabo seis experimentos en diferentes lugares de la Pampa Ondulada (Cuadro 1; sitios experimentales –SE– 1 a 6). En todos los sitios, se estableció un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron: (1) testigo y (2) labranza profunda sin inversión (en adelante, descompactado). En

el Cuadro 1 se muestra un detalle de la información la localización, tipo de suelo, las condiciones experimentales y las características de la labor de descompactación (e.g. implementos utilizados: escarificador, paratill, ecotier). La rotación de cultivos en todos los SE fue una secuencia típica de la Pampa Ondulada: trigo/soja II-maíz o trigo/soja II-maíz-soja. La soja fue el cultivo antecesor en todos los experimentos. La fecha de siembra del maíz varió desde mediados de septiembre hasta los primeros días de noviembre. La labor de descompactación se realizó a una profundidad promedio de 40 cm, con un rango de 30 a 45 cm. Se aplicaron fertilizantes con N y P con el fin de cubrir posibles diferencias de nutrientes asociadas con la práctica de descompactación.

A la siembra del cultivo de maíz, se tomaron muestras compuestas de suelo de la capa de 0-20 cm en cada SE para determinar la concentración de materia orgánica (Walkley y Black, 1965) y la composición granulométrica por el método de pipeta (Gee y Or, 2002). Inmediatamente antes de la siembra y antes de la cosecha del maíz, se determinaron las siguientes propiedades físicas del suelo:

- a. Tasa de infiltración de agua (INF), se estimó utilizando un método rápido (USDA, 1999). Se insertó un anillo de 6 pulgadas de diámetro a 3 pulgadas de profundidad dentro del suelo y se agregó una lámina de agua de 2,54 cm en el anillo para humedecer los primeros centímetros de suelo. Luego se agregó una segunda lámina de agua de 2,54 cm que, según el método, correspondería a la infiltración básica, y se registró el tiempo que tardó en ingresar al suelo. Se realizaron dos mediciones por repetición de cada tratamiento, una sobre la púa y otra en el medio de ambas.
- b. La densidad aparente del suelo (DAP) se determinó con el método del cilindro (Grossman y Reinsch, 2002). Se tomaron muestras a 0 cm y a 15 cm de profundidad, utilizando cilindros de aluminio de 6,8 cm de diámetro y 6 cm de altura. Se tomó una muestra en cada repetición de cada tratamiento.
- c. La resistencia a la penetración del suelo (RP) se midió utilizando un penetrómetro dinámico de punta de 60° de 1,54 cm² de sección (Burke *et al.*, 1986). Se tomaron lecturas del índice de cono (2 mediciones por repetición) desde la superficie del suelo hasta una profundidad de 40 cm a intervalos de 5 cm.
- d. El contenido de agua del suelo se obtuvo a dos profundidades: 0-20 y 20-40 cm. Se tomó una

Cuadro 1. Caracterización de los sitios experimentales (SE): localización, tipo de suelo, manejo y precipitaciones durante el ciclo del cultivo de maíz. BA: Buenos Aires, SF: Santa Fe. MOS: materia orgánica del suelo. Implementos utilizados: SE1 y SE2 escarificadores; SE3, SE5 y SE6: paratill; SE4: ecotier; SE7 a SE12: paratill o cultivie. El distanciamiento entre púas de los implementos varió entre 35 cm y 70 cm, utilizándose generalmente un rolo detrás de los mismos con el objetivo de asentar el suelo y lograr una siembra uniforme.

Sitio experi- mental SE	Localidad	Tipo de suelo	MOS	Limo	Arena	Descom- pactación (días antes de siembra)	Años en SD	Años desde pastura	Profundi- dad labor (cm)	Años	Lluvia durante el ciclo (mm)	Lluvia diciembre (mm)
			(g kg ⁻¹)									
1	Junín (BA)	Hapludol típico	27	270	570	60	4	25	42	2004	529	229
2	San Gregorio (SF)	Hapludol típico	35	380	430	30	12	12	45	2004	615	179
3	Chivilcoy (BA)	Argiudol típico	28	480	330	75	8	80	36	2004	432	169
4	Acevedo (BA)	Argiudol típico	30	690	100	39	10	19	30	2005	475	36
5	Salto (BA)	Argiudol típico	36	590	230	53	8	8	35	2005	494	45
6	Salto (BA)	Argiudol típico	39	620	160	53	3	3	35	2005	494	45
7	Santa Emila (SF)	Argiudol típico	32	600	149	65	>10	>10	30	2006	885	139
8	Santa Emilia (SF)	Argiudol típico	33	600	149	67	>10	>10	30	2006	885	139
9	Teodolina (SF)	Argiudol típico	32	494	277	77	>10	>10	30	2006	895	160
10	Teodolina (SF)	Argiudol típico	30	494	277	80	>10	>10	30	2006	895	160
11	Colón (BA)	Argiudol típico	31	494	277	118	>10	>10	30	2006	895	160
12	Colón (BA)	Argiudol típico	29	494	277	112	>10	>10	30	2006	895	160

muestra compuesta de cada parcela y se secó a 105 °C durante 48 h.

En floración, se evaluó la abundancia de raíces de maíz utilizando el método de lectura en la pared de una calicata (Manichon, 1987). Se realizó una calicata en cada parcela con una hilera de maíz ubicada en el medio, las raíces se expusieron en una de las paredes de la calicata y se estimaron utilizando un marco de 50 cm de ancho y 100 cm de profundidad con divisiones cuadradas internas de 5 cm x 5 cm. Para caracterizar la abundancia de raíces en cada cuadrante se utilizó una escala cualitativa que fue de 0 (ausencia de raíces) a 5 (máxima abundancia). Se determinó la radiación solar interceptada (%) en todos los SE con la excepción del sitio 3. Para obtener estos valores, se midió la radiación fotosintéticamente activa sobre y debajo del dosel de maíz (5 lecturas por parcela), utilizando un radiómetro lineal de 1 m (LICOR LI-191SA). Se determinó el verdor de las hojas (medidor de clorofila Minolta SPAD-502) en la hoja inmediatamente superior a la espiga de maíz en 20 plantas consecutivas dentro de cada parcela.

A la cosecha se determinó el rendimiento en grano y sus componentes (número de granos m⁻² y peso promedio de grano), tomando las espigas de 4 m en cada parcela (cosechadas a mano). Las muestras de grano se secaron en una estufa a 60 °C durante 72 h hasta peso constante y se pesaron. El peso de grano individual se determinó en 3 submuestras de 100 granos de cada unidad experimental, y el número de granos se calculó dividiendo la materia seca total del grano por el peso medio de la semilla. Se registraron las precipitaciones durante el barbecho y el ciclo de cultivo para cada SE (Cuadro 1). Parte de los resultados presentados fueron publicados en Álvarez *et al.* (2006) y se incluyen en este trabajo para evaluar el efecto de la práctica con más información.

Experimentos de campo de parcelas apareadas, sin repetición

Durante la campaña agrícola de 2006 se llevaron a cabo seis experimentos en diferentes campos agrícolas en la Pampa Ondulada (Cuadro 1; SE7 a SE12). Estos campos habían sido manejados en SD durante más de

10 años y en ellos se aplicaron las mismas rotaciones descriptas en el apartado anterior. La localización, las principales características del suelo y la historia de manejo se presentan en el Cuadro 1.

Los tratamientos fueron: (1) testigo y (2) labranza profunda sin inversión (en adelante, descompactado). El diseño experimental fue parcelas apareadas en cada sitio (6 x 300 m). La siembra de maíz se realizó a mediados de octubre y se cosechó en abril. La fertilización se manejó aplicando 65 a 100 kg N ha⁻¹ y 20 a 30 kg P ha⁻¹. Después de la cosecha de maíz, el SE8 se sembró con soja de primera a mediados de octubre de 2007 y los sitios SE11 y SE12, con trigo/soja II. El trigo se sembró en junio de 2007 y la soja en diciembre de 2007.

Al inicio de los experimentos se tomaron muestras de suelo de 0-20 cm en cada sitio para determinar la materia orgánica del suelo (Walkley y Black, 1965) y la composición granulométrica por el método de pipeta (Gee y Or, 2002). En V5 del maíz (collar de 5 hojas completamente desplegadas) se determinaron las siguientes propiedades del suelo: (a) DAP en las capas de 0-5 cm y 15-20 cm (n= 4) (Grossman y Reinsch, 2002), (b) contenido de agua del suelo, (c) RP usando un penetrómetro digital estático (punta de 30°; Lowery y Morrison, 2002) (n= 10), y (d) INF (USDA, 1999) (n= 2). Antes de la cosecha de maíz (n d), se determinaron la RP y el contenido de humedad del suelo en todos los SE. El maíz se cosechó mecánicamente utilizando tolvas individuales. Para continuar con la evaluación de la persistencia de la práctica de labranza profunda, se determinó la RP en la fecha de siembra de los siguientes cultivos de verano en los sitios SE8, SE11 y SE12. En estos sitios también se registró el rendimiento de grano de los cultivos posteriores al maíz y la abundancia de raíces de los mismos hasta el metro de profundidad. Estos resultados fueron publicados en Álvarez *et al.* (2009b) y se incluyen en este trabajo para evaluar el efecto de la práctica con más información.

Análisis estadístico

Los resultados fueron sometidos a distintos análisis estadísticos dependiendo del diseño experimental, especialmente si las variables fueron determinadas en uno de los diseños (con repeticiones o no) o en ambos. En el caso de los ensayos con repetición, los datos fueron analizados con ANOVA y prueba de Tuckey para separar las medias. En el caso del análisis conjunto de los datos provenientes del ensayo con repetición y las parcelas apareadas se aplicó la prueba de *t* apareada.

Para esta situación, en el caso del ensayo con repetición se compararon las medias de cada tratamiento en cada sitio.

Los datos fueron transformados cuando no cumplían con la homogeneidad de varianza (Kuehl, 1994). Cuando se evaluó el efecto de los tratamientos en distintas profundidades, el contraste de medias fue realizado dentro de cada profundidad. Finalmente, se aplicó un análisis multivariado (componentes principales) para analizar las principales variables que afectaron el rendimiento y los efectos de los tratamientos. Estos gradientes surgen de la combinación lineal de las siguientes propiedades edáficas: arcilla, limo, arena, materia orgánica, DAP (0-5 cm y 15-20 cm), RP (promedio 0-40 cm), INF, contenido hídrico (0-40 cm), rendimiento y tratamiento (testigo= 1, descompactado= 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto sobre las propiedades edáficas y su perdurabilidad

La tasa de infiltración de agua (INF) a la siembra del maíz fue significativamente mayor en el tratamiento descompactado que en el testigo ($P < 0,05$) (Cuadro 2). La INF promedio para el tratamiento descompactado fue siete veces mayor que la del testigo. También se observó una alta variabilidad (CV%) en las parcelas descompactadas, probablemente debido al efecto localizado del órgano de labranza. Este equipo de labranza produce un área muy alterada en el suelo en el centro del dispositivo de labranza (órgano activo) y menor movimiento del suelo hacia los laterales (Spoor, 2006). De acuerdo con USDA (1999), los valores de INF en el testigo se pueden clasificar como moderados a rápidos, mientras que los valores de INF en las parcelas descompactadas corresponden a rápidos y muy rápidos.

En suelos francos y franco-limosos manejados bajo siembra directa (SD) se ha observado el desarrollo de capas de 4 cm (entre 0 y 9 cm) con estructura laminar, con predominio de poros horizontales (Álvarez *et al.*, 2014) y debajo de ellas, una estructura masiva de mayor densidad (Álvarez *et al.*, 2009; Sasal *et al.*, 2017). La descompactación mecánica de ambas capas mejora la infiltración del agua en el suelo. Esta mejora en la infiltración del suelo aumenta la precipitación efectiva y, por lo tanto, contribuye a una mayor acumulación de agua disponible para el cultivo de maíz en las primeras etapas de crecimiento.

Las diferencias en la INF entre tratamientos se redujeron bastante en el momento de la cosecha del

Cuadro 2. Infiltración (INF) previo a la siembra y a la cosecha del cultivo de maíz y densidad aparente (DAP) a la siembra en superficie y a 15 cm. EE: error estándar, CV: coeficiente de variación.

SITIO	INF a la siembra (mm h ⁻¹)		INF a cosecha (mm h ⁻¹)		DAP superficial (Mg m ⁻³)		DAP a 15 cm (Mg m ⁻³)	
	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado
SE1	28	163	44	115	1,14	1,16	1,33	1,29
SE2	99	1.273	44	81	1,09	1,02	1,30	1,32
SE3	24	455	63	46	1,05	0,98	1,28	1,18
SE4	27	1.108	23	1298	1,23	1,08	1,29	1,2
SE5	187	925	204	378	1,18	1,06	1,38	1,33
SE6	204	2.028	17	399	1,21	1,00	1,18	1,11
SE7	39	449	-	-	1,17	1,12	1,37	1,34
SE8	19	84	-	-	1,28	1,26	1,39	1,46
SE9	92	74	-	-	1,25	1,28	1,43	1,52
SE10	116	239	-	-	1,25	1,19	1,46	1,46
SE11	49	176	-	-	1,32	1,32	1,39	1,42
SE12	86	178	-	-	1,26	1,36	1,45	1,41
Media	81a	596b	66a	386a	1,20a	1,15a	1,35a	1,34a
EE	18	177	28	193	0,03	0,05	0,03	0,05
CV (%)	78	103	106	122	6,6	11,3	6,0	9,4

Letras distintas significan diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada fecha ($P < 0,05$). - indica que no se determinó.

maíz. El valor medio en el testigo fue 66 ± 28 mm h⁻¹ y en el descompactado, 386 ± 193 mm h⁻¹ ($P = 0,16$; Cuadro 2). Esto muestra una baja perdurabilidad de la práctica de labranza sobre la INF. Esta perdurabilidad de corto plazo indicaría que la labranza produce una macroporosidad inestable, generándose una rápida reorganización de los agregados del suelo. La DAP mostró baja sensibilidad a los efectos del tratamiento de labranza y no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos ya sea en 0-5 cm ($P = 0,06$; $n = 12$) o en 15-20 cm ($P = 0,33$; $n = 12$) (Cuadro 2). Estos hallazgos concuerdan con otros estudios de investigación de campo realizados bajo condiciones de tráfico crecientes (Botta *et al.*, 2004; 2005) y también con estudios sobre labranza profunda (Carter *et al.*, 1996). Los valores de DAP en el testigo de 0-5 cm estuvieron en el rango de 1,05 a 1,32 Mg m⁻³ mientras que de 15-20 cm los valores variaron de 1,18 a 1,46 Mg m⁻³, que son 12,5% más altos que en la medición de 0-5 cm (Cuadro 2). La DAP puede utilizarse como indicador de compactación y para caracterizar las eventuales restricciones en el crecimiento de las raíces (Soil Quality Institute, 1999). El valor crítico de DAP donde el crecimiento de las raíces puede verse afectado depende de la textura del suelo. Para los suelos estudiados, según la orientación del Soil Quality Institute (1999), el este valor sería de 1,55 Mg m⁻³ y según Pilatti y Orellana (2000), quienes trabajaron

en la misma región estudiada, el umbral estaría en el rango de 1,36 a 1,42 Mg m⁻³. En el presente trabajo, los valores de DAP del testigo fueron inferiores a los propuestos por el Soil Quality Institute (1999). Además, ningún valor de DAP fue superior al propuesto por el modelo de Pilatti y Orellana (2000) para las medidas de 0-5 cm, mientras que seis sitios mostraron valores de DAP más altos para la capa de 15-20 cm (SE 7 a SE12).

Los valores de resistencia a la penetración del suelo (RP) deben considerarse junto con el contenido de agua del suelo, debido a la relación inversa que existe entre estas propiedades. No se observaron diferencias en el contenido de agua del suelo entre tratamientos para cualquier sitio y momento de medición ($P > 0,05$), lo cual permite comparar la RP de los tratamientos (Cuadro 3). A la siembra, la humedad promedio de 0-40 cm fue de 24% en el testigo y de 23,5% en el tratamiento descompactado. La RP fue bastante sensible al efecto de la labranza profunda, mostrando una fuerte reducción a la siembra (Cuadro 3). Además, la RP en el tratamiento descompactado fue 40 y 20% menor que la del testigo, para los 0-20 cm y 20-40 cm, respectivamente. La diferencia entre tratamientos se mantuvo hasta la cosecha (Cuadro 3; humedad a capacidad de campo). La implicancia agronómica de los valores de RP observados en el perfil del suelo debe evaluarse en el contexto de los valores críticos definidos en la literatura. Estos

umbrales varían de 1,5 MPa (50% de reducción en el crecimiento de la raíz) a 3 MPa (cese del crecimiento de la raíz) y 2-4 MPa para penetrómetros de cono de 30° y 60°, respectivamente. Los valores promedio de RP fueron más bajos que los niveles críticos máximos. Teniendo en cuenta que los contenidos de agua del suelo correspondían a capacidad de campo en todos los sitios y profundidades, estos resultados indicarían que, en condiciones más secas, los valores de RP sobrepasarían los niveles críticos máximos (Gupta y Allmaras, 1987; Glinski y Lipec, 1990).

En tres sitios (SE8, SE11 y SE12) se evaluó la RP en la siembra del siguiente cultivo, ya sea soja de primera o segunda (Cuadro 3). En ese momento, un año después de la labranza profunda, no sólo no se observaron diferencias entre tratamientos, sino que el tratamiento descompactado presentó una RP levemente superior al control de 0-5 cm (Cuadro 3). Las humedades promedio de 0-40 cm fueron menores que en las evaluaciones anteriores (17 a 22%). Cabe señalar que esta evaluación se realizó en sólo tres sitios donde se aplicó labranza profunda en 2006. Los valores altos de RP en el tratamiento descompactado en el cultivo posterior en la rotación pueden estar relacionados con la menor capacidad del suelo para recibir tensiones de compactación adicionales, menor capacidad portante (Hamza y Anderson, 2003; Botta *et al.*, 2004). El tiempo de recompactación depende del manejo del suelo después de la labranza profunda (Botta *et al.*, 2005; Spoor, 2006). Como se mencionó anteriormente, los efectos de la labranza profunda se detectaron incluso hasta cerca de la época de la cosecha del maíz.

Además, se presentó una condición particularmente

lluviosa en la época de la cosecha del maíz (marzo) (250 mm). Esta condición de baja capacidad portante, sumada a un contexto de tráfico intensivo de maquinaria no ordenado en la cosecha de maíz, podría explicar el bajo efecto residual del tratamiento de labranza profunda.

Efecto sobre el rendimiento de maíz y efecto residual sobre los cultivos siguientes

No se detectaron diferencias entre tratamientos en la radiación interceptada por el cultivo en floración (Cuadro 4). Los valores estuvieron en el rango de 76 a 94% para el Testigo y 72 a 96% para el tratamiento descompactado. Por otro lado, no se detectó diferencia significativa en el índice de verdor (medidor SPAD) en ninguno de los sitios experimentales (Cuadro 4).

En relación con la abundancia de raíces de maíz se observaron diferencias entre sitios (Figura 1). En dos sitios, se detectó una interacción significativa tratamiento x profundidad (SE1 y SE3). En SE4 y SE5 hubo diferencias significativas entre tratamientos. En el SE4, la abundancia de raíces fue mayor en el tratamiento descompactado que en el testigo y en el SE5 se observó el comportamiento inverso. Finalmente, en los sitios SE2 y SE6, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Para tener una evaluación general de la influencia de la descompactación en el patrón de abundancia de raíces, todos los sitios fueron analizados en su conjunto aplicando una prueba *t* pareada en cada profundidad del suelo. Al hacerlo, sólo se detectaron diferencias en los 0-10 cm, donde la abundancia de raíces fue 7% mayor en el tratamiento descompactado que en el testigo (Figura 2a). Como resultado, se puede deducir una mejora en el acceso a los recursos del suelo (agua, nutrientes) en el tratamiento de labranza debido a esta

Cuadro 3. Media $\pm$ error estándar de la resistencia a la penetración (RP; Mpa) a diferentes profundidades y momentos de muestreo. Siembra Maíz: 12 casos; Cosecha Maíz: 12 casos; Siembra Soja: 3 casos. No se detectaron diferencias significativas en el contenido de humedad del suelo entre tratamientos.

Prof cm	Resistencia a la penetración (MPa)					
	Siembra de maíz		Cosecha de maíz		Siembra de soja	
	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado
0-5	1,92 $\pm$ 0,17 a	1,16 $\pm$ 0,12 b	0,71 $\pm$ 0,14 a	0,37 $\pm$ 0,07 b	0,44 $\pm$ 0,14 a	0,64 $\pm$ 0,15 b
5-10	2,77 $\pm$ 0,17 a	1,66 $\pm$ 0,13 b	1,39 $\pm$ 0,20 a	0,73 $\pm$ 0,10 b	2,11 $\pm$ 0,31 a	2,32 $\pm$ 0,31 a
10-15	3,14 $\pm$ 0,18 a	1,96 $\pm$ 0,11 b	1,72 $\pm$ 0,23 a	0,96 $\pm$ 0,13 b	2,38 $\pm$ 0,35 a	2,62 $\pm$ 0,44 a
15-20	3,47 $\pm$ 0,23 a	2,42 $\pm$ 0,14 b	1,89 $\pm$ 0,28 a	1,18 $\pm$ 0,17 b	2,38 $\pm$ 0,34 a	2,20 $\pm$ 0,11 a
20-25	3,75 $\pm$ 0,28 a	2,84 $\pm$ 0,22 b	1,94 $\pm$ 0,34 a	1,35 $\pm$ 0,22 b	2,24 $\pm$ 0,35 a	2,49 $\pm$ 0,38 a
25-30	4,24 $\pm$ 0,30 a	3,31 $\pm$ 0,30 b	2,07 $\pm$ 0,39 a	1,52 $\pm$ 0,30 b	2,15 $\pm$ 0,24 a	2,46 $\pm$ 0,28 a
30-35	4,96 $\pm$ 0,38 a	4,03 $\pm$ 0,39 b	2,28 $\pm$ 0,47 a	1,85 $\pm$ 0,42 b	2,50 $\pm$ 0,25 a	2,53 $\pm$ 0,47 a
35-40	5,85 $\pm$ 0,50 a	4,99 $\pm$ 0,53 b	2,66 $\pm$ 0,61 a	2,28 $\pm$ 0,54 b	2,21 $\pm$ 0,51 a	2,70 $\pm$ 0,83 a

Prof= profundidad.

Cuadro 4. Media $\pm$ error estándar de la radiación solar interceptada (%) e índice de verdor (SPAD) registrados en la floración de maíz en 6 de los sitios experimentales (SE) para cada tratamiento.

Sitio experimental (SE)	Radiación solar interceptada (%)		Índice Verdor (SPAD)	
	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado
1	93,4 $\pm$ 3,8	95,7 $\pm$ 2,6	58,0 $\pm$ 1,8	58,8 $\pm$ 1,2
2	80,4 $\pm$ 1,9	83,4 $\pm$ 0,7	56,4 $\pm$ 1,9	54,9 $\pm$ 0,7
3	-	-	-	-
4	76,0 $\pm$ 3,7	72,0 $\pm$ 1,7	53,6 $\pm$ 2,8	25,9 $\pm$ 1,1
5	84,8 $\pm$ 1,0	87,6 $\pm$ 5,5	43,4 $\pm$ 2,5	44,7 $\pm$ 1,4
6	94,2 $\pm$ 0,9	92,3 $\pm$ 0,8	49,0 $\pm$ 1,6	48,2 $\pm$ 1,1
ANOVA				
Sitio	P<0,001		P<0,001	
Tratamiento	Ns		Ns	
Sitio x Tratamiento	Ns		Ns	

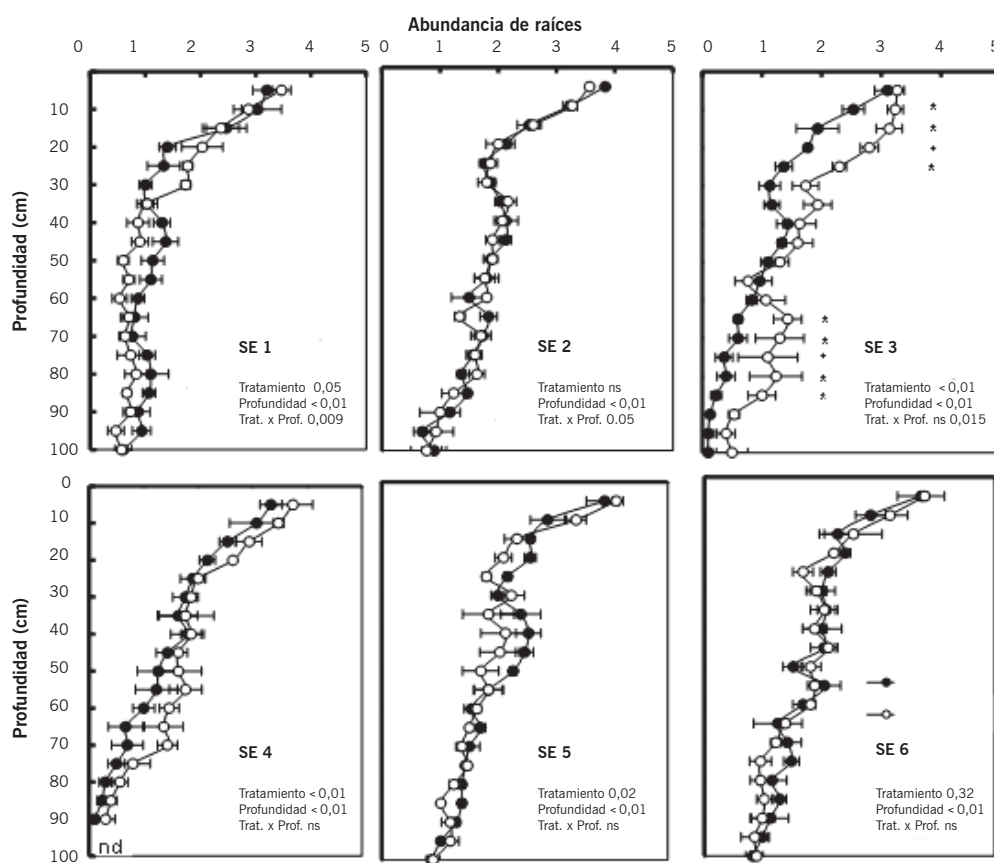


Figura 1. Distribución de la abundancia de raíces en seis sitios experimentales (SE1 al SE6) y tratamientos hasta 1 m de profundidad y 25 cm a cada lado de la planta de maíz (en grillas de 5 cm x 5 cm). La escala va desde 0 (ausencia) hasta 5 (máxima abundancia). Nd: dato no disponible. Las barras horizontales indican error estándar. Descomp= pasaje de labranza profunda sin inversión.

mayor abundancia de raíces. Cabe señalar que en todos los casos se detectó alta abundancia de raíces en los 0-10 cm de profundidad del suelo, pero también se observó una fuerte reducción de raíces a medida que aumentaba la profundidad, independientemente de las diferencias en la textura del suelo entre los sitios. El SE4, suelo con un horizonte Bt fuertemente textural (> 45% de arcilla), mostró una rápida re-

ducción en la abundancia de raíces incluso en el tratamiento de labranza profunda.

Se evaluó la abundancia de raíces del siguiente cultivo de soja en tres sitios (SE8, SE11 y SE12) (Figura 2b). Al agrupar los tres sitios, sólo se detectaron diferencias entre los tratamientos (descompactado > testigo) en la capa 5-10 cm. Además, se observó una tendencia de mayor abundancia de raíces en aquellos sitios donde se

a. MAÍZ

b. SOJA

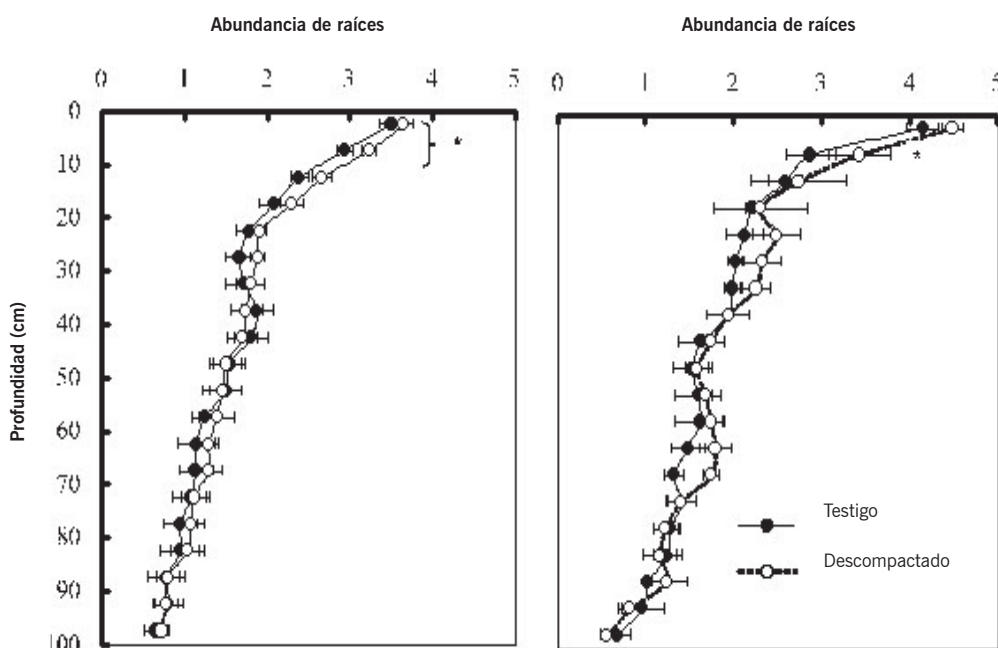


Figura 2. Abundancia media de raíces a distintas profundidades y tratamientos cuantificada (a) a la floración de maíz (SE1 al SE6) y (b) a la floración de soja (en algunos casos, la soja fue sembrada inmediatamente después del trigo, entonces ambos sistemas radicales fueron contabilizados; SE8, SE11 y SE12). La escala va desde 0 (ausencia) hasta 5 (máxima abundancia) utilizando un marco de 50 cm x 100 cm (en grillas de 5 cm x 5 cm). Las barras horizontales indican el error estándar. Las diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) dentro de cada profundidad se indican con *.

realizó un cultivo doble (trigo/soja II), lo que sugiere que el cultivo de trigo sembrado inmediatamente después del maíz pudo aprovechar mejor el efecto residual de la mejora de la labranza. Los valores de abundancia de raíces no copiaron la gran diferencia en RP entre tratamientos (Figura 1). Esto podría estar relacionado con el hecho de que un mayor contenido de agua en el suelo produjo valores de RP adecuados para un buen crecimiento de las raíces. Los resultados de abundancia de raíces obtenidos en soja difirieron de los reportados por Micucci y Taboada (2006) quienes observaron una abundancia de raíces de maíz cercana a cero en suelos con 350 g kg^{-1} de contenido de arcilla. Esto puede deberse a la posibilidad de las raíces de maíz de encontrar grietas y crecer a través de los horizontes fuertemente texturales en forma de cabellera (Taboada y Álvarez, 2008).

En referencia con el rendimiento de maíz, cuando se combinaron los 12 sitios experimentales, se observó que el rendimiento fue significativamente mayor en el tratamiento descompactado respecto del testigo ($P < 0,01$; Cuadro 5). El aumento promedio del rendimiento en grano debido la labranza profunda fue de 754 kg ha^{-1} (6,2%). La diferencia en el rendimiento de grano varió de -328 kg ha^{-1} a 1.896 kg ha^{-1} (-2,9% a 17,9%). En términos generales, las precipitaciones durante el ciclo de maíz fueron mayores que la demanda del mismo, con la excepción de la temporada 2006, donde se produjo una fuerte sequía en la etapa crítica floración (Cuadro 1; lluvias diciembre). Los aumentos de rendimiento

observados en este trabajo concuerdan con aquellos estudios que observaron una mejora en el rendimiento de grano debido a prácticas de descompactación (Botta *et al.*, 2004; Sadras *et al.*, 2005). La mejora de la labranza profunda, a menudo, trae consigo mejoras significativas en los rendimientos en condiciones de estrés hídrico moderado, mientras que el efecto es bastante bajo o inexistente en un contenido de agua del suelo muy bajo o alto (Sadras *et al.*, 2005). Bajo las condiciones experimentales de este estudio, la mejora del rendimiento se puede relacionar con tasas de infiltración más altas, así como con RP más bajas, lo que a su vez aumentó el acceso de los cultivos a recursos claves como agua y nutrientes. De hecho, como se mencionó anteriormente, la abundancia de raíces en los 0-10 cm fue mayor en el tratamiento descompactado que en el testigo, lo que significa una mayor exploración de raíces en el tratamiento de labranza profunda. Los rendimientos de trigo (SE11 y SE12) y soja (SE8, SE11 y SE12) no fueron afectados por la labor realizada en el maíz predecesor (Cuadro 5).

Sólo en el SE4 se observó una respuesta de rendimiento negativa a la descompactación. En este sitio se produjo una condición ambiental particularmente interesante de destacar. En esta localidad, donde se realizaron evaluaciones intermedias (datos no presentados), se observaron excelentes condiciones de crecimiento para el maíz en el tratamiento descompactado en comparación con el testigo. Además, en el tratamiento descompactado, el maíz

Cuadro 5. Rendimiento en materia seca de maíz, trigo y soja para los tratamientos testigo y descompactado, en los distintos sitios experimentales (SE). Se presentan la media, el error estándar (EE) y el valor P de la prueba *t*.

Sitio	Maíz (kg ha ⁻¹)		Trigo (kg ha ⁻¹)		Soja (kg ha ⁻¹)	
	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado
SE1	12.438	13.889	-	-	-	-
SE2	12.807	13.628	-	-	-	-
SE3	10.633	10.717	-	-	-	-
SE4	11.303	10.975	-	-	-	-
SE5	10.591	12.487	-	-	-	-
SE6	14.968	16.672	-	-	-	-
SE7	11.810	12.391	-	-	-	-
SE8	11.614	12.133	-	-	4.826	4.923
SE9	13.143	13.268	-	-	-	-
SE10	12.900	13.200	-	-	-	-
SE11	11.300	12.400	4.022	4.675	3.138	3.448
SE12	12.516	13.313	5.769	6.074	4.425	4.213
Media	12.169	12.922	4.895	5.374	4.129	4.194
EE	356	443	873	699	509	426
P	0,028		0,22		0,71	

alcanzó la etapa de floración tres días antes que en el testigo y en ese momento, la abundancia de raíces también fue mayor en el tratamiento descompactado. En esa campaña, a su vez, tuvo lugar un fuerte evento de sequía en la etapa crítica del maíz (alrededor de floración). Quizás, el mayor consumo de agua antes de floración provocó una menor disponibilidad hídrica en el perfil del suelo al comienzo del período de déficit afectando el rendimiento de grano. Esta situación antes mencionada puede ser de interés para futuras evaluaciones. En los experimentos con repeticiones (SE1 a SE6), donde se analizaron los componentes del rendimiento (datos no mostrados), se observó que el rendimiento de grano se asoció principalmente con el número de granos ($r=0,94$; $P<0,001$) más que con el peso del grano ($r=0,55$; $P<0,001$).

En el análisis de componentes principales se puede observar que en el eje principal (CP 1; Figura 4) (32%) se separan suelos más arenosos (+) y en el sentido opuesto, contenido de arcilla, limo y agua del suelo, y RP (-). El segundo eje (CP 2) (28%) muestra el rendimiento de grano del cultivo de maíz con valores positivos, en la misma dirección que la mejora mecánica (labranza profunda), INF y MOS. Estas variables se oponen a DAP y RP. En otras palabras, los mayores rendimientos

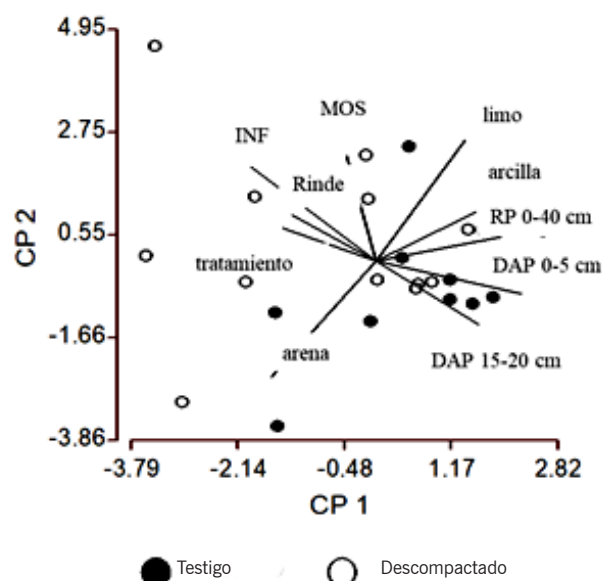


Figura 3. Análisis de componentes principales. Tratamientos: testigo y descompactado; INF: tasa de infiltración; MOS: materia orgánica del suelo 0-20 cm; limo, arcilla y arena: contenido hasta 20 cm; DAP: densidad aparente de 0-50 cm y de 15-20 cm; RP: resistencia a la penetración de 0-40 cm; Rinde: rendimiento del cultivo de maíz. El componente principal 1 (CP 1) explica el 32%; el componente principal 2 (CP 2), un 28%.

de grano se asociaron positivamente con efectos de labranza profunda, INF y MOS y se relacionaron negativamente con DAP y RP. Ambos ejes explican el 60% de las variaciones de los datos.

CONCLUSIONES

La labranza profunda provocó una reducción de la resistencia a la penetración (RP), una mejora de la infiltración (INF), y una mayor abundancia de raíces en los primeros 10 cm de suelo. Esta mayor abundancia aumentó la disponibilidad y accesibilidad a los recursos resultando en un aumento promedio del 6% en el rendimiento en grano del maíz, incluso cuando las condiciones de la campaña eran favorables. La práctica de labranza profunda tuvo un efecto residual, ya que la RP mostró valores más bajos hasta la cosecha del maíz.

Sin embargo, en los tres sitios evaluados a la siembra del siguiente cultivo de verano (soja), no se observaron efectos residuales ni en el suelo ni en las variables del cultivo.

Es muy importante, luego de la labor de descompactación, la realización de prácticas preventivas de la compactación como respetar la capacidad portante del suelo, ordenar el tránsito, disminuir de la presión aplicada o realizar cultivos de cobertura. Estas prácticas permitirían que la labranza profunda sea una práctica eventual y no de rutina.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Bustingorri, C. y Gutiérrez Boem, F. H. (2006). Descompactación de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo*, 24, 1-10.
- Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Gutiérrez Boem, F. H., Bono, A., Fernández, P. L. y Prystupa, P. (2009a). Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73, 1242-1250.
- Álvarez, C. R., Torres Duggan, M., Chamorro, E. R., D'Ambrosio, D. y Taboada, M. A. (2009b). Efectos a corto plazo y residual de la descompactación en suelos franco-limosos en siembra directa cultivados con maíz. *Ciencia del Suelo*, 27, 159-170.
- Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Perelman, S. B. y Morrás, H. J. (2014). Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampas, Argentina. *Soil Res.*, 52, 533-542.
- Álvarez, R. y Steinbach, H. S. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Till. Res.*, 104, 1-15.
- Botta, G. F., Jorajuria, D., Balbuena, R. y Rosatto, H. (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., Ressia, J., Rosatto, H., Tourn, M., Soza, E., Ferrero, C. y Stadler, S. (2005). Efectos de la labranza vertical sobre el suelo y el rendimiento del cultivo de girasol (*Helianthus annus* L.). *Agro-Ciencia*, 21(2), 5-12.
- Brihet, J., Gayo, S. y Regeiro, D. (2020). Brechas tecnológicas en maíz. *Informe ReTAAnro 38, Bolsa de Cereales, Buenos Aires*, pp. 7.
- Burke, W., Gabriels, D. y Bouma, J. (1986). Soil structure assessment. A. A. Balkema. Rotterdam, 92 pp.
- Carter, M. R., Holmstrom, D. A., Cocharne, L. M., Breton, P. C., van Roestel, J. A., Langille, D. R. y Thomas, W. G. (1996). Persistence of deep loosening of naturally compacted subsoils in Nova Scotia. *Canadian Journal of Soil Science*, 76, 541-547.
- 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.
- Gee, G. W. y Or, D. (2002). Particle-Size Analysis. En: J. H., Dane, y G. C., Topp, (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods* (pp. 255-293). Madison, Wisconsin, Estados Unidos: Soil Science Society of America Inc.
- Gibbs, R. J. y Reid, J. B. (1988). A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, 8, 123-149.
- Glinski, J. y Lipiec, J. (1990). *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press Inc, 250 pp.
- Grossman, R.B. y Reinsch, T.G. (2002). Bulk Density and Linear Extensibility. En: J., Dane, y G. C. Top (Eds.). *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods* (pp. 201-228). Madison, Wisconsin, Estados Unidos: SSSA Book.
- Guecaimburú, J. M., Introcaso, R., Vázquez, J. M., Rojo, V. y Reposo, G. (2014). Persistence of soil loosening with bent leg subsoilers in no tillage systems. *Chilean J. Agric. Anim. Sci.*, 30(2), 109-115. Recuperado de: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143326675>
- Gupta, S. C. y Allmaras, R. R. (1987). Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6, 65-100.
- Hakansson, I. y Lipiec, J. A. (2000). Review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res*, 53, 77-85.
- Hamza, M. A. y Anderson, W. K. (2003). Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.*, 54, 273-282.
- Kassam, A., Friedrich, T. y Derpsch, R. (2019). Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76, 29-51.
- Kuehl, R. O. (1994). Diagnosing agreement between the data and the model. En: *Statistical Principles of Research Design and Analysis*. California, Estados Unidos: Duxbury Press, Capítulo 4, pp. 108-128.
- Lowery, B. y Morrison, J.E. Jr. (2002). Soil penetrometers and penetrability. En: J. H., Dane y G. C., Topp (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods* (363-388). Madison, Wisconsin, Estados Unidos: Soil Science Society of America Inc.
- Maddonni, G. A. (2012). Analysis of climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina-a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.*, 107: 325-345.

- Manichon, H. (1987). Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. En: G., Monnier, y M. J., Goss (Eds.). *Soil Compaction and Regeneration* (pp. 145-155). Rotterdam, Boston: A.A. Balkema.
- Micucci, F. G. y Taboada, M. A. (2006). Soil physical properties and soybean (*Glycine max* Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.*, 86, 152-162.
- Mon, R. (2008). Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda cálcica profunda. Tesis doctoral. Universidade da Coruña, España. 163pp. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/2183/1175>
- Morris, N. L., Miller, P. C. R., Orson, J. H. y Froud-Williams, R. J. (2010). The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment. A review. *Soil and Tillage Research*, 108, 1-15.
- Peiretti, R. y Dumanski, J. (2014). The transformation of agriculture in Argentina through soil conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(1), 14-20.
- Pilatti, M. A. y de Orellana J. A. (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.
- Rubio, G., Pereira, F. X. y Taboada, M. A. (2019). Soils of the Pampean Region. En: G., Rubio, R. S., Lavado y F. X., Pereyra (Eds.). *The Soils of Argentina. World Soils Book Series*. Springer International Publishing AG, pp. 81-100.
- Sadras, V.O. y Calviño, P.A. (2001). Quantification of grain yield response topsoil depth in soybean, maize, sunflower and wheat. *Agron. J.*, 93(3), 577-583.
- Sadrás, V. O., Ferreiro, M., Gutheim, F. y Kantolic, A. G. (2002). Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. En: F. H., Andrade, y V. O., Sadras (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (25-56). 2ª ed. INTA-E.E.A. Balcarce, Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, Balcarce, Argentina.
- Sadras, V. O., O'Leary, G. J. y Roget, D. K. (2005). Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.*, 91, 131-148.
- Sasal, M. C., Boizard, H., Andriulo, A. A., Wilson, M. C. y Léonard, J. (2017). Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil Tillage Res.*, 173, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.014>.
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O. y Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil Till. Res.*, 174, 193-204.
- Soil Quality Institute. (2011). Soil quality test kit guide. Recuperado en: <http://ocw.tufts.edu/data/32/383298.pdf>
- Spoor, G. (2006). Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use Manag.*, 22(2), 113-122. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00015.x>
- Taboada, M. A., Barbosa, O. A., Rodríguez, M. B. y Cosentino, D. J. (2004). Mechanisms of aggregation in a silty loam soil under different simulated management regimes. *Geoderma*, 123, 233-244.
- Taboada, M. A. y Álvarez C. R. (2008). Root abundance of maize (*Zea mays* L.) in conventionally-tilled and zero-tilled soils of Argentina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 769-779.
- USDA (1999). Soil Quality Test Kit Guide. USDA-ARS- NRCS-Soil Quality Institute, p. 88.
- Walkley, A. y Black, C. A. (1965). Organic carbon. Chapter 4. En: C. A., Black (Ed.). *Method of soil analysis*. Wisconsin, Estados Unidos: American Society of Agronomy, pp. 1372-1375.