

PROPIEDADES EDÁFICAS SUPERFICIALES EN SISTEMAS DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN EN LA REGIÓN PAMPEANA SEMIÁRIDA SUR

ERICA SUSANA SCHMIDT^{1*} & NILDA MABEL AMIOTTI¹⁻²

Recibido: 14-10-14

Recibido con revisiones: 14-03-15

Aceptado: 14-03-15

RESUMEN

La agriculturización y la aplicación de labranzas agresivas impactaron negativamente sobre el ambiente y el suelo provocando una pérdida de su calidad. En la exploración de opciones para mitigar o revertir los procesos generados, surgen las prácticas de agricultura de conservación (AC). En este contexto, la siembra directa (SD) se expandió desde la Pampa Húmeda hacia la región semiárida sur reemplazando a otros sistemas de labranza, tanto convencionales como conservacionistas. Aquí, el impacto de la SD sobre la magnitud y dirección de los cambios de las propiedades dinámicas de los suelos no está claramente dilucidado. Se propuso como objetivo determinar los efectos de dos sistemas de AC (SD y labranza reducida, LR) sobre los contenidos de carbono orgánico total (COT) y algunas propiedades físicas asociadas en el horizonte superficial (epipedón) de Paleustoles petrocálcicos. Se tomaron muestras al azar en lotes en producción a tres profundidades diferenciales: 0-5, 5-10 y 10-18 cm, con la finalidad de detectar estratificaciones en los parámetros evaluados. Las determinaciones analíticas incluyeron COT, densidad aparente (Dap), porosidad total (Pt) y distribución por tamaño de poros, diferenciando macroporos (MP), mesoporos (mP) y microporos (μ P). A campo, se midió la resistencia a la penetración (RP) y se utilizó el programa InfoStat para el análisis estadístico de los datos obtenidos (N=30). El contraste con LR mostró que SD produjo un desmejoramiento de la condición física del epipedón manifestada por incrementos de la Dap y de la RP y disminuciones de la Pt y del volumen de MP. Las diferencias entre tratamientos fueron particularmente manifiestas por debajo de los 5 cm. Tal como se la ha operado en la región, la SD continua no contribuyó al mejoramiento de las propiedades físicas ni a incrementar el stock de COT en el epipedón en el mediano-largo plazo respecto de LR.

Palabras clave. Siembra directa, labranza reducida, carbono orgánico total, propiedades físicas.

SURFACE SOIL PROPERTIES UNDER CONTRASTING CONSERVATION TILLAGE SYSTEMS IN THE SEMIARID PAMPEAN REGION

ABSTRACT

Agriculturization and intense soil cultivation causes soil erosion and impacts negatively on chemical and physical soil quality parameters. Conservation Agricultural (AC) practices could mitigate or reverse these processes. No-tillage (SD) extends from the Humid Pampa to the southern semiarid region replacing other conventional and conservation tillage systems. The impact of SD on the magnitude and direction of changes in the dynamic properties of soils is not clearly elucidated. Our objective was to determine and compare the effects of two AC systems (SD and reduced tillage, LR) on the content of total organic carbon (COT) and some associated physical properties in the surface horizon (epipedon) of Petrocalcic Paleustoles. Random samples were taken in production plots at three depths: 0-5, 5-10 and 10-18 cm, with the aim of detecting stratifications in the evaluated parameters. Laboratory tests included COT, bulk density (Dap), total porosity (Pt) and pore size distribution, differentiating macropores (MP), mesopores (mP) and micropores (μ P). Penetration resistance (RP) was measured at field conditions and the InfoStat program was used for statistical analysis of the data (N = 30). Compared to LR, SD showed a decline in the physical condition of the epipedon expressed by increases in Dap and RP, and decreases in the volume of Pt and MP. Differences between treatments were particularly evident below 5 cm. Continuous SD, the current management practice in the region, did not contribute to improve the physical properties or to increase the COT stock in the epipedon in the medium to long term compared to LR.

Key words. No-till, reduced tillage, total organic carbon, physical properties.

¹ Departamento de Agronomía - Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca.

¹⁻² CERZOS-CONICET.

* Autor de contacto: eschmidt@criba.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La agriculturización y el uso de labranzas agresivas en nuestro país han tenido un fuerte impacto sobre el ambiente y el suelo, dando como resultado una pérdida de su calidad (Álvarez *et al.*, 2008; Viglizzo & Jobbágy, 2010). En la región semiárida pampeana, disminuciones en los niveles de carbono orgánico total (COT) del orden del 20-50% (Hall *et al.*, 1992) y alteraciones físicas manifestadas por la pérdida de agregación, con formación de agregados muy pequeños de baja estabilidad, así como la génesis de densipanes, son procesos comunes (Díaz-Zorita & Grosso, 2000; Amiotti *et al.*, 2012).

En la exploración de opciones para mitigar o revertir los procesos desencadenados por la aplicación de manejos inadecuados, surgen las prácticas agronómicas englobadas bajo el nombre de "Agricultura de Conservación" (Hobbs *et al.*, 2008; FAO, 2012). Sus ventajas en cuanto a la reducción de costos y al uso más eficiente del agua determinaron que estos sistemas fueran ampliamente adoptados desde hace más de treinta años en países con grandes superficies de agricultura de secano como la Argentina, Australia, Brasil, Canadá y Uruguay (Derpsch, 2008). En este contexto, la siembra directa (SD) surgió como una alternativa promisorio para la conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la producción agropecuaria, siendo un paquete tecnológico ampliamente promovido y adoptado tanto a nivel mundial (Triplett & Dick, 2008) como en nuestro país, donde alcanzó las 27 millones de hectáreas en la campaña agrícola 2010/2011 (AAPRESID, 2012).

La dinámica de la materia orgánica (MO) en suelos bajo SD ha merecido especial atención tanto por su incidencia en la calidad de los suelos como por su efecto para mitigar las emisiones de CO₂ (Andriulo *et al.*, 2001; Sisti *et al.*, 2004; Strudley *et al.*, 2008). La mayoría de los estudios a largo plazo muestran una influencia significativa de este sistema de labranza sobre los contenidos de MO que redundan en la mejora de la mayoría de las propiedades físicas del suelo (Studdert & Echeverría, 2002; Díaz-Zorita *et al.*, 2004; Aparicio & Costa, 2007). Sin embargo, reportes más recientes contradicen esta tendencia favorable. En particular, la preocupación sobre el impacto negativo de la compactación excesiva se ha visto incrementada en los últimos años en Argentina y en el mundo, en consonancia con la intensificación agrícola y la expansión geográfica de este paquete tecnológico (Taboada *et al.*, 2008; Álvarez *et al.*, 2009).

La literatura señala un incremento de la compactación superficial bajo SD, con disminuciones de la porosidad total (Pt) y aumentos en la densidad aparente (Dap) en la mayoría de los ensayos (Sasal *et al.*, 2006; Mc Vay *et al.*, 2006), e incrementos en la resistencia a la penetración (RP) con respecto a la tierra arada (Álvarez & Steinbach, 2009). Esta mayor densificación del suelo puede presentar problemas para el desarrollo de las raíces de los cultivos (Lattanzi *et al.*, 2004).

En la región pampeana húmeda se ha descrito, además, la presencia de agregados de morfología laminar con predominio de huecos horizontales (Morrás *et al.*, 2004; Sasal *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009; Soracco *et al.*, 2010), lo que conduciría a una disminución de la calidad del recurso, de la productividad y/o de la eficiencia de utilización del agua y nutrientes.

Inicialmente adoptada en la Pampa Húmeda, la SD se expandió hacia la zona subhúmeda y semiárida, donde los agrosistemas se emplazan en regiones más frágiles y por ende presentan menor resistencia al cambio siendo su resiliencia baja. Esta zona está caracterizada por la limitada sustentabilidad de la agricultura, reflejada en la degradación de los suelos y la errática producción de los cultivos particularmente en el verano. Aquí, los cambios de uso de la tierra y la aplicación de paquetes tecnológicos inadecuados han tenido repercusiones negativas sobre la calidad del recurso, agudizando los problemas derivados de las limitaciones climáticas (Amiotti *et al.*, 2012).

Si bien en el sur bonaerense aún es relativamente baja la tasa de adopción de la SD, esta se expande, aumentando gradualmente su importancia como sistema de producción (López *et al.*, 2014) y reemplazando a otros sistemas de laboreo, tanto convencionales como conservacionistas. Al igual que en otras regiones templadas del mundo su difusión se vincula inicialmente a la racionalización del uso de la maquinaria agrícola y los combustibles fósiles; a la potencial optimización del uso del agua en una zona donde el recurso es escaso y al control de los procesos erosivos por el mantenimiento de cobertura vegetal sobre la superficie del suelo y la no remoción de la capa arable (Buschiazzo *et al.*, 1998; Lal *et al.*, 2007; Reicosky, 2008).

Los primeros estudios acerca de los efectos de la aplicación de este sistema de labranza se remontan a la década del 60. Sin embargo las evaluaciones a largo plazo sobre los suelos en la región semiárida son escasas y muestran resultados contradictorios, particularmente en los aspectos

tos referidos a las propiedades físicas que tienen incidencia sobre la dinámica del agua, los nutrientes y el crecimiento radical. En esta zona, el impacto de la SD sobre la magnitud y dirección de los cambios de las propiedades dinámicas de los suelos en el mediano y largo plazo, no está claramente determinado. Esto se atribuye, al menos en parte, a que este sistema es altamente sitio-dependiente lo cual dificulta, además, la extrapolación de la información generada (Strudley *et al.*, 2008).

Dado el creciente interés que ha despertado la aplicación de los sistemas de labranza conservacionistas y la necesidad de generar mayor caudal de información válida para la región pampeana semiárida sur, se considera oportuno profundizar en aquellos tópicos vinculados a evaluar el impacto de su adopción en forma continua. En este contexto, se propuso como objetivo determinar los efectos de dos sistemas de agricultura de conservación (siembra directa y labranza reducida) sobre los contenidos de carbono orgánico total y algunas propiedades físicas asociadas en el epipedón de los suelos de lotes en producción pertenecientes a establecimientos agrícolas de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

La investigación se desarrolló evaluando sistemas reales de modo tal que las tareas se llevaron a cabo sobre lotes en producción pertenecientes a establecimientos agrícolas de la región pampeana semiárida sur ubicados entre los 38°54' S, 61°38' O y los 38°34' S, 61°42' O. El área de estudio se emplaza en la porción media/distal de la llanura subventánica occidental. El relieve es plano suavemente ondulado con un gradiente general inferior al 0,1% (González Uriarte, 2010). El clima es subhúmedo seco, mesotermal, con una precipitación media anual para las estaciones meteorológicas más cercanas al área bajo estudio de 580 mm (Bahía Blanca, serie histórica 1900-

2009) y 604 mm (Cabildo, serie histórica 1904-2009) (Scian, 2010). Los suelos comparados evolucionan a partir de loess y clasifican como Paleustoles petrocálcicos franco finos, mixtos, térmicos (Soil Survey Staff – USDA, 2010) con secuencia de horizontes del tipo A–AC–C–Ck–2 Ckm. Como característica particular, los suelos de los lotes estudiados, al igual que muchos otros de la región, presentan texturas superficiales franco arenosas producto de pulsos de erosión/deposición de materiales asociados a eventos erosivos provocados por los fuertes vientos típicos de la región. En la Tabla 1, se muestran algunas características del epipedón bajo los tratamientos comparados (SD y LR).

Los suelos estudiados evolucionan bajo un mismo clima, ocupan semejante posición en el paisaje y poseen similares características texturales y secuencias de cultivos, lo que convalida la comparación y permite atribuir las diferencias observadas en las propiedades superficiales a los distintos sistemas de manejo a los que están sometidos.

Tratamientos

Se trabajó sobre campos en producción bajo LR y SD continua por quince años con las secuencias agrícolas comúnmente utilizadas en la región, las que incluyen cultivos invernales (trigo o cebada) y estivales (principalmente girasol). En los lotes bajo SD se realizan controles químicos con glifosato y se utilizan herbicidas selectivos al instalarse los cultivos. Las labores en la LR incluyen dos pasadas de rastra de discos y la utilización de cincel o paratill para evitar la formación de pisos de arado o su remoción. Este sistema fue considerado conservacionista pues la cobertura resultó mayor al 30% en los lotes estudiados (Lal, 2003).

Muestreo y determinaciones analíticas

Para cada uno de los tratamientos seleccionados se tomaron muestras disturbadas compuestas por 25 submuestras y no disturbadas a profundidades preestablecidas de 0-5, 5-10 y 10-18 cm con la finalidad de detectar posibles estratificaciones en los parámetros evaluados. Se seleccionó la profundidad 0-18 cm pues este es el espesor estipulado por la taxonomía ame-

Tabla 1. Características texturales y algunas constantes hídricas de los epipedones (0-18 cm) bajo siembra directa (SD) y labranza reducida (LR).

Table 1. Texture and soil moisture constants of epipedons (0-18 cm) under no-till (SD) and reduced tillage (LR).

Tratamiento	Arcilla (g kg ⁻¹)	Limo (g kg ⁻¹)	Arena (g kg ⁻¹)	Capacidad de campo (%v/v)	Punto de marchitez permanente (% v/v)
SD	171	205	624	21,5	10,6
LR	178	217	605	22,5	11,0

ricana (Soil Survey Staff -USDA, 2010) para clasificar al horizonte superficial de los suelos estudiados como epipedón mólico. Se utilizó un diseño aleatorizado con cinco réplicas por profundidad a comienzos del otoño.

Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas por 2000 μm . Se determinaron los contenidos de COT por el método de Walkey & Black (Nelson & Sommers, 1996) y a partir de la densidad aparente se transformaron los valores de concentración de COT a Mg ha^{-1} . La literatura señala que en los muestreos realizados a profundidades fijas habría una sobreestimación de los contenidos de COT como consecuencia de la mayor Dap del suelo reportada bajo SD (Steinbach & Álvarez, 2005), por lo que también se realizó una corrección en este sistema por masa equivalente de suelo (Neill *et al.*, 1997; Álvarez *et al.*, 2014). De esta manera, el cálculo del stock de COT bajo SD se realizó considerando la profundidad donde la masa de suelo es la misma que en el sistema de referencia (LR). Se efectuaron, además, las determinaciones de Dap por el método del núcleo (Blake & Hartge, 1986), Pt (Danielson & Sutherland, 1986) y distribución por tamaño de los poros del suelo, empleándose la clasificación de Kay & Vanden Bygaart (2002) que divide los poros en base a sus diferencias funcionales. Se tomaron tres clases de poros: de transmisión ($>9 \mu\text{m}$, macroporos, MP) calculados a partir de los contenidos volumétricos de agua a potenciales de 0 y -33 kPa; de almacenamiento (mesoporos, mP) calculados a partir de los contenidos volumétricos de agua a potenciales de -33 y -1500 kPa, y microporos (μP , $<0,2 \mu\text{m}$) calculados a partir del contenido volumétrico de agua a -1500 kPa. A campo, se realizaron mediciones de RP y humedad del suelo en dos fechas (marzo y no-

viembre). Las características del penetrómetro de golpe utilizado son: peso del martillo: 1,19 kg; peso del resto del penetrómetro: 2,24 kg; altura de caída del martillo: 98 cm; superficie del cono: 4,27 cm^2 ; ángulo del ápice del cono: 30°; radio de la base del cono: 0,98 cm; altura del cono: 0,98 cm.

Análisis estadístico

El análisis de datos incluyó técnicas descriptivas (parámetros de centralización y dispersión). Se aplicó el procedimiento modelos lineales generales y mixtos del programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013), utilizando la profundidad de muestreo, los tratamientos y su interacción como factores fijos. Se consideró una estructura de la covarianza autorregresiva, ya que las correlaciones entre las distintas profundidades disminuyen con la distancia (Balzarini *et al.*, 2008). Para afirmar la inexistencia de interacción se consideró un valor de $p > 0,05$. En la comparación de los valores medios de cada variable bajo SD y LR se utilizó la prueba DMS protegida de Fisher ($p < 0,05$). Para la interpretación de resultados, en el análisis de datos también se calcularon coeficientes de correlación (Pearson) entre las variables Dap, Pt, MP y RP.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el análisis estadístico de la Dap muestran una interacción significativa ($p = 0,008$) entre los sistemas de labranza y la profundidad (Tabla 2). No se aprecian diferencias entre SD y LR en la capa 0-5, zona

Tabla 2. Valores medios de densidad aparente (Dap) y carbono orgánico total (COT) bajo siembra directa (SD) y labranza reducida (LR).

Table 2. Mean values of bulk density (Dap) and total organic carbon (COT) under no-till (SD) and reduced tillage (LR).

Profundidad (cm)	Tratamiento	Dap (Mg m^{-3})	COT (g kg^{-1})	COT (Mg ha^{-1})
0-5	SD	1,34 \pm 0,02 Aa	14,1 \pm 0,6 Ab	9,4 \pm 0,4 Aa
	LR	1,30 \pm 0,02 Aa	19,1 \pm 0,6 Bc	12,4 \pm 0,4 Bb
5-10	SD	1,48 \pm 0,01 Bb	12,9 \pm 0,5 Aab	9,6 \pm 0,4 Aa
	LR	1,38 \pm 0,01 Ab	14,4 \pm 0,5 Bb	9,9 \pm 0,4 Aa
10-18	SD	1,48 \pm 0,02 Bb	12,1 \pm 0,4 Aa	14,4 \pm 0,5 Ab
	LR	1,31 \pm 0,02 Aa	13,1 \pm 0,4 Ba	13,7 \pm 0,5 Ac
0-18	SD	---	---	33,4*
	LR	---	---	36,0*
<i>p</i> -valor interacción		0,008	0,0005	0,0002

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada profundidad ($p < 0,05$) y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre profundidades dentro de un mismo tratamiento ($p < 0,05$). *: Stock de carbono orgánico total para el horizonte superficial de los suelos (0-18 cm).

Mean values followed by capital letters indicate significant differences between treatments for each depth ($p < 0,05$) and mean values followed by lowercase letters indicate significant differences between depths for each treatment ($p < 0,05$). *: Total organic carbon for surface soil horizon (0-18 cm).

de mayor desarrollo radicular, y si se detectan incrementos significativos ($p < 0,05$) bajo SD en las profundidades de 5-10 cm y 10-18 cm. Las diferencias obtenidas para 5-10 cm pueden ser atribuidas a los sistemas de labranza contrastados (Pidgeon & Soane, 1977). La compresión vertical por el tránsito y la no inversión de la gleba produce en los suelos bajo SD densificaciones, particularmente en esta porción del perfil. Las diferencias observadas a la profundidad 10-18 cm (13%) son tomadas como indicio de la persistencia de plowpanes bajo este último sistema de labranza, a pesar del tiempo transcurrido desde su implementación.

En el análisis de la Pt (Tabla 3) se encontraron evidencias suficientes para determinar la existencia de interacción entre los factores evaluados ($p = 0,004$). No se detectaron diferencias en la capa superficial de los suelos (0-5 cm) entre tratamientos, mientras que la Pt en SD disminuyó significativamente ($p < 0,05$) respecto a LR en las capas de 5-10 cm (37,4% vs 44,7%) y 10-18 cm (40,3% vs 48,3%). En ambos tratamientos los menores valores en su medición se registraron en la capa de 5-10 cm, y en SD también resultó baja la Pt en la profundidad 10-18 cm ($p < 0,05$) respecto a los 0-5 cm.

La Pt se halla conformada por poros de distinto tamaño que responden de manera diferente al impacto de los distintos sistemas de labranza (Iglesias *et al.*, 2007). En el análisis estadístico de los valores obtenidos para los tamaños de poros determinados (Tabla 3), no se detectó

interacción entre el manejo y la profundidad para mP y μP ($p > 0,05$). En cambio la interacción fue significativa en el caso de los MP ($p = 0,0002$). El volumen ocupado por los poros de mayor tamaño en SD resultó inferior al obtenido bajo LR en todas las profundidades de muestreo, sin embargo, esta pérdida de espacios vinculados a la porosidad de aireación sólo resultó estadísticamente significativa en las capas 5-10 cm y 10-18 cm ($p < 0,05$) con disminuciones relativas del orden del 35% y 37%, respectivamente. En el horizonte superficial de los suelos bajo SD se observó un incremento significativo ($p < 0,05$) del volumen ocupado por los mP y no se registraron diferencias ($p > 0,05$) entre ambos sistemas de labranza en la medición de la microporosidad (Tabla 3).

Respecto al efecto del factor profundidad, en SD se detectó una mayor macroporosidad en superficie con respecto a las capas de 5-10 y 10-18 cm ($p < 0,05$). En cambio, en LR los MP fueron más elevados en los 10-18 cm con respecto a los primeros 10 cm ($p < 0,05$). En el caso de los mP no se encontraron diferencias asociadas a la profundidad de muestreo (0-5 cm: 12,0%; 5-10 cm: 11,1%; 10-18 cm: 11,0%) mientras que en ambos sistemas de labranza los μP resultaron más bajos ($p < 0,05$) en la capa de 0-5 cm (10,1%) en comparación con las capas subyacentes (11,2% y 11,0% para 5-10 cm y 10-18 cm, respectivamente).

Dado que está ampliamente documentado que el contenido de agua influye directamente sobre los valores

Tabla 3. Valores medios de porosidad total (Pt) y distribución por tamaño de los poros (macroporos: MP; mesoporos: mP y microporos: μP) bajo siembra directa (SD) y labranza reducida (LR).

Table 3. Mean values of total porosity (Pt) and pore size distribution (macropores: MP; mesopores: mP and micropores: μP) under no-till (SD) and reduced tillage (LR).

Prof. (cm)	Tratamiento	Pt	MP	mP	μP
		%			
0-5	SD	46,1±1,4 Ac	23,4±1,2 Ac	12,8	10,0
	LR	46,6±1,4 Ab	25,0±1,2 Aa	11,3	10,3
5-10	SD	37,4±0,3 Aa	14,8±0,4 Aa	11,3	11,4
	LR	44,7±0,3 Ba	22,8±0,4 Ba	10,9	11,0
10-18	SD	40,3±0,6 Ab	17,2±0,6 Ab	11,6	11,4
	LR	48,3±0,6 Bb	27,3±0,6 Bb	10,3	10,6
0-18	SD	---	---	12,0±0,3 B	10,9±0,2 A
	LR	---	---	10,8±0,3 A	10,6±0,2 A
<i>p</i> -valor interacción		0,004	0,0002	0,26	0,28

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre profundidades dentro de un mismo tratamiento ($p < 0,05$).

Mean values followed by capital letters indicate significant differences between treatments for each depth ($p < 0,05$) and mean values followed by lowercase letters indicate significant differences between depths for each treatment ($p < 0,05$).

que alcanza la RP se determinó la humedad gravimétrica de los suelos al momento del muestreo, la que se utilizó como covariada en el análisis estadístico de la RP. En las mediciones efectuadas a comienzos del otoño (marzo) los suelos presentaban contenidos hídricos superiores a capacidad de campo (25%-29%v/v), por lo que los resultados obtenidos muestran el comportamiento de las capas más superficiales del suelo en estado mojado (Fig. 1a). En estas condiciones, no se detectó interacción significativa entre tratamientos y profundidad de muestreo en el análisis de la RP ($p=0,55$), ni influencia de la humedad gravimétrica ($p=0,82$). En cambio, el efecto de ambos factores evaluados de forma independiente resultó significativo, registrándose incrementos ($p=0,0003$) en la RP del epipedón de los suelos bajo SD ($0,41\pm 0,03$ MPa) en relación a LR ($0,28\pm 0,03$ MPa).

Con respecto a la profundidad, ambos tratamientos se comportaron de igual manera, presentando la capa 0-5 cm ($0,25\pm 0,04$ MPa) una menor impedancia mecánica en comparación a 5-10 cm ($0,38\pm 0,04$ MPa) y 10-18 cm ($0,39\pm 0,03$ MPa), las que no se diferenciaron entre sí ($p<0,0001$).

Mediciones efectuadas con contenidos hídricos del 5%-10%v/v, los que resultaron cercanos o levemente inferiores al punto de marchitez permanente, mostraron muy altos valores de RP (Fig. 1b). Bajo estas condiciones de suelo seco no se observó efecto de la humedad ($p>0,75$) y si se detectó una interacción significativa entre los factores tratamiento y profundidad de muestreo ($p=0,02$). En superficie, la SD ($6,0\pm 0,05$ MPa) presentó un índice de cono que duplicó al observado en LR ($3,0\pm 0,05$ MPa), mientras que

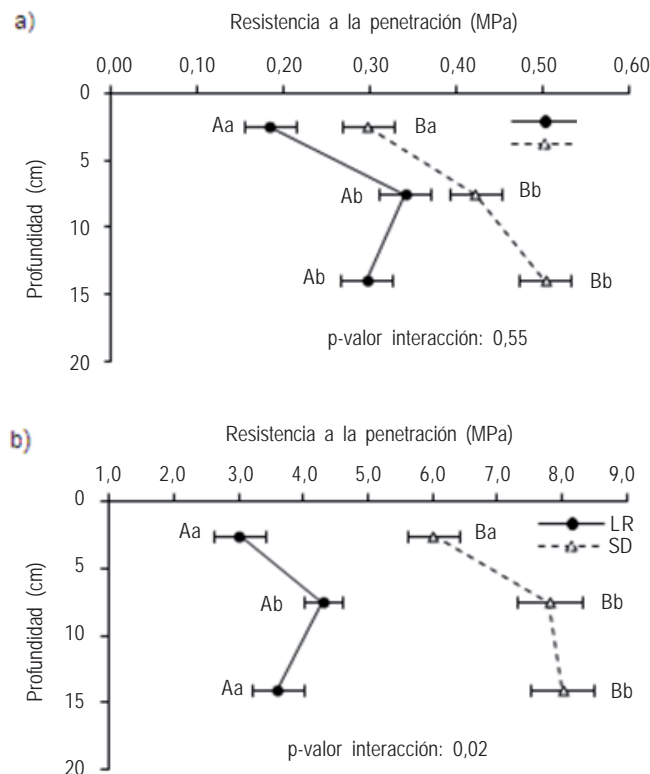


Figura 1. Evolución de la resistencia a la penetración (RP) con la profundidad bajo siembra directa (SD) y labranza reducida (LR) en condiciones de suelo húmedo (a) y seco (b).

Figure 1. Evolution of resistance to penetration (RP) with depth under no-till (SD) and reduced tillage (LR) in wet (a) and dry (b) soil conditions.

Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada profundidad ($p<0,05$) y letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre profundidades dentro de un mismo tratamiento ($p<0,05$).

Mean values followed by capital letters indicate significant differences between treatments for each depth ($p<0,05$) and mean values followed by lowercase letters indicate significant differences between depths for each treatment ($p<0,05$).

para la profundidad de 5-10 cm el valor detectado fue 1,8 veces superior en SD ($7,8 \pm 0,04$ MPa) respecto a LR ($4,3 \pm 0,03$ MPa). A mayor profundidad las diferencias entre tratamientos resultaron más marcadas, alcanzando la SD una RP de $8,0 \pm 0,02$ MPa, en comparación con los $3,6 \pm 0,03$ MPa registrados bajo LR. En ambos sistemas de labranza también se detectó un efecto significativo ($p < 0,05$) del factor profundidad sobre esta variable. Bajo SD se observó un aumento de la misma por debajo de los 5 cm respecto de la capa más superficial mientras que en LR, la profundidad 5-10 cm fue la que presentó una mayor RP en comparación con 0-5 cm y 10-18 cm, las que no presentaron diferencias entre sí.

El análisis estadístico del COT mostró una interacción significativa entre tratamientos y profundidad de muestreo (Tabla 2). Los resultados obtenidos indican la existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) en los contenidos de COT en la capa 0-5 cm entre sistemas de labranza. Los valores registrados para esta variable en SD ($14,1 \text{ g kg}^{-1} - 9,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) fueron un 25% más bajos que los hallados en LR ($19,1 \text{ g kg}^{-1} - 12,4 \text{ Mg ha}^{-1}$). También se encontraron diferencias ($p < 0,05$) en el COT expresado en g kg^{-1} para las capas de 5-10 cm y 10-18 cm, resultando sus contenidos en SD entre 8% y 10% más bajos respecto a la LR. El análisis de la distribución de los contenidos de COT en ambos tratamientos, muestra una estratificación dentro del horizonte superficial con los mayores valores en superficie (g kg^{-1}) aunque ésta resultó más marcada en LR.

Los stocks para los epipedones de ambos tratamientos se calcularon para el muestreo realizado a profundidades fijas (LR: $36,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, SD: $33,4 \text{ Mg ha}^{-1}$), y con la corrección en SD por masa equivalente de suelo ($31,0 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Al analizar la distribución vertical del COT en Mg ha^{-1} , se observa que los mayores contenidos tanto en LR como en SD se detectan en los 10-18 cm respecto a 0-5 cm y 5-10 cm. Esto está asociado al mayor espesor de suelo considerado, a lo que se le adiciona en SD, la densificación registrada en esa profundidad.

DISCUSIÓN

El contraste de los sistemas de labranza conservacionista evaluados indica un desmejoramiento de la condición física del epipedón bajo SD respecto de la LR, producto de la compresión ejercida por el tránsito en los lotes sin remoción. Las diferencias entre ambos tratamientos fueron significativas por debajo de los 5 cm superficiales, detectándose un incre-

mento de la Dap bajo SD acompañado por una disminución de la Pt del orden del 16% para la profundidad 5-10 cm, y del 17% para la capa 10-18 cm. La relación entre ambas variables resultó significativa en el horizonte superficial de los suelos en dicho sistema de labranza ($r: -0,86; p < 0,0001; N: 15$). Si bien existe información con resultados dispares respecto al comportamiento de la Dap bajo SD, procesos de compactación similares a los descritos fueron comunicados, entre otros, por Quiroga *et al.* (1996) y Álvarez & Steinbach (2009) para suelos de la región pampeana semiárida y húmeda, respectivamente. Otros autores, por el contrario, citan que no existen diferencias en los valores de Dap y Pt al contrastar la SD con otros sistemas de labranza que incluyen el laboreo del suelo (Strudley *et al.*, 2008).

Rasmussen & Arshad (1999) y Amiotti *et al.* (2012) señalan que los cambios causados por la compactación en los suelos están caracterizados por un incremento en los poros de tamaño $< 9 \text{ um}$, en detrimento de los MP. En concordancia con estos autores se detectó que la disminución del espacio poral en SD ocurre principalmente a expensas de la macroporosidad ($r: 0,98, p < 0,0001, N: 15$), observándose además una correlación significativa con la Dap ($r: -0,92, p < 0,0001, N: 15$). La disminución del volumen ocupado por los poros de transmisión en los lotes con SD continua se debería a su colapso producto del tránsito de las maquinarias, sin regeneración de los mismos (Sasal *et al.*, 2006). Esta pérdida de macroporosidad resulta en un incremento significativo del volumen ocupado por los mP del horizonte superficial de los suelos bajo SD (Tabla 3).

Los resultados hallados en la bibliografía sobre la RP son más consistentes que los descriptos para el comportamiento de la Dap, con un aumento generalizado de este parámetro en SD comparado con LR (Kruger, 1996; Siri-Prieto *et al.*, 2007; Vetsch *et al.*, 2007). En coincidencia con lo reportado por otros autores, se determinaron incrementos significativos ($p < 0,05$) de la RP bajo SD, los que oscilaron entre el 50% y el 103% respecto de LR. El aumento en la impedancia mecánica se observó en todas las profundidades estudiadas y en ambas fechas de muestreo, siendo evidente aún con elevados contenidos hídricos. Este proceso de endurecimiento del horizonte superficial también fue descrito bajo sistemas de SD en la región pampeana húmeda (Díaz Zorita *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2009). Los resultados obtenidos en el presente estudio ratifican la baja resistencia del sistema a la compactación generada por el tránsito, informada para los suelos de la región semiárida (Amiotti *et al.*, 2012). El incremento de los valores de RP

en SD resulta coherente con las observaciones cualitativas de las condiciones estructurales de los epipedones descriptas a campo, y muestra una mayor sensibilidad que la Dap para detectar los efectos de las distintas prácticas de manejo sobre el suelo. Resultados similares se han reportado en trabajos que utilizaron ambos parámetros en la determinación de capas limitantes (Kirkegaard *et al.*, 1994; Álvarez *et al.*, 2006).

Fabrizzi *et al.* (2005), entre otros, citan que los mayores valores de resistencia mecánica en sistemas bajo SD continua se corresponden con los incrementos en la Dap en los mismos. En este trabajo sólo se observó una tendencia similar a la descripta, ya que la correlación entre la Dap y la RP en los suelos bajo dicho sistema de labranza no resultó significativa ($p > 0,10$). Una posible explicación sería que los incrementos determinados para la RP sean resultado de un endurecimiento ("hardening") del horizonte superficial del suelo y no de un aumento en la Dap. Este proceso, atribuido a una reorganización de las arcillas seguida por endurecimiento (Utomo & Dexter, 1981), ha sido descripto en sistemas bajo SD en la región pampeana húmeda (Taboada *et al.*, 1998; Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2009). Por el contrario, bajo LR se detectó una correlación significativa entre Dap y RP ($r: 0,53, p < 0,05, N: 15$).

Dado los elevados contenidos de agua en el suelo en el muestreo realizado a inicios del barbecho (marzo) no es dable esperar valores de RP que resulten limitantes para el desarrollo radicular. Sin embargo, bajo condiciones de suelo seco la impedancia mecánica fue muy superior a 1,5 MPa, valor que Pilatti & de Orellana (2000) señalan como crítico para la elongación de raíces y el normal abastecimiento de agua y nutrientes e incluso superan ampliamente a los umbrales más altos (2,5 MPa) estimados por Hamza & Anderson (2005).

Algunos autores reportan que los contenidos de COT en el horizonte superficial resultan similares en tratamientos que incluyen sistemas de laboreo conservacionista (Blanco-Canqui & Lal, 2008), mientras que otros citan aumentos de COT en SD respecto a aquellos bajo LR (West & Post, 2002). Para los suelos evaluados en este estudio, el COT fue menor bajo SD, con diferencias significativas en la concentración (g kg^{-1}) de carbono para todas las profundidades evaluadas y en la profundidad 0-5 cm cuando los resultados se expresan en Mg ha^{-1} . En cambio, el COT calculado por unidad de superficie no mostró diferencias entre ambos sistemas de labranza a profundidades mayores a los 5 cm. Esto obedecería a la densificación observada

bajo SD lo que derivó en una mayor masa de suelo, sobreestimando el contenido de COT en subsuperficie. Resulta interesante destacar que a pesar de la Dap más elevada a la profundidad 5-10 cm y particularmente en los 10-18 cm, los valores más bajos de COT (g kg^{-1}) registrados en SD no lograron incrementar el stock de COT respecto a la LR.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al contrastar la aplicación de dos sistemas de labranza conservacionista (LR y SD continua) sobre las propiedades de los epipedones de los suelos de la región pampeana semiárida sur mostraron diferencias entre tratamientos. Los parámetros evaluados resultaron indicadores sensibles, y por ende adecuados, para monitorear los cambios en la calidad del recurso. La compresión por el tránsito generó compactación del horizonte superficial bajo SD manifestada por aumentos en la RP, en la Dap y en los mP, y disminuciones marcadas en la Pt y en el porcentaje de MP, acompañados por mermas en los contenidos de COT respecto de la LR. En los lotes estudiados, los procesos de compactación superficial generados bajo SD se sumarían a los ocurridos con anterioridad a mayor profundidad, afectando la calidad de la estructura de todo el epipedón.

Tal como se la ha operado en el sur bonaerense, la SD continua no contribuyó al mejoramiento de las propiedades físicas ni al almacenamiento de COT en el mediano-largo plazo respecto a la LR. Es necesario generar mayor información, profundizando en las investigaciones sobre la temática, si se persigue optimizar el funcionamiento de esta herramienta tecnológica en la región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SGCyT – UNS y a la ANPCyT por aportar los fondos para realizar la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2012. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. www.aapresid.gov.ar (verificado el 23/09/2014).
- Álvarez, C; CR Álvarez; A Costantini & M Basanta. 2014. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). *Soil Till. Res.* 142: 25-3.
- Álvarez, CR; MA Taboada; C Bustingorri & FH Gutiérrez Boem. 2006. Descompactación de suelos 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.
- Álvarez, MF; ML Osterrieth; A Becker; B Parra; JL del Río & MP Cantú. 2008. Estudio comparativo de la morfología de agregados, su rol como indicador en la calidad de molisoles de la región pampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Actas en CD-R.
- Álvarez, R & HS Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yield in the Argentine Pampas. *Soil Till. Res.* 104: 1-15.
- Amiotti, N; MB Villamil & RG Darmony. 2012. Agronomic and taxonomic consequences of agricultural use of marginal soils in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76: 558-568.
- Andriulo, A; C Sasal & ML Rivero. 2001. Los sistemas de producción conservacionistas como mitigadores de la pérdida de carbono orgánico edáfico. *En: Panigatti, JL; D Buschiazzo & H Marelli (ed). Siembra directa II.* Pp. 17-28. INTA. Buenos Aires.
- Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96: 155-165.
- Balzarini, MG; L González; M Tablada; F Casanoves; JA Di Rienzo & CW Robledo. 2008. Manual del Usuario. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. *In: A Klute (ed). Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and mineralogical methods.* 2° Ed. Pp. 363-375. American Society of Agronomy, Inc.; Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI., USA.
- Blanco-Canqui, H & R Lal. 2008. No-tillage and soil profile carbon sequestration: an on-farm assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 693-701.
- Buschiazzo, DE; JL Panigatti & PW Unger. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 49: 105-116.
- Danielson, RE & PL Sutherland. 1986. Porosity. *In: Klute, A. (ed). Methods of Soil Analysis: Part 1: Physical and mineralogical methods.* 2° ed. Pp: 443-460. American Society of Agronomy, Inc; Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Derpsch, R. 2008. No tillage and conservation agriculture: A progress report. *In: Goddard, T; MA Zoebish, YT Gan; W Ellis; A Watson & S Sombatpanit (ed). No Till Farming Systems. Special Publication N° 3.* Pp. 7-39. World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok. 544 pp.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L González; M Tablada & CW Robledo. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, UN de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Zorita, M & GA Grosso. 2000. Soil water related properties and the compactability of soils from the Pampean region of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 121-126.
- Díaz-Zorita, M; GA Duarte & JH Grove. 2002. A review of no till systems and soil management for sustainable crop production in the sub-humid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Díaz Zorita, M; M Barraco & C Álvarez. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 22: 11-18.
- Fabrizzi, KP; FO García; JL Costa & LI Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81: 57-69.
- FAO. 2012. Basic Principles of Conservation Agriculture. <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html> (verificado el 15/08/2014).
- González Uriarte, M. 2010. Capítulo II: Geomorfología aplicada a la gestión ambiental. *En: Paoloni, JD (compilador). Ambientes y Recursos Naturales del Partido de Bahía Blanca: Clima, Geomorfología, Suelos y Aguas (Sudoeste de la provincia de Bs. As.).* 1° Ed. Pp. 89-125. Bahía Blanca, Edi-UNS. 240 pp.
- Hall, AJ; CM Rebella; CM Ghera & JP Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. *In: Pearson, CJ (ed). Field Crop Ecosystems. Ecosystems of the World* 18. Pp. 413-450. Elsevier, Amsterdam.
- 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.
- Hobbs, PR; K Sayre & R Gupta. 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philos. Trans R. Soc. Lond B. Biol. Sci.* 363: 543-555.
- Iglesias, J; J Galantini & L Santiago. 2007. Cambios en la distribución y orientación de diferentes tamaños de poros. *En: La Siembra directa en los sistemas productivos del sur y sudoeste bonaerense.* Pp. 24-27. AAPRESID. 85 pp.
- Kay, BD & AJ Vanden Bygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118.
- Kirkegaard, JA; JF Angus; PA Gardner & W Müller. 1994. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping I: field studies in the first year of the cropping phase. *Aust. J. Agric. Res.* 45: 511-528.
- Kruger, H. 1996. Compactación en Haplustoles del Sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del suelo* 14: 104-106.
- Lal, R. 2003. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22: 151-184.
- Lal, R; DC Reicosky & JD Hanson. 2007. Editorial: Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Till. Res.* 93: 1-12.
- Lattanzi, A; H Marelli; O Signorile; J Aragón & S Distefano. 2004. La siembra directa: presente y futuro. Información recopilada para INTA Expone 2004 en la Pampa Húmeda.
- López, F; M Duval; JM Martínez & J Galantini. 2014. Cobertura en el sudoeste bonaerense en suelos bajo siembra directa. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Actas en CD-R.
- Mc Vay, KA; JA Budde; K Fabrizzi; MM Mikha; CW Rice; AJ Schlegel; DE Peterson; DW Sweeney & C Thompson. 2006. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 434-438.
- Morrás, H; B Bonel & R Michelena. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Actas en CD-R.
- Neill, C; JM Melillo; PA Steudler; C Cerri; FL Moraes; MC Piccolo & M Brito. 1997. Soil carbon and nitrogen stocks following Forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. *Ecol. Appl.* 7: 1216-1225.

- Nelson, DW & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In: Sparks, DL et al. (ed). Methods of soil analysis. Part 3.* Pp. 961-1010. SSSA. Book Series 5. SSSA & ASA, Madison, WI.
- Pidgeon, JD & BD Soane. 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley monoculture system. *J. Agric. Sci. Camb.* 88: 431-442.
- 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. Sust. Agricult.* 17: 89-111.
- Quiroga, AR; DE Buschiazzi & N Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinean pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Rasmussen, KJ & MA Arshad. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality. Special issue: tillage and soil quality. *Soil Till. Res.* 53: 3-14.
- Reicosky, D. 2008. Carbon sequestration and environmental benefits from no-till systems. *In: Goddard, T; Zoebisch, M; Gan, Y; Ellis, W; Watson, A; Sombatpanit, S. (ed). No-Till Farming Systems. Special Pub. N° 3.* Pp. 43-58. World Association of Soil & Water Conservation. 544 pp.
- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Scian, B. 2010. Capítulo I: Clima- Bahía Blanca y Sudoeste Bonaerense. *En: Paoloni, JD (Compilador). Ambientes y Recursos Naturales del Partido de Bahía Blanca: Clima, Geomorfología, Suelos y Aguas (Sudoeste de la provincia de Bs. As.). 1° Edición Bahía Blanca.* Pp. 27-67. EdiUNS. 240 pp.
- Siri-Prieto, G; D Wayne Reeves & RL Raper. 2007. Tillage systems for a cotton-peanut rotation with Winter-annual grazing: impacts on soil carbon, nitrogen and physical properties. *Soil Till. Res.* 96: 260-268.
- Sisti, CP; HP dos Santos; R Kohllann; B Alves; S Urquiaga & RM Boddey. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 76: 39-58.
- Soil Survey Staff - USDA. 2010. Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. USDA-NRCS, Washington, DC.
- Soracco, CG; LA Lozano; GO Sarli; PR Gelati & RR Filgueira. 2010. Anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Till. Res.* 109: 18-22.
- Steinbach, H & R Álvarez. 2005. Cambios en los contenidos de carbono de los suelos pampeanos por introducción de siembra directa. *Informaciones Agronómicas* 25: 16-23.
- Strudley, MW; TR Green & JC Ascough II. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Till. Res.* 99: 4-48.
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2002. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn. Actas en CD-R.
- Taboada, MA; F Micucci; DJ Cosentino & RS Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* 49: 57-63.
- 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.
- Triplett, GB & WA Dick. 2008. No-tillage crop production: A revolution in agriculture! *Agron. J.* 100:153-165
- Utomo, WH & AR Dexter. 1981. Age hardening of agricultural top soils. *J. Soil Sci.* 32: 335-350.
- Vetsch, JA; GW Randall & JA Lamb. 2007. Corn and soybean production as affected by tillage systems. *Agron. J.* 99: 952-959.
- Viglizzo, E & E Jobbágy (ed). 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Ediciones INTA, Bs. As. 102 pp.
- West, T & W Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1930-1946.