

POROSIDAD DE USTOLES BAJO SIEMBRA DIRECTA EN EL SUDOESTE BONAERENSE

FERNANDO MANUEL LÓPEZ^{1-2*}; MATÍAS EZEQUIEL DUVAL¹⁻²; JUAN MANUEL MARTÍNEZ¹⁻²
& JUAN ALBERTO GALANTINI¹⁻²⁻³

Recibido: 07-10-15

Recibido con revisiones: 05-03-16

Aceptado: 20-04-16

RESUMEN

En la producción agropecuaria es indispensable la buena calidad física de los suelos para lograr un buen rendimiento de los cultivos con el menor efecto sobre el ambiente. A partir de la expansión de la siembra directa (SD) en el sudoeste bonaerense, es necesario un conocimiento más detallado del estado físico de los suelos bajo este sistema de producción. Con el objetivo de analizar la calidad física actual se determinó la distribución por tamaño de poro en Ustoles del sudoeste bonaerense bajo SD (AG) y en ambientes cuasi-prístinos (AN). Además, se evaluó la influencia de las fracciones granulométricas sobre las diferentes propiedades físicas. Los suelos evaluados presentaron una tendencia a una escasa porosidad de aireación en subsuperficie, demostrada por la baja macroporosidad de los AN (16,6%). En los suelos agrícolas dichas limitaciones aumentaron debido a una menor macroporosidad (11,8%). El 88,2% de AG presentó características físicas en subsuperficie que limitarían el desarrollo de los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), aún luego de más de 12 años bajo SD. La principal limitante se asoció a una baja macroporosidad (poros >30 µm) que afectaría la aireación del suelo y el crecimiento de raíces. Si bien no es posible atribuir la pérdida de macroporosidad a la SD, la forma en que se ha implementado la misma en la región (e.g. utilización en suelos con piso de arado, baja proporción de rotaciones o pasturas) no ha sido capaz de revertir los problemas de degradación de la calidad física. En Ustoles del sudoeste bonaerense sería necesario el desarrollo de prácticas de manejo del suelo que contribuyan a la regeneración biótica de la estructura (e.g. rotaciones con pasturas, inclusión de cultivos con raíces profundas) para asegurar una adecuada fertilidad física en subsuperficie.

Palabras clave. Física de suelos; Macroporos; Labranza.

SOIL POROSITY IN USTOLLS UNDER NO-TILL SYSTEMS IN SOUTHWESTERN BUENOS AIRES

ABSTRACT

In agricultural production the appropriate soil physical quality is essential to achieve good crop yields with minor environmental effect. Since no tillage (NT) use broadly expanded in southwestern Buenos Aires, a more detailed knowledge of the physical soil condition under this system is needed. With the aim of analyzing the present physical quality, pore size distribution was determined in Ustolls of southwestern Buenos Aires province under NT (AG) and in quasi pristine environments (AN). Also, the influence of the different granulometric fractions on physical properties was evaluated. Analyzed soils showed a poor subsurface aeration porosity tendency demonstrated by the low macroporosity of the AN (16.6%). In agricultural soils these limitations increased due to lower macroporosity (11.8%). Near 88% of AG presented subsurface physical characteristics that would limit wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) development, even after 12 years under NT. The main limitation was associated with a low macroporosity (pores > 30 µm) that could affect soil aeration and root growth. Although it is not possible to attribute the macroporosity loss to NT management, the way it has been implemented in the region has not been able to reverse the soil physical quality problems. It is necessary to develop land management practices that contribute to the biotic soil structure regeneration (e.g. rotations with pastures, inclusion of crops with deep roots) to ensure adequate physical fertility in subsurface layers of Ustolls under NT in southwestern Buenos Aires.

Key words. Soil physics; Macropores; Tillage.

1 CERZOS-CONICET

2 Departamento de Agronomía - Universidad Nacional del Sur

3 Comisión de investigaciones científicas de la provincia de Buenos Aires

* Autor de contacto: fmlopez@cerzos-conicet.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El Sudoeste de la provincia de Buenos Aires comprende parte de las regiones semiárida y subhúmeda seca de la Argentina, con características climáticas y edáficas que lo diferencian del resto de la pampa húmeda. Esta región se caracteriza por la gran variabilidad climática y la escasez de precipitaciones (Glave, 2006), factores que restringen la diversidad de cultivos y determinan un menor potencial de producción respecto a la región pampeana central. En los últimos 20 años, al igual que en toda la zona agrícola de la Argentina, ha ocurrido una gran expansión de la siembra directa (SD) en el sudoeste bonaerense (AAPRESID, 2012; Schmidt & Amiotti, 2015; Zilio, 2015). La adopción masiva de la SD se ha debido a menores costos de producción, mayores rendimientos y la posibilidad de incorporar áreas con mayores limitaciones para la producción agrícola (Derpsch *et al.*, 2010). Sin embargo, es necesaria la evaluación del impacto a largo plazo de esta práctica sobre diferentes propiedades edáficas, dada la mayor fragilidad y menor resiliencia de los agroecosistemas de esta región (Schmidt & Amiotti, 2015).

En la producción agropecuaria es indispensable la buena calidad física de los suelos para lograr un buen rendimiento de los cultivos con el menor efecto sobre el ambiente (Topp *et al.*, 1997). En nuestro país, la agriculturización y el uso de labranzas agresivas han tenido un fuerte impacto sobre el suelo, dando como resultado la pérdida de su calidad física (Álvarez *et al.*, 2009; Viglizzo & Jobbágy, 2010). Uno de los principales problemas físicos que enfrenta la agricultura moderna es la compactación del suelo (Hamza & Anderson, 2005), ya sea por su influencia en el crecimiento de las plantas o a través del aumento de la erosión (Kirby, 2007). La compactación se define como el reordenamiento de las partículas del suelo asociado a una disminución en el espacio poroso y el aumento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración (Soil Science Society of America, 2008). La mala estructura resultante impide el crecimiento de las raíces y por lo tanto limita la cantidad de suelo explorado debido a la baja porosidad (Rosolem *et al.*, 2002). Además, al reducir el volumen de los poros grandes en el suelo, la compactación se asocia con la reducción de la conductividad hidráulica y permeabilidad al aire y agua, alterando así la dinámica del agua y nutrientes (Soane *et al.*, 1981; Gupta & Allmaras, 1987; Lal, 1994).

La compactación subsuperficial es una forma importante de degradación física a nivel mundial en producciones agrícolas (Van Ouwerkerk & Soane, 1994; Van Den

Akker & Canarache, 2001; Wiebe, 2003). Además, es un problema persistente, costoso, difícil de solucionar (Lipiec *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2003; Kirby, 2007) y al no manifestarse en superficie, se dificulta su localización y cuantificación (Hamza & Anderson, 2005). Otra complicación es que sus efectos se desarrollan gradualmente y por lo tanto los productores tardan en reconocer su importancia (McCormack, 1987). Esta dificultad para observar la degradación estructural del suelo conduce a problemas específicos, tales como bajos rendimientos de los cultivos o baja eficiencia de utilización del agua, que en muchos casos son atribuidos a otras causas (Hamza & Anderson, 2005). La compactación subsuperficial debido a la labranza ("piso de arado") en el sudoeste bonaerense ya ha sido documentada como consecuencia de la labranza convencional continua (Senigagliesi & Ferrari, 1993; Krüger, 1996; Silenzi, 1998). Cuando los suelos se convierten a SD sería esperable una pérdida de macroporos debido la compactación inducida por el tránsito de la maquinaria y la ausencia de labranzas (Kay & VandenBygaart, 2002). Sin embargo, esta compactación podría ser compensada por la creación progresiva de macroporos de raíces y actividad de la fauna con el tiempo, ya que los macroporos orientados verticalmente son más persistentes frente al tráfico de la maquinaria (Blackwell *et al.*, 1990). Varios estudios han evaluado la implementación de la SD en diversos ambientes y la misma no siempre ha representado una mejora en la calidad física de suelos degradados (Taboada *et al.*, 1998; Micucci & Taboada, 2006; Sasal *et al.*, 2006; Strudley *et al.*, 2008; Álvarez *et al.*, 2009; Schmidt & Amiotti, 2015). Estos autores proponen que se debería evaluar el impacto de la SD en cada caso particular, debido a la influencia de diversos factores como la secuencia de cultivos, el tipo de suelo, las propiedades del subsuelo y el manejo efectuado.

La cuantificación de los diversos tamaños de poros es adecuada para la evaluación de la fertilidad física de suelos bajo siembra directa (Sasal & Andriulo, 2003). Además, para la correcta determinación del estado físico del suelo es importante tomar como referencia valores de suelos de ambientes naturales, ya que el comportamiento de cada tipo de suelo frente a la compactación suele ser diferente (Hamza & Anderson, 2005). Así mismo, para la evaluación de una práctica sobre propiedades físicas del suelo, se recomienda relacionarla con atributos específicos del suelo, como su textura, dado que suelos de texturas distintas responden diferente frente a un disturbio (Bredja *et al.*, 2001; Strudley *et al.*, 2008). De esta manera, los rangos óptimos de

indicadores y los límites críticos deben ser específicos para cada suelo en cuestión (Reynolds *et al.*, 2008).

Existen numerosos trabajos que evalúan el efecto de la SD sobre propiedades físicas del suelo en Molisoles de régimen údico (Chagas *et al.*, 2004; Ferreras *et al.*, 2000; Ferreras *et al.*, 2007) pero aún no se ha evaluado el efecto de la SD en Ustoles del sudoeste bonaerense. Recientemente Schmidt & Amiotti (2015) establecieron la necesidad e importancia de generar mayor información, si se pretende optimizar el uso de esta herramienta tecnológica en la región. Es necesario un mayor conocimiento del estado poroso actual de Ustoles bajo SD en la región semiárida del sudoeste bonaerense, para evaluar los efectos a largo plazo de la SD sobre parámetros físicos que pueden afectar tanto la productividad como la sustentabilidad de estos agroecosistemas (Abril *et al.*, 2005; Galantini & Rosell, 2006). Los objetivos de este trabajo fueron: i) determinar la distribución por tamaño de poro en suelos de diferentes texturas de ambientes naturales y en lotes con más de 12 años bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense; ii) evaluar el estado físico actual en Ustoles bajo siembra directa utilizando como referencia suelos de ambientes naturales de la región; iii) estudiar la relación entre diferentes parámetros físicos de Ustoles del sudoeste bonaerense bajo dos manejos contrastantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características climáticas y edáficas

El estudio se llevó a cabo en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El muestreo se realizó sobre diversos molisoles de régimen ústico (Ustoles) (Soil Survey Staff-USDA, 2014), pertenecientes a los partidos de Bahía Blanca, Coronel Dorrego, Coronel Pringles y Tornquist (Fig. 1) (INTA-CIRN, 1989). Los suelos estudiados son de origen eólico, formados por deposición de loess. El comportamiento mecánico de estos suelos está determinado por la alta proporción de arena y limo en todo el perfil (Quiroga *et al.*, 2008). El clima zonal es subhúmedo seco, entre 550 y 732 mm año⁻¹, con una marcada estacionalidad de las precipitaciones en otoño y primavera y una temperatura media anual de 14,5°C. Los cultivos predominantes de la región son trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), en orden de importancia, respectivamente.

Tratamientos y toma de muestras

Durante los años 2012 y 2013 se seleccionaron y muestrearon 17 lotes que tuvieron entre 12 y 20 años de siembra directa continua ("lotes agrícolas", AG), pertenecientes a establecimientos de la regional Bahía Blanca de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID). Adicionalmente, se muestrearon 10 situaciones de referencia, no disturbadas o cuasi-prístinas ("ambiente natural", AN), lindantes a los sitios agrícolas. Estas situaciones se encontraban con

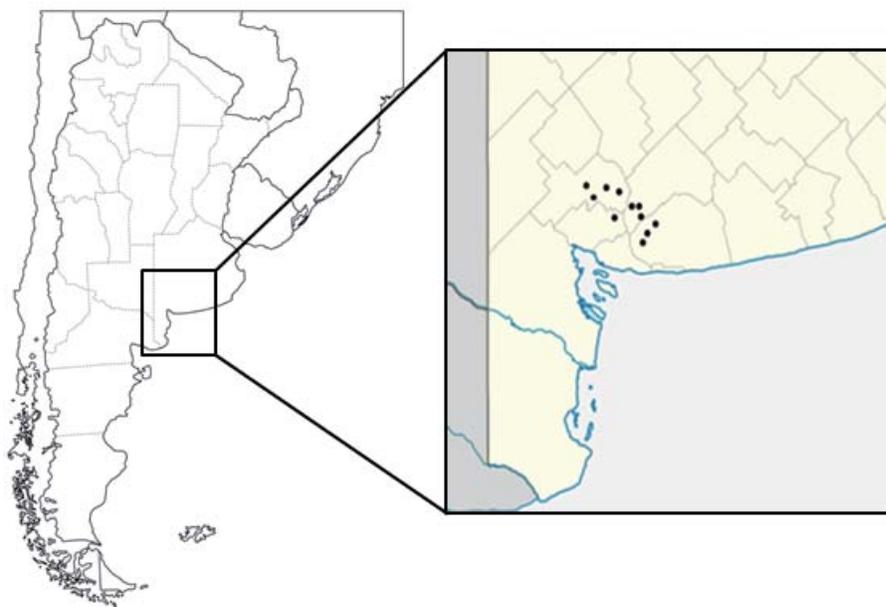


Figura 1. Ubicación de los sitios evaluados.

Figure 1. Location of evaluated sites.

la vegetación nativa de la zona, determinada como estepa gramínea, con gran presencia de especies del género *Stipa*.

Dado que los suelos evaluados clasifican como Molisoles debido a que reúnen las características de un epipedón mólico en los primeros 18 cm (Soil Survey Staff - USDA, 2014) y que el mayor efecto de las prácticas de manejo o usos del suelo sobre la calidad física se produce en los primeros centímetros del perfil (Carter, 1990; Drewry & Paton, 2005; Drewry, 2006; Reynolds *et al.*, 2008), la evaluación de propiedades físicas se realizó en 0-20 cm. En cada situación se tomaron aleatoriamente tres muestras de suelo sin disturbar mediante cilindros de acero de 5 cm de alto y 4,5 cm de diámetro, a 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm de profundidad. Además en cada punto de muestreo se tomó una muestra compuesta (10 submuestras), mediante barreno, a 0-20 cm de profundidad, mezcladas y homogeneizadas, para la determinación de las diferentes fracciones granulométricas de cada sitio.

Propiedades físicas

El análisis de textura se realizó por el método de la pipeta (Gee & Bauder, 1986). En cuanto a la evaluación del espacio poroso del suelo se determinó la densidad aparente por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986) y se estimó el diámetro efectivo de poros capaces de retener agua a una determinada presión a partir de la curva de retención hídrica (Hassink *et al.*, 1993). La porosidad total se determinó por el contenido volumétrico de agua a saturación. Los tamaños de poros se analizaron en base a la clasificación propuesta por Kay & VandenBygaart (2002) (Tabla 1). Los poros con diámetros > 30 μm se denominan macroporos (MP). El agua fluye principalmente a través de estos poros durante la infiltración y drenaje y en consecuencia estos poros ejercen un control importante sobre la aireación del suelo. Además, gran parte del crecimiento de la raíz se inicia en estos poros. Poros de un diámetro equivalente >60 μm son clasificados como macroporos grandes (MPg) o

poros de transmisión (Hamblin, 1985). Los poros con un diámetro equivalente de 0,2-30 μm se conocen como mesoporos (mP) y son particularmente importantes para el almacenamiento de agua utilizable por las plantas. Los microporos (μP) tienen un diámetro efectivo <0,2 μm , y generalmente el agua en estos poros no está disponible para las plantas. Además, dentro de cada categoría de poros se determinaron tamaños intermedios como se detalla en la Tabla 1.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó análisis de la varianza (ANAVA). Se realizó el ANAVA entre tratamientos para cada profundidad: 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm y se evaluó la interacción tratamiento*profundidad para las capas 0-10 cm (comprendiendo las muestras de 0-5 y 5-10 cm) y 10-20 cm (comprendiendo las muestras de 10-15 y 15-20 cm). Para los parámetros que no presentaron interacción tratamiento*profundidad se presentan los resultados por capa, 0-10 cm y 10-20 cm. Teniendo en cuenta que la capa debajo de la profundidad de labranza normal se denomina subsuelo (Jones *et al.*, 2003) y que la profundidad de corte de las cuchillas o de los abresurcos en SD es siempre inferior a 10 cm, nos referimos a la capa comprendida entre 0-10 cm como "capa superficial" y a la capa 10-20 cm como "capa subsuperficial o subsuelo". En los casos donde se observó interacción tratamiento*profundidad se presentaron los resultados para cada profundidad por separado, cada 5 cm. Se realizaron comparaciones de medias con el test DMS de Fisher ($\alpha=0,05$). El análisis de correlación entre variables se realizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Las regresiones simples se establecieron mediante el método de mínimos cuadrados. Para la comparación de rectas de regresión se utilizó el análisis de covarianza. En los casos donde las rectas resultaron paralelas se calculó la pendiente ponderada. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software INFOSTAT versión 2015 (Di Rienzo *et al.*, 2015).

Tabla 1. Clasificación de tamaño de poros propuesta por Kay & VandenBygaart (2002).

Table 1. Pore size classification proposed by Kay & VandenBygaart (2002).

Nombre	DMP (μm)	Tensión (kPa)
Macroporos (MP)	> 30	<10,13
Macroporos grandes (MPg)	> 60	<5,06
Macroporos pequeños (MPp)	60-30	5,06 – 10,13
Mesoporos (mP)	30-0,2	10,13 – 1519,88
mesoporos grandes (mPg)	30-9	10,13 – 33,44
mesoporos pequeños (mPp)	9-0,2	33,44 – 1.519,88
Microporos (mP)	<0,2	>1.519,88

DMP: diámetro medio ponderado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la región estudiada se encontraron suelos pertenecientes a 6 clases texturales (Fig. 2), predominando los suelos de textura franca a franca arenosa. Los suelos de la región se caracterizaron por una gran cantidad de limo y arena, 334 y 508 g kg⁻¹, respectivamente, en promedio (Tabla 2). Cosentino & Pecorari (2002) establecieron que la fracción limo fino de Argiudoles de la pampa ondulada produce debilidad estructural frente al tráfico debido a su alto contenido de limos finos livianos. En la fracción limo de los suelos estudiados se observa una predominancia de limos finos, lo que determinaría alta susceptibilidad a la degradación de la estructura (Pecorari *et al.*, 1990). Además, en la región semiárida pampeana Quiroga *et al.* (2009) ya han establecido que en aquellos suelos con mayor proporción de limo y arena, la pérdida de estabilidad estructural no solo ha significado un incremento en la susceptibilidad a la erosión, sino también una pérdida de macroporosidad. Este factor debe ser tenido en cuenta para la evaluación de prácticas de labranza que afectan tanto la estructura como la macroporosidad del suelo.

Independientemente del sitio y la clase textural, se observó como el uso agrícola, con labranza convencional anteriormente y actualmente bajo SD, ha deteriorado las propiedades físicas en el horizonte superficial de los sitios evaluados (Tabla 3). La DA y la PT en 0-10 cm y los MPg en 10-20 cm presentaron interacción tratamiento*profundidad

por lo que se evaluaron para cada profundidad por separado, cada 5 cm (Tabla 4). La profundidad 0-5 cm es la única donde se observaron cambios en la PT, mientras que la distribución por tamaño de poro presentó importantes diferencias en todas las profundidades evaluadas.

Densidad Aparente

La DA fue más afectada por el manejo agrícola en 0-5 cm que en las demás profundidades. La DA aumentó 35,2% por el uso agrícola en 0-5 cm, mientras que en 5-10 cm aumentó 10,5% y sólo 3,6% en 10-20 cm. En suelos agrí-

Tabla 2. Medidas resumen de las diferentes fracciones granulométricas evaluadas.

Table 2. Summary measures of different size fractions evaluated.

Fracción	Tamaño (µm)	Media (g kg ⁻¹)	Mín (g kg ⁻¹)	Máx (g kg ⁻¹)	CV (%)
a	< 2	157	27	306	47,66
L	2 - 50	334	86	587	39,92
Lf	2 - 20	189	68	345	41,67
Lg	20 - 50	145	13	266	46,39
A	50 - 2.000	508	244	843	31,65
Af	50 - 100	287	119	448	28,11
Ag	100 - 2.000	221	42	653	73,31

a= arcilla; L=limo; Lf= limo fino; Lg= limo grueso; A= arena; Af= arena fina; Ag= arena gruesa.

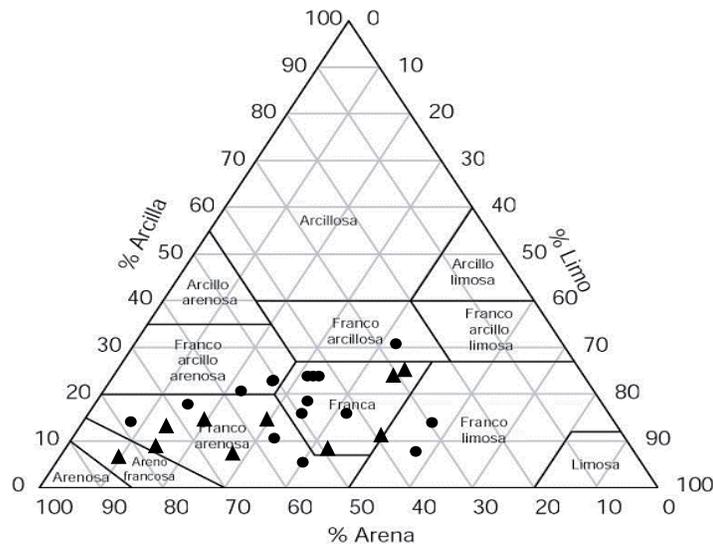


Figura 2. Clases texturales de los sitios evaluados: suelos agrícolas (círculos) y ambientes naturales (triángulos).
Figure 2. Textural classes of the evaluated sites: agricultural soils (circles) and natural environments (triangles).

colas se consideran valores óptimos de DA menores a $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ (Olness *et al.*, 1998; Reynolds *et al.*, 2008). Para suelos del sudoeste bonaerense en particular, Venanzi *et al.* (2002) comprobaron la reducción de la biomasa radical en trigo con DA superiores a ese valor. Así mismo, el valor crítico que produciría una importante reducción en la biomasa radical y aérea del trigo sería entre 1,52 (Oussible *et al.*, 1992) y $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ (Venanzi *et al.*, 2002). En todos los AN, la DA en 0-5 cm fue inferior a $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, mientras que el 58,8% de los lotes agrícolas evaluados presentaron valores de DA superiores a dicho valor. En la profundidad 10-20 cm, tanto en AN como en AG se observaron valores promedios por encima de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabla 3). Los elevados valores de DA en subsuperficie, incluso en AN, indicarían que estos suelos presentarían altas DA en subsuperficie, probablemente debido al alto contenido de limo y arena. Esta limitante para el desarrollo radical de los cereales de invierno en subsuperficie se agravaría cuando los suelos son destinados a la producción agrícola y no lograría ser revertida por el manejo bajo SD de los últimos años. En relación a los elevados valores de DA en subsuperficie, se observaron valores superiores a $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ en el 20,0% y 29,4% de los AN y AG, respectivamente. Dichas muestras se correspondían con los sitios con mayor porcentaje de arenas: entre 743 y 785 g kg^{-1} en los AN y entre 435 y 773 g kg^{-1} en los lotes cultivados. Tanto para AG como para AN se observó una relación significativa ($p < 0,01$) entre el

contenido de arena y la DA en 10-20 cm (Fig. 3). El análisis de covarianza demostró que ambas rectas son paralelas no coincidentes por lo que el manejo AG produciría un aumento de la DA pero no modificaría la tasa de aumento de la DA respecto del contenido de arena. Debido a que ambas

Tabla 3. Densidad aparente (DA), porosidad total (PT) y distribución por tamaño de poro para ambientes naturales (AN) y lotes agrícolas (AG), en 0-10 y 10-20 cm.

Table 3. Bulk density (DA), total porosity (PT) and pore size distribution for natural environments (AN) and agricultural sites (AG), at 0-10 and 10-20 cm.

	0-10 cm		10-20 cm	
	AN	AG	AN	AG
DA (Mg m^{-3})	1,06	1,28	1,38 a	1,43 b
PT ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,565	0,529	0,488 a	0,486 a
MP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,245 b	0,199 a	0,166 b	0,118 a
MPg ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,190 b	0,144 a	0,128	0,079
MPp ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,055 a	0,056 a	0,038 a	0,039 a
mP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,213 b	0,200 a	0,182 a	0,199 a
mPg ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,048 b	0,034 a	0,048 b	0,029 a
mPp ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,165 a	0,166 a	0,134 a	0,170 b
μP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,107 a	0,130 b	0,140 a	0,169 b

Para cada profundidad letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

MP: macroporos ($> 30 \mu\text{m}$); MPg: macroporos grandes ($> 60 \mu\text{m}$); MPp: macroporos pequeños ($60-30 \mu\text{m}$); mP: mesoporos ($30-0,2 \mu\text{m}$); mPg: mesoporos grandes ($30-9 \mu\text{m}$); mPp: mesoporos pequeños ($9-0,2 \mu\text{m}$); μP : microporos ($< 0,2 \mu\text{m}$).

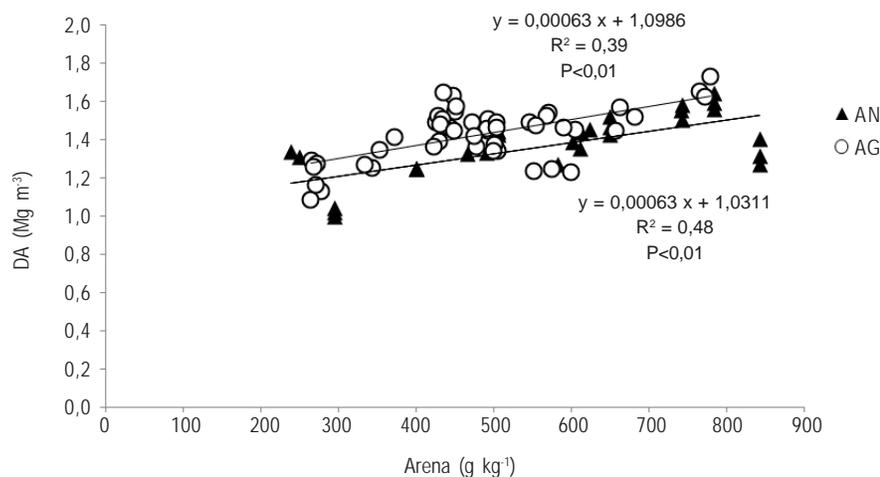


Figura 3. Relación entre el contenido de arena (fracción $> 50 \mu\text{m}$) y la densidad aparente (DA), en 10-20 cm, para las situaciones naturales (AN) y cultivadas (AG).

Figure 3. Relationship between sand content (fraction $> 50 \mu\text{m}$) and bulk density (DA), in 10-20 cm, for cultivated (AG) and natural situations (AN).

rectas son paralelas no coincidentes se ajustaron utilizando una pendiente ponderada. Estos resultados demuestran que los suelos con alto contenido de arena de la región tienen tendencia a poseer una elevada DA subsuperficial cuando son trabajados con SD, lo que afectaría el rendimiento de los cereales de invierno. El valor crítico de $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ se superó en un solo lote, que correspondió con el suelo agrícola que tenía la mayor cantidad de arena (772 g kg^{-1}). Estos resultados confirman la alta susceptibilidad a la compactación en subsuperficie de aquellos suelos con alto contenido de arena y la importancia de un adecuado manejo del suelo cuando se destinan a la producción agrícola. Schmidt & Amiotti (2015), en suelos bajo SD con altos contenidos de arenas, atribuyeron los elevados valores de DA en subsuperficie a la persistencia de pisos de arado provenientes del manejo anterior bajo labranza. Así, la SD, implementada como se utilizó en la región, no sería capaz de mejorar la condición física en subsuperficie, a pesar del tiempo transcurrido desde su implementación. Esta condición daría lugar a un reducido crecimiento vegetal, causando menores aportes de materia orgánica al suelo, lo que reduce el ciclado de nutrientes y la actividad de microorganismos (Hamza & Anderson, 2005), factores determinantes para el desarrollo y mantenimiento de una adecuada estructura del suelo.

Porosidad del suelo

Si bien la PT sólo presentó diferencias significativas entre tratamientos en 0-5 cm (Tabla 4), se observaron importantes diferencias en la distribución por tamaños de poros en todas las profundidades (Tabla 3). Los mayores cambios se observaron en los MPg donde se observó una disminución del 48,5% en los lotes agrícolas en 15-20 cm, respecto a los AN ($0,067 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en AG y $0,130 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en AN). Este significativo descenso de los MPg concuerda con varios estudios que señalan que en suelos compactados se produce una disminución de los poros de mayor tamaño sin observarse grandes diferencias en la porosidad total (Kay & VandenBygaart, 2002; Amiotti *et al.*, 2012). Para suelos similares a los de este estudio, Schmidt & Amiotti (2015) también encontraron descensos importantes (37%) en el contenido de los poros de mayor tamaño, al comparar SD con labranza reducida. Según Botta *et al.* (2004), los macroporos representan la fracción que se destruye primero cuando el suelo es físicamente degradado debido al tránsito por maquinarias. Sasal *et al.* (2006), en suelos de la pampa ondulada, determinaron que la disminución del volumen de macroporos en lotes con SD continua se debe

a su colapso producto del tránsito de las maquinarias, sin regeneración de los mismos. Según Ferreras *et al.* (2000) en Paleudoles del sudeste bonaerense y Quiroga *et al.* (2007) en Haplustoles del sudoeste bonaerense, el efecto de la SD dependería de la condición inicial del suelo, que se encontraba degradado por el laboreo cuando se comenzó a implementar la misma. De esta manera, si bien no es posible atribuir la pérdida de macroporosidad a la SD, podemos determinar que la SD, como se utilizó en la región, no fue capaz de regenerar una adecuada fertilidad física en subsuperficie. Ya se ha documentado la predominancia de monocultivo de cereales de invierno en suelos bajo SD en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (López *et al.*, 2015). Al respecto, Díaz-Zorita *et al.* (2002) ya han establecido el efecto positivo de la inclusión de pasturas en rotaciones bajo SD en ambientes subhúmedos y semiáridos de la pampa argentina. Probablemente la ausencia de rotaciones que incluyan pasturas perennes en los sistemas productivos evaluados afectó la regeneración de la estructura en el manejo bajo SD.

La baja macroporosidad observada en subsuperficie probablemente tenga un efecto restrictivo para el crecimiento de las raíces (Hamblin, 1985; Kay, 1990), causando un efecto negativo en la cantidad de agua y nutrientes disponibles para los cultivos (Gupta & Allmaras, 1987). Rosolem & Takahashi (1998) establecieron que si existe una limitación para el crecimiento de raíces en subsuperficie, estas se concentran en las capas más superficiales, no existiendo siempre un efecto negativo en el rendimiento. Sin embargo, según Hamza & Anderson (2005) al existir una compactación subsuperficial disminuye el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes a los cultivos, lo que aumenta los requerimientos de fertilización. En la zona se ha observado alta respuesta a la fertilización fosfórica en suelos bajo SD continua con buena provisión de fósforo, lo que daría indicios de una inadecuada fertilidad física de

Tabla 4. Densidad aparente (DA) y porosidad total (PT) para ambientes naturales (AN) y lotes agrícolas (AG), según profundidad.

Table 4. Bulk density (DA) and total porosity (PT) for natural environments (AN) and agricultural sites (AG), according to depth.

	0-5 cm		5-10 cm	
	AN	AG	AN	AG
DA (Mg m^{-3})	0,88 a	1,19 b	1,24 a	1,37 b
PT ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,615 b	0,552 a	0,514 a	0,506 a

Para cada profundidad letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

estos suelos (Observación personal). Además de la disminución de la cantidad de MPg en las situaciones bajo SD, es muy importante la disminución de mPg (29,2% en 0-10 cm y 39,6% en 10-20 cm) (Tabla 3). Estos poros son los responsables de retener agua a bajas tensiones, fácilmente utilizable por los cultivos (Pilatti *et al.*, 2012), por lo que es de esperar que su disminución impacte negativamente en la disponibilidad del agua. Los únicos tamaños de poros que aumentaron en los suelos bajo agricultura fueron los mPp en 10-20 cm y los μ P en ambas capas ($p < 0,05$). Esto coincide con varios autores que señalan que los cambios en los tamaños de poros del suelo causadas por la compactación se caracterizan por un aumento de los poros de diámetros pequeños en detrimento de los poros más grandes (Andriulo & Rosell, 1988; Richard *et al.*, 2001; Dexter, 2004). Esta disminución de la macroporosidad tendría efectos negativos en la aireación del suelo y crecimiento y respiración de las raíces. En Haplustoles del sudoeste bonaerense bajo labranza convencional, Silenzi *et al.* (1998) demostraron que la presencia de la capa compactada en subsuperficie genera pérdidas anuales de alrededor de 30% en el rendimiento de cereales de invierno. En años más secos, dichas pérdidas de rendimiento aumentan considerablemente ya que la compactación del subsuelo limita el almacenamiento del agua. Según nuestros resultados, luego de 12 años de implementación de la SD, las limitaciones físicas continuarían, lo que actuaría como limitante del rendimiento de los cereales de invierno en la región.

Pilatti *et al.* (2012) establecieron que la porosidad de aireación del suelo debería ser mayor de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para asegurar un adecuado desarrollo de los cultivos. En la profundidad 0-10 cm sólo 2 lotes bajo producción (11,8%) presentaron valores por debajo del límite crítico de aireación. Sin embargo, en la profundidad 10-20 cm el 88,2% de los lotes agrícolas y el 40% de AN tuvieron menos de 15% de porosidad de aireación (poros $> 30 \mu\text{m}$). Esta gran proporción de lotes con problemas de aireación en subsuperficie demuestra la importancia de establecer prácticas de manejo que contribuyan al aumento de la macroporosidad de estos suelos. Según Taboada *et al.* (1998) y Micucci & Taboada (2006) la baja macroporosidad de molisoles franco arcillo arenosos de la pampa ondulada está determinada por propiedades intrínsecas del suelo y cambia poco por el manejo. Sin embargo, nuestros datos en la región semiárida del sudoeste bonaerense, demuestran que en estos suelos si bien existe una tendencia a tener bajo porcentaje de macroporos en subsuperficie, esta cua-

lidad se ve agravada por el uso agrícola. Esto coincide con Schmidt & Amiotti *et al.* (2015) que establecieron que los suelos de la región semiárida del sudoeste bonaerense bajo SD tendrían baja resistencia a la compactación generada por el tránsito. Según estas autoras, esta compactación sería más notable en subsuperficie (5-10 y 10-18 cm) debido al colapso de macroporos por el tránsito de maquinarias, sin regeneración de los mismos. La compactación no sería tan evidente en 0-5 cm debido a la acumulación de materia orgánica en superficie que probablemente permita una mejor estructura en la capa superficial del suelo. La porosidad de aireación (MP) menor a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ afecta el crecimiento y respiración de las raíces (Lal & Shukla, 2004) y promueve la aparición de enfermedades de raíz (Drewry *et al.*, 2008). En suelos más finos de la región pampeana húmeda se ha documentado que la porosidad de aireación de estos suelos raramente es mayor a dicho umbral (Taboada *et al.*, 1998; Micucci & Taboada 2006; Taboada *et al.*, 2008). En nuestro estudio, en la profundidad 10-20 cm, se observó menos de 10% de porosidad de aireación en el 17,6% de los lotes bajo SD, mientras que el 70,6% se encontraba entre 10 y 15%. En el sudoeste bonaerense ya se ha documentado la gran incidencia de enfermedades de raíz, en lotes con cultivo de cereales de invierno bajo SD (Kiehr *et al.*, 2008), lo que podría estar influenciado por la baja porosidad de aireación encontrada en este estudio. Esta baja macroporosidad en subsuperficie bajo SD podría atribuirse o bien a la destrucción de poros por compactación o a la falta de generación de los mismos (Sasal *et al.*, 2006). De este modo, en los suelos de esta región se le debe dar especial importancia a la regeneración biótica de la estructura, debido a la baja capacidad de los componentes abióticos de estos suelos para regenerar la misma. Esta porosidad biológica es formada tanto por las raíces como por los organismos del suelo, por lo que cualquier práctica que aumente el aporte de raíces o la actividad de microorganismos ayudaría a contrarrestar los efectos negativos de la pérdida de macroporosidad (Cui & Holden, 2015; Gupta & Germida, 2015).

Recientemente, Schmidt & Amiotti (2015) han reportado una estrecha relación entre DA y MP en Paleustoles petrocálcicos de la región pampeana semiárida sur bajo diferentes manejos del suelo. En la Figura 4 se presenta esta relación para las situaciones evaluadas en nuestro estudio: ambientes naturales y sitios bajo agricultura. En los AN la relación fue no significativa ($p > 0,15$) para ambas profundidades, mientras que en los lotes agrícolas la relación entre ambas variables fue altamente significativa ($p < 0,01$).

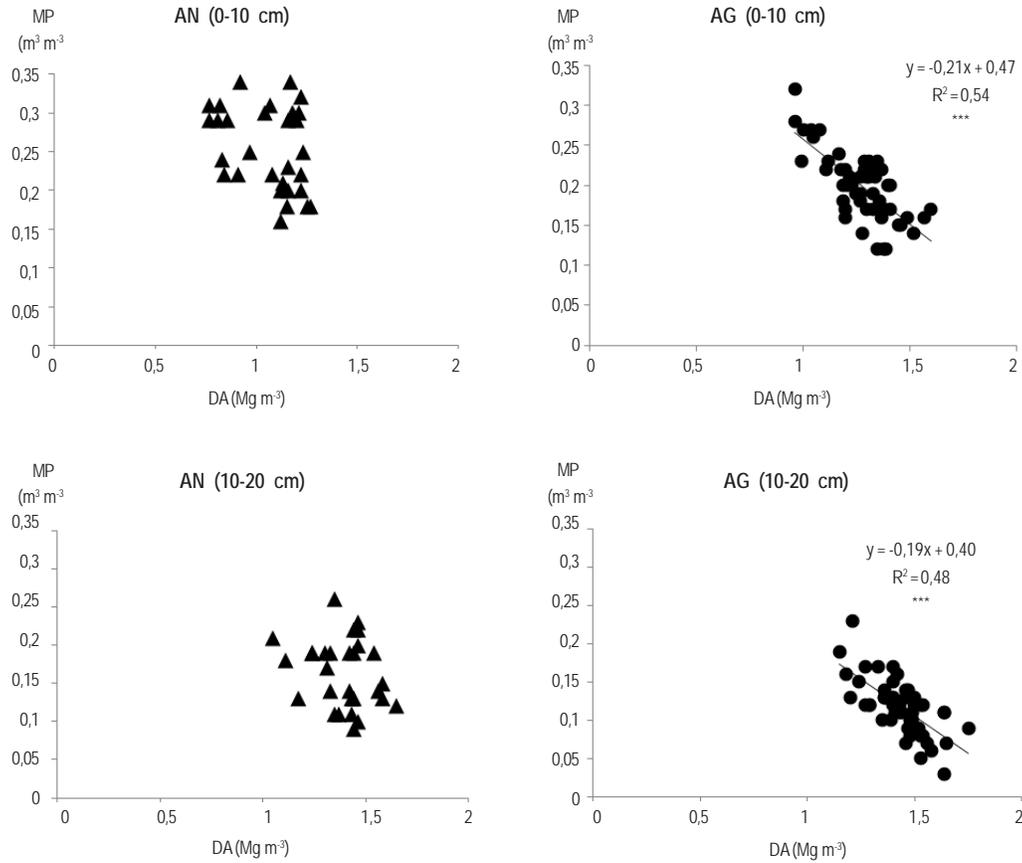


Figura 4. Relación entre densidad aparente (DA) y macroporosidad (MP) para superficie (0-10 cm) y subsuperficie (10-20 cm) en ambientes naturales (AN) y sitios bajo agricultura (AG).

Figure 4. Relationship between bulk density (DA) and macroporosity (MP) for surface (0-10 cm) and subsurface (10-20 cm) layers, in natural environments (AN) and agricultural sites (AG).

Es destacable la falta de relación entre DA y MP en los ambientes naturales, demostrando que el manejo agrícola ha modificado las relaciones entre los diferentes parámetros del suelo. La menor relación encontrada ($R^2=0,54$ y $0,48$, para 0-10 y 10-20 cm, respectivamente) respecto a la reportada por Schmidt & Amiotti (2015) probablemente se deba a que en este caso se incluyeron suelos de diferentes texturas. La estrecha relación negativa entre MP y DA en suelos bajo cultivo sugiere que la compactación del suelo está dado mayormente por un descenso del contenido de macroporos. Esta relación altamente significativa entre ambas variables permite proponer límites críticos regionales de DA que aseguren una adecuada porosidad de aireación en suelos bajo SD. Según las relaciones encontradas, con DA de 1,52 y 1,31 Mg m⁻³, para 0-10 y 10-20 cm respectivamente, se llegaría al límite de 15% de MP en suelos bajo SD. Suelos con DA superiores a estos valores tendrían

problemas de aireación y crecimiento de raíces, así como de conductividad hídrica y retención de agua. Sin embargo, sería necesaria la evaluación de la resistencia a la penetración (RP) en suelos con estas densidades aparentes. Schmidt & Amiotti (2015) han reportado valores elevados de RP en suelos del sudoeste bonaerense con DA inferiores al límite aquí propuesto para la profundidad de 0-10 cm. El alto valor límite de DA en esta profundidad probablemente esté relacionado con el alto contenido de materia orgánica en superficie en suelos bajo SD, ya documentado en la bibliografía (Sasal *et al.*, 2006; Sá & Lal, 2009; López-Fando & Pardo, 2011). Las prácticas agrícolas deben tener como objetivo el mantenimiento de valores de DA inferiores a estos límites, ya que muchas veces las propiedades del subsuelo y no los sistemas de labranza, son las que ejercen el principal efecto sobre el crecimiento de las raíces de los cultivos (Micucci & Taboada, 2006).

Para la evaluación de la porosidad de aireación en suelos de diferentes texturas, Jones *et al.* (1991) definieron la aireación relativa (AR) como la relación entre el volumen de poros de aireación (macroporos) respecto a la porosidad total. Estos autores establecieron que cuando la AR es $\leq 38\%$, el crecimiento relativo de las raíces disminuye a valores inferiores al 80%. En nuestro estudio, los AN pre-sentaron una AR entre 34 y 58% en 0-10 cm, mientras que los lotes en producción presentaron una AR entre 25 y 44%. Así, el 53 y 70% de los lotes AG y los AN, respectivamente, tendrían una adecuada AR en esa profundidad. En subsuperficie, en cambio, todos los lotes bajo agricultura presentaron una AR menor a la establecida como adecuada para un buen desarrollo radical. En esta profundidad los AN también presentaron valores inferiores al límite en el 60% de los casos. De acuerdo a estos resultados, si bien los suelos de esta región tienden a una baja porosidad de aireación en subsuperficie, la producción agropecuaria ha promovido un descenso aún mayor de la macroporosidad y de la AR. Este descenso de la AR, aun en suelos bajo SD durante varios años, estaría actuando como limitante para el adecuado crecimiento radical de los cultivos. Según Micucci y Taboada (2006), la proporción de los macroporos es mayor en las texturas más gruesas, lo que daría lugar a mayor AR. Esta relación entre el contenido de arenas $> 100 \mu\text{m}$ y la AR se cumplió para las situaciones de ambiente no disturbado (Fig. 5). Sin embargo, en los lotes bajo producción no se

mantuvo dicha relación. Las diferentes relaciones encontradas para AN y AG, demuestran como el manejo agrícola en la región semiárida del sudoeste bonaerense ha cambiado las relaciones entre los componentes edáficos y las propiedades físicas del suelo. Mientras en los AN un mayor contenido de arenas $> 100 \mu\text{m}$ significa un aumento de la AR, en AG no se respeta dicha relación. En los lotes agrícolas si bien se observó una tendencia a mayor AR en 10-20 cm en suelos con alto contenido de arena $> 100 \mu\text{m}$, este aumento de la proporción de macroporos no sería suficiente para contrarrestar los problemas físicos debidos a la disminución de la macroporosidad y al aumento de la DA (Fig. 3). Además, en subsuperficie, aunque los suelos con mayor contenido de arenas $> 100 \mu\text{m}$ tendieron a una mayor AR, todos los sitios bajo cultivo presentaron una AR inferior al límite de 38%. Esta baja AR afectaría tanto el crecimiento y respiración de las raíces como la conductividad del agua.

CONCLUSIONES

Una gran proporción de los lotes muestreados en este trabajo, bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense, presentaron baja proporción de macroporos que limitaría el desarrollo de los cultivos, aún después de más de 12 años bajo SD. En el ambiente estudiado dichas limitaciones estarían presentes en todas las clases texturales evaluadas y serían más importantes en subsuperficie (10-20 cm).

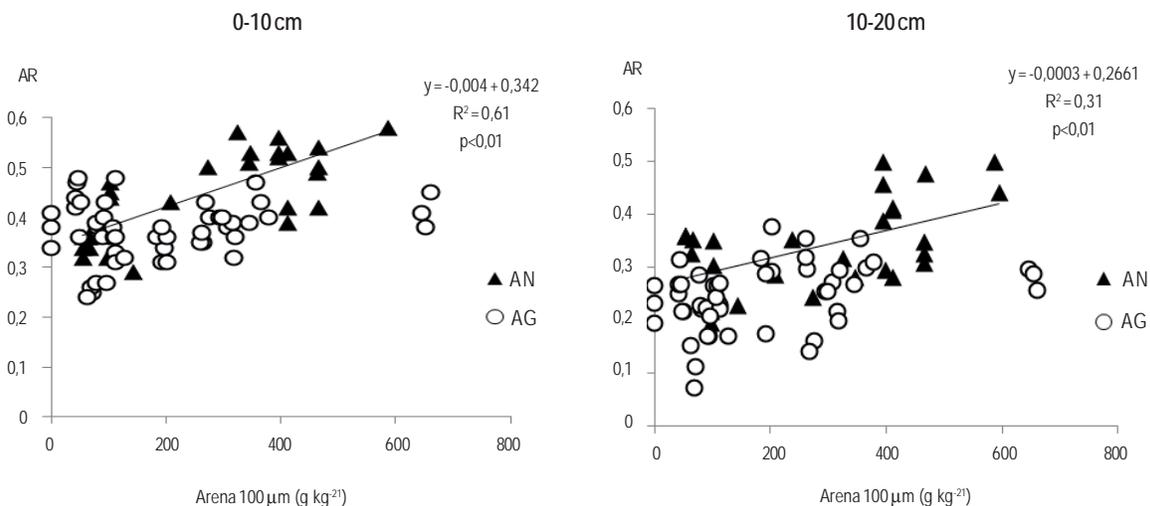


Figura 5. Regresión lineal entre el contenido de arena $> 100 \mu\text{m}$ y la aireación relativa (AR = Macroporos / Porosidad total) para superficie (0-10 cm) y subsuperficie (10-20 cm) en ambientes naturales (AN) y sitios bajo agricultura (AG).

Figure 5. Linear regression between sand $> 100 \mu\text{m}$ content and relative aeration (AR = macropores / total porosity) on surface (0-10 cm) and subsurface (10-20 cm) layers, in natural environments (AN) and agricultural sites (AG).

Si bien no es posible atribuirle dichas limitaciones al manejo bajo SD, es importante establecer que la SD por sí sola no fue capaz de asegurar buena calidad física en sub-superficie. Las mayores limitaciones se deben a una baja macroporosidad (poros > 30 μm) que limitaría la aireación del suelo y el crecimiento de raíces. Es necesario el desarrollo de prácticas de manejo del suelo que contribuyan a la regeneración biótica de la estructura, para asegurar una adecuada fertilidad física en subsuperficie en Ustoles bajo SD del sudoeste bonaerense.

AGRADECIMIENTOS

A los productores de la Regional Bahía Blanca de AAPRESID por permitirnos realizar el estudio en sus establecimientos, a la Ing. Agr. Erica S Schmidt por su ayuda desinteresada y a los revisores por sus valiosos aportes.

BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2012. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. www.aapresid.gov.ar (último acceso 01/10/2015).
- 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.
- Amiotti, NM; MB Villamil & RG Darmody. 2012. Agronomic and Taxonomic Consequences of Agricultural Use of Marginal Soils in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76(2): 558-568.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. In: Klute, A (ed), *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Agronomy, second ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 363-375.
- Bonel, BA; HJM Morrás & V Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23(1): 1-12.
- Bredja, JJ; MJ Mausbach; JJ Goebel; DL Allan; TH Dao; DL Karlen; TL Moorman & JL Smith. 2001. Estimating surface organic carbon content at regional scale using the national resource inventory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 842-849.
- Carter, MR. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- Chagas, CI; C Iruiria; J Thisted; OJ Santanoglia; MJ Massobrio; MC Castiglioni & A Buján. 2004. Movimiento horizontal y vertical de agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 22: 117-122.
- Cosentino, DJ & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- Cui, J & NM Holden. 2015. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil Till. Res.* 146: 32-38.
- Dexter, AR. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Di Rienzo JA; F Casanoves F; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Drewry, JJ. 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: a review. *Agric. Ecosys. Environ.* 114: 159-169.
- Drewry, JJ; KC Cameron & GD Buchan. 2008. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. *Aust. J. Soil Res.* 46: 237-256.
- Drewry, JJ & RJ Paton. 2005. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aust. J. Soil Res.* 43: 525-531.
- Ferreras, LA; JL Costa; FO García & C Pecorari. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrolcalcic Paleudoll of the southern «Pampa» of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 31-39.
- Ferreras, LA; Magra, G; Besson, P; Kovalevski, E & García, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25(2): 159-172.
- Galantini, JA & RA Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.
- Gee, GW & JW Bauder. 1986. Particle size analysis. In: Klute, A (ed), *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Agron. Monograph No. 9. 2nd ed. ASA, Madison WI, pp. 337-382.
- Glave, A. 2006. Influencia climática en el sudoeste bonaerense y sudeste de la pampa. En: www.produccion-animal.com.ar/clima_y_ambientacion/29_clima_sudoeste_bonaerense.pdf
- Gupta, VVSR; JJ Germida. 2015. Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes. *Soil Biology & Biochemistry* 80: A3-A9.
- Hamblin, AP. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95-158.
- Hamza, MA & WK Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82: 121-145.
- Hassink, J; LA Bouwman; KB Zwart & L Brussaard. 1993. Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* 25: 47-55.
- INTA-CIRN. 1989. Mapa de Suelos de la provincia de Buenos Aires, Escala 1:500.000. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina, 533 pp.
- Jones, RJA; G Spoor & AJ Thomasson. 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil Tillage Res.* 73: 131-143.
- Katuwal S; T Norgaard; P Moldrup; M Lamandé; D Wildenschild & LW de Jonge. 2015. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. *Geoderma* 238: 9-20.
- Kay, BD & AJ VandenBygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Tillage Res.* 66: 107-118.
- Kay, BD. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 12: 1-52.
- Kiehr, M; A Terenzi; R Delhey & M Cassano. 2008. Podredumbre de raíces de trigo pan, trigo fideo y cebada, causada por *Rhizoctonia solani* en el sur y sudoeste bonaerense. Actas del VII Congreso Nacional de Trigo (En CD).
- Kirby, M. 2007. Whither soil compaction research? *Soil Tillage Res.* 93: 472-475.
- Krüger, HR. 1996. Compactación en Haplustoles del sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 14: 104-106.

- Lal, R. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. USDA-The Ohio State University. SMSS Technical Monograph No. 21.
- Lal, R & MK Shukla. 2004. Principles of soil physics. Ed: CRC Press. 528 pp.
- Lipiec, J; J Arvidsson & E Murer. 2003. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil Till. Res.* 73: 15-29.
- López-Fando, C & MT Pardo. 2011. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. *Soil Tillage Res.* 111: 224-230.
- López, FM; ME Duval; JM Martínez & J Galantini. 2015. Cobertura en el sudoeste bonaerense en suelos bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 33(2): 273-281.
- McCormack, DE. 1987. Land evaluations that consider soil compaction. *Soil Tillage Res.* 10: 21-27.
- Micucci FG & Taboada MA. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 86: 152-162
- Olness, A; CE Clapp; R Liu & AJ Palazzo. 1998. Biosolids and their effects on soil properties. *In: Wallace, A., Terry, R.E. (eds), Handbook of Soil Conditioners.* Marcel Dekker, New York, NY, pp. 141-165.
- Oussible, M; RK Crookston & WE Larson. 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.* 84: 34-38.
- Pecorari, C; J Guerif & P Stengel. 1990. Fitolitos en los suelos pampeanos argentinos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de los mecanismos elementales de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8: 135-141.
- Quiroga, A; R Fernández; D Riestra; E Noellemeyer & N Peinemann. 2008. Influencia del manejo sobre la distribución del tamaño y la estabilidad de agregados en suelos influenciados por variaciones en la granulometría y contenidos de materia orgánica. *En: Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes.* (En CD).
- Quiroga, A; J Casagrande & J Colazo. 2009. Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en el este de San Luis. Eds. INTA Anguil, 66 pp.
- Quiroga, A; R Fernández; O Ormeño; E Manera & N Fuentes. 2007. Efectos del sistema de labranza y la ganadería sobre propiedades de un Haplustol Entico. *En: INTA, Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeana.* Publicación técnica 69, 90 pp.
- Reynolds, WD; CF Drury; XM Yang & CS Tan. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146: 466-474.
- Richard, G; I Cousin; JF Sillon; A Bruand & J Guérif. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 49-58.
- Rosolem, CA; JSS Foloni & CS Tiritan. 2002. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil Till. Res.* 65: 109-115.
- Sá, JCD & R Lal. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till. Res.* 103: 46-56.
- Sasal, MC & AE Andriulo. 2003. Comparación de dos métodos para determinar la distribución de la porosidad edáfica en dos sistemas de labranza. *Ciencia del suelo* 21(2): 74-77.
- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 87: 9-18.
- Schmidt, ES & NM Amiotti. 2015. Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la región pampeana semiárida sur. *Ciencia del Suelo* 33(1): 79-88.
- Senigagliesi, C & M Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *In: Buxton, DR; Shibles, R; RA Forsberg; BL Blad; BH Asay; GM Paulsen; RF Wilson (eds), International Crop Science I.* Crop Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 27-35.
- Silenzi, JC. 1998. Degradación antrópica y manejo sustentable de tierras (Sector Norte del Partido de Villarino, Bs. As.) M.S. thesis. Univ. Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Soane, BD; PS Blackwell; JW Dickson & DJ Painter. 1981. Compaction by agricultural vehicles: a review. 1. Soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.* 1: 207-237.
- Soil Science Society of America. 2008. Glossary of Soil Science Terms. Eds. Soil Science Society of America, 88 pp.
- Strudley, MW; TR Green & JC Ascoug. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Tillage Res.* 99: 4-48.
- Taboada, MA; FG 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 Tillage 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 loamy soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
- Topp, GC; WD Reynolds; FJ Cook; JM Kirby & MR Carter. 1997. Physical attributes of soil quality. *In: Gregorich, EG & MR Carter (eds). Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health.* Developments in Soil Science, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 21-58.
- Van Ouwerkerk, C & BD Soane. 1994. Conclusions and recommendations for further research on soil compaction in crop production. *In: Soane, BD & C Van, Ouwerkerk (eds). Soil Compaction in Crop Production.* Elsevier, Amsterdam, pp. 627-642.
- Van den Akker JJH & A Canarache. 2001. Two European concerted actions on subsoil compaction. *Land Use and Development.* Vol. 42: 15-22.
- Venanzi, S; A Vallati & H Krüger. 2002. Crecimiento temprano en trigo en función de la densidad aparente del suelo. *En: <http://www.agrositio.com/vertext/vertext.asp?id=75010&se=19>* (último ingreso 16-7-2015)
- Wiebe, KD. 2003. Land quality, agricultural productivity, and food security: Biophysical processes and economic choices at local, regional, and global levels. Edward Elgar Publ., Northampton, MA.
- Zilio, J. 2015. Aspectos de calidad de suelos representativos del sur de la provincia de Buenos Aires y efectos de la actividad agropecuaria sobre la misma. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur, 100 pp.