

Evaluación de la calidad física de los suelos de la región pampeana: efecto de las prácticas de manejo

Evaluation of the physical quality of soils in the pampas region: effect of management practices

DUVAL, Matias Ezequiel¹; GALANTINI, Juan Alberto²; MARTÍNEZ, Juan Manuel¹; LÓPEZ, Fernando Manuel¹; WALL, Luis Gabriel³

¹CONICET, Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía

²CERZOS (UNS-CONICET)-Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur. Comisión de Investigaciones Científicas, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

³Laboratorio de Bioquímica, Microbiología e Interacciones Biológicas en el Suelo, Departamento de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de Quilmes, Argentina. mduval@criba.edu.ar

Resumen

La adopción de la siembra directa (SD) ha aumentado a nivel mundial durante las últimas décadas y particularmente en Argentina, aunque a veces existen dudas en cuanto al efecto que puede producir sobre las propiedades físicas del suelo. Por ello, se evaluaron los cambios debidos al uso e intensidades de manejo sobre algunos parámetros del suelo asociados con la porosidad y almacenamiento de agua en cuatro sitios de la Pampa Argentina. En cada sitio, se seleccionaron lotes con diferentes manejos agrícolas (Buenas Prácticas -BP- y Malas Prácticas -MP-) y un natural (Ambiente Natural -AN-). Los menores niveles de carbono orgánico total (COT) por efecto de las prácticas agrícolas causaron una disminución de la porosidad total de los suelos, reflejándose principalmente en el menor volumen de macroporos (>30 µm), los cuales disminuyeron un 12% en promedio. El uso agrícola generó una compactación, aunque no crítica, a expensas de una disminución de los macroporos, mientras diferencias entre BP y MP estuvieron influenciadas por el tipo de suelo analizado. En relación al tipo de suelo, los Argiudoles (suelos limosos), fueron más vulnerables a la intensificación agrícola aumentando los procesos de degradación por compactación. El COT y el IEE fueron las únicas variables donde se observaron valores inferiores al óptimo en los tratamientos agrícolas. Debido a la estrecha relación entre las propiedades físicas y el IEE, este último puede ser útil para evaluar el impacto de diferentes usos e intensidades de manejo sobre la calidad física de los suelos, donde valores <6,13 pueden generar problemas de compactación.

Palabras claves: siembra directa-macroporos-índice de estabilidad estructural

Introducción

Los suelos agrícolas con “buena calidad física” se caracterizan por ser lo suficientemente resistentes como para mantener una buena estructura y mantener cultivos en posición vertical, pero también lo suficientemente frágiles como para permitir la proliferación óptima de raíces, flora y fauna del suelo (Reynolds *et al.*, 2002). En la Región Pampeana, en las últimas décadas, la intensificación del uso agrícola causó efectos negativos en los suelos, como la pérdida de fertilidad, alteraciones en los procesos biológicos, disminución en el contenido de carbono orgánico total (COT), disminución en la disponibilidad de nutrientes y cambios en su estructura (Ferrerías *et al.*, 2007). La adopción de la siembra directa (SD) ha aumentado a nivel mundial durante las últimas décadas. En nuestro país, más de 27 millones de hectáreas se cultivan con este sistema, abarcando

Summary

The adoption of no tillage (NT) has increased worldwide in recent decades and particularly in Argentina, although sometimes doubts have been raised about its effect on soil physical properties. The objective of this work was to evaluate changes due to the use and management intensities on some parameters associated with soil porosity and water storage in four sites in the Argentinian Pampas. At each site, farmer's fields with different agricultural types of management (Good Practices -GP- and Poor Practices -PP) and natural (Natural Environment -NE) were selected. The lowest levels of total organic carbon (TOC) as a result of agricultural practices caused a decrease in soil total porosity, mainly reflected in a lower volume of macropores (>30 µm), which decreased by 12% on average. Agricultural use resulted in soil compaction, although not critical, at the expense of a decrease of macropores, while differences between GP and PP were influenced by soil type. Regarding the type of soil, Argiudolls (silty soils), were more vulnerable to agricultural intensification, which increased degradation processes by compaction. The TOC and structural stability index (SSI) were the only variables where values lower than optimal in agricultural treatment were observed. Due to the clear relationship between physical properties and the SSI, the latter can be useful for assessing the impact of different uses and management intensities on the soil physical quality, where values <6.13 can cause compaction problems.

Key words: no tillage-macropores-structural stability index

más del 75% del área cultivada (AAPRESID, 2012). La SD es una alternativa para reducir el riesgo de erosión y la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo (Lal, 2000). Existe amplio consenso en cuanto a que el aumento del COT bajo SD, mejora la estabilidad estructural del suelo, facilita los flujos del aire y el agua, promueve la retención de agua, y reduce la erosión (Gregorich *et al.*, 1994). Sin embargo, también se ha visto que las propiedades físicas del suelo no siempre evolucionan positivamente bajo SD continua (Strudley *et al.*, 2008; Taboada *et al.*, 2008; Schmidt & Amiotti, 2015).

El suelo es considerado un recurso no renovable muy importante a nivel mundial y, por lo tanto, es necesario identificar indicadores de

calidad de suelos sensibles a los cambios durante largos períodos de agricultura continua. Es necesario identificar y cuantificar las variables particulares de cada ambiente, a fin de evaluar los cambios que suceden en el corto y largo plazo, como consecuencia de las prácticas de manejo que se aplican (Gregorich *et al.*, 1997). En la actualidad existe un gran número de trabajos donde se trata de establecer un conjunto coherente y formal de indicadores de calidad física de suelos (Álvarez *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 2013; Mota *et al.*, 2014). Sin embargo, a escala global, valores críticos o rangos de indicadores de calidad física de suelos aún no se conocen (Arshad & Martin, 2002), aunque se han propuesto diversas "guías" en producción agrícola (Reynolds *et al.*, 2002; Drewry & Paton, 2005). Sin embargo, es cada vez más evidente que, la densidad aparente (DA), el equilibrio en el tamaño de poros vinculados a la dinámica del agua y el contenido de COT forman componentes claves de cualquier parámetro integrador o conjunto de parámetros que indican la calidad física del suelo.

La DA se utiliza a menudo en los estudios de calidad de suelos como un indicador de la resistencia mecánica del suelo para el crecimiento de raíces. En suelos de textura fina, el rango óptimo de DA para la producción agrícola se encuentra entre 0,9 a 1,2 Mg m⁻³. Valores de DA <0,9 Mg m⁻³ pueden proporcionar insuficiente contacto raíz-suelo y disminuir la retención de agua, mientras que los valores DA >1,2 Mg m⁻³ pueden impedir la elongación de la raíz o reducir la aireación del suelo (Reynolds *et al.*, 2003; Drewry & Paton, 2005; Drewry, 2006). En la Región Pampeana se han fijado valores críticos de DA de 1,37 y 1,44 Mg m⁻³ para Vertisoles y Molisoles, respectivamente, por encima de los cuales se observaron reducciones en el desarrollo radicular del cultivo de trigo (Wilson *et al.*, 2013).

La porosidad del suelo desempeña un papel fundamental en la productividad biológica e hidrología de los suelos agrícolas. Mediciones de porosidad se están utilizando más frecuentemente para cuantificar los cambios estructurales del suelo después de las actividades agrícolas. El volumen total de poros, su distribución por tamaño, conectividad y tortuosidad determinan la entrada, circulación y retención de agua, la disponibilidad de oxígeno y la resistencia mecánica del suelo a la penetración de las raíces, entre otros procesos (Dexter *et al.*, 2008). En consecuencia, la degradación del sistema de poros del suelo puede causar una disminución en la producción de cultivos, favorecer la escorrentía superficial del agua y conducir a la pérdida de suelo por erosión (Botta *et al.*, 2007).

La entrada de agua a través de la superficie del suelo se lleva a cabo principalmente por macroporos, a pesar de que éstos constituyen una pequeña proporción de la porosidad total (Moret & Arrúe, 2007). En general, los macroporos representan la fracción que se destruye primero cuando el suelo es físicamente degradado debido al tránsito por maquinarias o al pisoteo animal (Botta *et al.*, 2004). Kay & VandenBygaart (2002) proponen un sistema de clasificación de poros relativamente simple, con tres clases (macro, meso y microporos) que se distinguen en su relación funcional con el agua del suelo. Una adecuada proporción de poros menores de 10 µm son necesarios para almacenar agua, mientras que también una proporción de macroporos mayores de 100 µm (mayor al 10%) son necesarios para la captación del agua, el desarrollo raíces y el intercambio gaseoso. Otros autores consideran que un volumen de macroporos mayor de 0,10 m³ m⁻³ (>50 µm) es aceptable, mientras que valores inferiores de 0,05 m³ m⁻³ es restrictivo para los cultivos (Pilatti & de Orellana, 2000).

Otros parámetros que se utilizan a menudo como indicadores (o indicadores potenciales) de la calidad física del suelo son la capacidad de aire (CA), la capacidad de agua útil (CAU) y la capacidad de campo relativa (CCR). La CA es un indicador útil de

aireación del suelo. Una CA ≥0,10 m³ m⁻³ se recomienda para no sufrir reducciones del rendimiento por déficit de aireación en la zona radicular de los cultivos (White, 2006), sin embargo, trabajos más recientes indican una CA ≥0,14 m³ m⁻³ necesaria en suelos franco arenosos a franco arcillosos (White, 2006; Pilatti *et al.*, 2012). La CAU indica la capacidad del suelo de almacenar y proporcionar agua que esté disponible para las raíces de las plantas. Valores de CAU ≥0,20 m³ m⁻³ a menudo se considera "ideal" para el máximo crecimiento y función de las raíces (Cockroft & Olsson, 1997), siendo "bueno" si los valores se encuentran entre 0,15 y 0,20 m³ m⁻³, "limitado" entre 0,10 y 0,15 m³ m⁻³, y "malo" con CAU ≤0,10 m³ m⁻³ (White, 2006). La CCR indica la capacidad del suelo para almacenar agua y aire con respecto al volumen total de poros del suelo. Para suelos agrícolas, se produce un equilibrio óptimo entre la capacidad de agua y la capacidad de aire del suelo en la zona radicular entre 0,6-0,7 (Doran *et al.*, 1990). La premisa fundamental de este criterio es que los suelos de secano con 0,6 ≤ CCR ≤ 0,7 tendrán probablemente deseables contenido de agua y aire (máxima actividad microbiana) con mayor frecuencia y por períodos de tiempo más largos que los suelos que tienen proporciones mayores o menores (Reynolds *et al.*, 2002).

El contenido de COT es considerado uno de los principales indicadores de la calidad química y biológica del suelo (Bolinder *et al.*, 1999; Noellemeyer *et al.*, 2006). Sin embargo, también presenta efectos indirectos sobre la calidad física del suelo (Gregorich *et al.*, 1997; Shukla *et al.*, 2006). El COT es importante en el mantenimiento de la estabilidad estructural del suelo, ayudando a la infiltración del aire y el agua, promover la retención de agua, y reducir la erosión (Gregorich *et al.*, 1994), por lo tanto, la pérdida de COT por el cultivo, en general, se relaciona con un aumento de la DA y una disminución de la porosidad, reduciendo de ese modo la infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua y aire (Franzluebbers, 2002; Celik, 2005). Existe un rango óptimo de COT de 30-50 g kg⁻¹ para suelos de textura media, con un valor crítico inferior de 20 g kg⁻¹, por debajo del cual puede ocurrir deterioro de la estructura por labranzas (Greenland, 1981), y un valor crítico superior de 60 g kg⁻¹ por encima del cual, el suelo puede ser propenso tanto a la compactación como a la absorción de plaguicidas (Sojka & Upchurch, 1999). Sin embargo, desde el punto de vista de calidad y fertilidad del suelo, un contenido de COT dado puede ser considerado bajo, medio o alto, dependiendo del contenido de arcilla del suelo. Es decir, un contenido óptimo de COT está íntimamente asociado al contenido de materiales finos (Quiroga *et al.*, 2001). Por tal motivo, con el fin de minimizar los efectos de variaciones en la textura, puede resultar adecuado el uso del índice propuesto por Pieri (1995) que relacionan la materia orgánica con el contenido de limo y arcilla del suelo [MO/(L+a)]. El autor lo propone como un índice de riesgo de degradación estructural de suelos cultivados. Valores de IEE >9% indica estructura estable, entre 9-7% indica bajo riesgo de degradación estructural, entre 7-5% indica alto riesgo de degradación, y IEE ≤5% indica suelos estructuralmente degradados. En la Región Semiárida Pampeana, valores promedio de 3,6 se han obtenido para suelos agrícolas mientras que valores de 7,5 se encontraron en ambientes naturales (Quiroga *et al.*, 2006).

La evaluación conjunta de indicadores físicos, junto con procesos y propiedades químicas y biológicas pueden ser útiles para cuantificar cambios en la calidad de suelos debido a diversas prácticas de manejo (Karlen, 2004). En la actualidad, el reto es encontrar métodos de producción agrícola que aseguren una alta productividad y, al mismo tiempo, preservar la salud del medio ambiente. Con el fin de alcanzar este objetivo, es necesario disponer de indicadores que detecten tempranamente la degradación de los suelos, especialmente del sistema poroso debido a su impacto en las funciones esenciales que cumplen en el suelo (Kay & VandenBygaart, 2002).

Para corroborar que el aumento de la intensidad de cultivo (Buenas prácticas agrícolas) se correlaciona con una mejora en las propiedades físicas del suelo, los objetivos planteados fueron: (I) Evaluar los cambios debidos al sistema de manejo sobre la porosidad, distribu-

ción de tamaño de poros, densidad aparente, y agua útil del suelo, (II) comparar los valores determinados con los valores "ideales", "óptimos" y "críticos" propuestos en la literatura, y con los niveles de referencia bajo condiciones "naturales".

Materiales y Métodos

Sitios de estudio

Se seleccionaron cuatro sitios de estudio con historia documentada bajo SD en la región más productiva en la Pampa Argentina con diferentes condiciones climáticas y de suelo (INTA, 1974-1997). Los sitios de estudio se encuentran en Bengolea (Córdoba, 33° 01' 32,9"S, 63° 37' 36,4" O), Monte Buey (Córdoba, 32° 58' 17,0" S, 62° 27' 02,4" O), Pergamino (Buenos Aires, 33° 56' 42,6" S, 60° 33' 35,6" O) y Viale (Entre Ríos, 31° 52' 42,2" S, 59° 41' 16,2" O). El suelo en Bengolea es un Haplustol Éntico de textura franco arenosa (arena: 575 g kg⁻¹, limo: 295 g kg⁻¹, arcilla: 130 g kg⁻¹ en 0-20 cm), se encuentra ubicado en el Piedemonte pampeano, donde la precipitación media anual es de 870 mm. El suelo en Monte Buey es un Argiudol Típico de textura franco limosa (arena: 191 g kg⁻¹, limo: 575 g kg⁻¹, arcilla: 234 g kg⁻¹ en 0-20 cm), situado en un área de baja pendiente en el límite entre el Piedemonte de las sierras de Córdoba y la Pampa Ondulada, donde la precipitación media anual es de 910 mm. El suelo en Pergamino es un Argiudol Típico de textura franco limosa (arena: 180 g kg⁻¹, limo: 605 g kg⁻¹, arcilla: 215 g kg⁻¹ en 0-20 cm), localizado en la Pampa Ondulada donde las redes de drenaje son bien definidas y el relieve es levemente ondulado (gradientes de hasta 5%), la precipitación es ligeramente mayor que en el sitio anterior (1.000 mm). El suelo en Viale es un Hapludert Típico de textura franco arcillo limosa (arena: 27 g kg⁻¹, limo: 572 g kg⁻¹, arcilla: 401 g kg⁻¹ en 0-20 cm), donde el sistema de drenaje está fuertemente desarrollado y con un paisaje ondulado, con pendientes algo mayores que en Pergamino, es el sitio con las mayores precipitaciones (1.160 mm).

Tratamientos

Debido a la dificultad para establecer réplicas estrictas de las prácticas de manejo en lotes productivos se adoptó el criterio descrito por el programa de Certificación de Buenas Prácticas Agrícolas de AAPRESID (<http://www.aapresid.org.ar/ac/buenas-practicas-agricolas>) y los lineamientos de las Buenas Prácticas Agrícolas desarrollados por la FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) (www.fao.org/prods/GAP/index_en.htm). De este modo en cada sitio, se definieron tres tratamientos:

1. "Buenas Prácticas Agrícolas" (BP), lotes de productores con manejo agrícola sostenible bajo SD, con rotación intensiva de cultivos de invierno, trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare*) y de verano, soja (*Glycine max* L. Merr.), maíz (*Zea mays* L.) o sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) y, en ciertas ocasiones, incluyendo cultivos de cobertura, como vicia (*Vicia sativa* L.) y triticale (*Triticum aestivum*). La reposición de nutrientes se realiza en base a las necesidades de los cultivos, minimizando el uso de agroquímicos (herbicidas, insecticidas y fungicidas) (Tabla 1).
2. "Malas Prácticas Agrícolas" (MP), lotes de productores con manejo agrícola no sostenible bajo SD con mínima rotación o monocultivo de soja (*Glycine max* [L.] Merr.), mínima reposición de nutrientes y alto uso de agroquímicos (herbicidas, insecticidas y fungicidas) (Tabla 1).
3. "Ambiente Natural" (AN), situaciones sin uso antrópico como referencia, se seleccionaron pastizales naturales, cerca de los tratamientos agrícolas (menos de 5 km), donde se hayan alcanzado los equilibrios entre las diferentes fracciones orgánicas por ello, los sectores seleccionados presentaban más de 30 años sin ningún tipo de disturbio.

Toma de muestras

El muestreo se limitó a los primeros 10 cm del perfil del suelo. La razón de dicha profundidad de muestreo fue debido a que en una gran cantidad de estudios se ha encontrado que la mayoría de las respuestas de calidad física del suelo a las actividades antropogénicas (pisoteo animal, cultivos, labranzas) se producen en los primeros 5 a 15 cm del perfil del suelo (Drewry, 2006; Reynolds *et al.*, 2008). Para cada combinación de sitio y tratamiento se recolectaron, al azar, 9 cilindros sin disturbar de suelo (4,8 cm de diámetro y 10 cm de altura). Las muestras fueron tomadas en Febrero del 2010, momento en el que todos los lotes agrícolas presentaban cultivos de verano: Bengolea: BP (soja), MP (maíz), Monte Buey: BP (soja), MP (soja), Pergamino: BP (maíz), MP (soja) y Viale: BP (maíz), MP (soja). El contenido de humedad de los suelos al momento del muestreo osciló entre 155-186 g kg⁻¹ para los suelos de textura gruesa (Bengolea) y 174-295 g kg⁻¹ para los de textura más fina (Monte Buey, Pergamino y Viale), los cuales resultaron adecuados para no generar disturbio de las muestras y, de esta manera se conservó la estructura intacta del suelo.

Determinaciones físicas

Las propiedades físicas del suelo se determinaron secuencialmente. En primer lugar, las muestras de suelo fueron saturadas en forma incremental desde la parte inferior a lo largo de un período de 48 horas usando agua corriente a temperatura ambiente. A partir del estado de saturación previo al inicio de las medidas, se determinó el contenido hídrico (Θ_s) siguiendo la metodología de humectación indicada por Klute (1986). Luego, las muestras fueron sometidas a los potenciales de interés. Para ello se aplicó una presión de 33 kPa, equivalentes a -3,3 m de carga hidráulica (h), empleando el equipo clásico de olla de presión. Posteriormente, las muestras no disturbadas se secaron en estufa a 105°C durante 24 h, hasta peso constante, y se calculó su relación masa/volumen a fin de obtener los valores correspondientes de DA (Tabla 2) (Blake & Hartge, 1986). A su vez, para evaluar el grado de compactación se calculó la DA crítica siguiendo la propuesta de Pilatti & de Orellana (2000) (Tabla 2).

Sobre las muestras tamizadas por 2 mm se realizó la determinación del punto de marchitez permanente (PMP) a través de membrana de presión (1.500 kPa) (Richards, 1947), utilizando anillos de 5 cm de diámetro por 1 cm de altura. Se realizaron las curvas de retención hídrica y se calculó el contenido de agua a capacidad de campo (CC), PMP, CAU y porosidad total (PT).

Si bien en la literatura existe numerosos tipos de clasificaciones de tamaños de poros, en este caso se utilizó un sistema relativamente simple, aplicado previamente por Iglesias *et al.* (1996) y Kay & Vanden Bygaart (2002), en el que se divide en tres clases principales en base a sus diferencias funcionales (macro, meso y microporos). Los tamaños de poro correspondientes a diferentes presiones se estimaron utilizando la fórmula ascenso capilar (Ecuación 1) (Danielson & Sutherland, 1986), el diámetro efectivo de poro (d) se estimó como:

$$d = \frac{-30,0 \times 10^{-6}}{h}$$

donde h = tensión del agua retenida expresada en columna de agua (m).

Tabla 1: Descripción del manejo y los rendimientos de los cultivos agrícolas promedios de los últimos 5 años (2005-2009).

| Características | Bengolea | | Monte Buey | | Pergamino | | Viale | |
|---|----------|-------|------------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | BP | MP | BP | MP | BP | MP | BP | MP |
| % de SD | 100 | 80 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Relación soja/maíz ^(a) | 1,5 | 4 | 0,67 | 4 | 1,5 | 5 | 1,5 | 4 |
| % inviernos con trigo ^(b) | 60 | 40 | 60 | 20 | 10 | 0 | 40 | 20 |
| % invierno con cultivo de cobertura ^(c) | 20 | 0 | 40 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| Fertilización N-P (kg ha ⁻¹ año ⁻¹) ^(d) | 68-18 | 3-3 | 64-18 | 17-5 | 41-17 | 7-31 | 64-27 | 34-23 |
| Índice de rotación ^(e) | 0,75 | 0,55 | 0,79 | 0,55 | 0,63 | 0,42 | 0,67 | 0,58 |
| Rendimiento soja (kg ha ⁻¹) | 3.067 | 2.775 | 3.167 | 2.675 | 2.933 | 2.885 | 3.000 | 1.850 |
| Rendimiento maíz (kg ha ⁻¹) | 10.500 | 2.700 | 12.550 | 8.000 | 9.500 | - | 7.030 | 3.450 |

BP: Buenas Prácticas, MP: Malas Prácticas.

^a Número de cultivos de soja en relación al número de cultivos de maíz en los últimos 5 años.

^b Porcentaje de inviernos ocupados con trigo.

^c Porcentaje de inviernos ocupados con cultivos de cobertura (*Vicia* sp., *Melilotus alba* o *Lolium perenne*).

^d Calculado como kilos de N y P (elemento) aplicados por hectárea por año.

^e Calculado como el cociente entre el N° de meses con cultivo y el N° de meses totales (Sasal *et al.*, 2010).

De este modo, se calculó el volumen de poro correspondiente a los siguientes tamaños: macroporos (Mp) mayores a 9 µm involucrados en la aireación, infiltración, conductividad saturada, mesoporos (mP) entre 9-0,2 µm que contienen el agua útil para las plantas y los microporos (µP) menor a 0,2 µm, los cuales contienen el agua no disponible.

Carbono orgánico total y fraccionamiento físico

Sobre las muestras secas y tamizadas por 2 mm se determinó carbono orgánico total mediante combustión seca utilizando Analizador de carbono LECO CR12 (LECO, St. Joseph, MI, EE.UU.). El fraccionamiento granulométrico del COT se llevó a cabo mediante tamizado en húmedo del suelo (Cambardella & Elliott, 1992; Duval *et al.*, 2013). Básicamente, 50 g de suelo seco y tamizado se dispersó en recipientes de vidrio de 120 mL con 100 mL de agua destilada. Además, se agregaron diez bolitas de vidrio (5 mm de diámetro) para incrementar la destrucción de los agregados y reducir posibles problemas creados por diferentes contenidos de arena (Elliott & Cambardella, 1991). El tamizado se realizó con tamices de 53 µm y 105 µm de abertura de malla. De esta manera se obtuvieron tres fracciones con características diferentes, fracción gruesa (FG, 105-2000 µm) en la que se encuentra el carbono orgánico particulado grueso (COP_g) y las

arenas medias y gruesas; fracción media (FM, 53-105 µm) constituida por el carbono orgánico particulado fino (COP_f) y las arenas muy finas; y la fracción fina (FF < 53 µm) la cual contiene el carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) más limo y arcilla. Los contenidos de C en las fracción gruesa y media se determinaron utilizando la misma metodología que para el COT, mientras que el COM se calculó por diferencia entre el COT y el COP (grueso + fino).

Sobre las muestras secas también se determinó textura por el método de la pipeta (Gee & Bauder, 1986). Utilizando los valores de limo + arcilla y el COT se calculó el índice de estabilidad estructural (IEE) según lo propuesto por Pieri (1992) (Tabla 2)

Análisis estadístico

Los parámetros de calidad física del suelo fueron comparados entre los tratamientos (AN, BP, MP) en cada sitio (Bengolea, Monte Buey, Pergamino y Viale), y en el caso de no existir interacción Sitio x Tratamiento, se analizaron los tratamientos utilizando los sitios como réplicas. Se realizaron regresiones lineales, no lineales y múltiples para analizar la asociación entre variables utilizando software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013).

Tabla 2: Propiedades e índices físicos y sus ecuaciones utilizados para evaluar los tratamientos.

| Propiedad | Ecuación | Unidades |
|---|--|--------------------------------|
| Densidad aparente (DA) | M_{sse}/V_t | Mg m ⁻³ |
| Densidad aparente crítica (DA _c) | $1,52-0,0065*(\%Arcilla)$ | Mg m ⁻³ |
| Densidad aparente máxima (DA _{max}) | $1.766-0.00598*(\%Limo)-0.0158*(\%COT)$ | Mg m ⁻³ |
| Compactación relativa (CR) | $(DA/DA_{max})*100$ | % |
| Macroporos (Mp) | $\theta_s - \theta_{CC}$ | m ³ m ⁻³ |
| Mesoporos (mP) | $[\theta_s - \theta_{PMP}] - [\theta_s - \theta_{CC}]$ | m ³ m ⁻³ |
| Microporos (µP) | θ_{PMP} | m ³ m ⁻³ |
| Porosidad total (PT) | $[(\theta_s - M_{sse})/M_{sse}]*100$ | m ³ m ⁻³ |
| Índice de estabilidad estructural (IEE) | $[(1,72*(\%COT) / \%L+a)]*100$ | -- |
| Capacidad de agua útil (CAU) | $\theta_{CC} - \theta_{PMP}$ | mm |
| Capacidad de campo relativa (CCR) | θ_{CC}/θ_s | -- |
| Capacidad de aire (CA) | $\theta_s - \theta_{CC}$ | m ³ m ⁻³ |

M_{sse}, masa del suelo seco (105°C); V_t volumen total del suelo; θ_s, contenido volumétrico de agua del suelo saturado; θ_{cc}, contenido volumétrico de agua del suelo a capacidad de campo (33 kPa); θ_{pmp}, contenido volumétrico de agua del suelo a punto de marchitez permanente (1.500 kPa); Da, densidad aparente del agua.

Resultados y Discusión

Densidad aparente

Se encontraron efectos significativos tanto de los sitios ($p < 0,001$) como de los tratamientos ($p < 0,01$) e interacción significativa ($p < 0,05$) en los valores de DA (Tabla 3). Los valores más bajos se observaron en AN, aunque no siempre diferenciándose estadísticamente de los tratamientos agrícolas. Los valores promedio de DA fueron de 1,12, 1,23 y 1,22 Mg m^{-3} para AN, BP y MP, respectivamente (Tabla 3). Se observaron efectos diferentes de las prácticas agrícolas sobre la DA. El sitio Pergamino fue la única situación donde se encontraron diferencias significativas, con valores superiores hallados en BP respecto a MP. Un efecto similar, aunque no significativo se observó en Monte Buey, mientras que en Bengolea y Viale se observaron valores inferiores en BP aunque no fueron significativos (Tabla 3). La acumulación de residuos vegetales en la capa superficial del suelo modifica el medio físico mejorando las condiciones estructurales y espacio poroso del suelo (Carter, 2002), evitando el aumento de la DA por el tránsito de la maquinaria. Este efecto se observó en AN, encontrándose menores valores de DA que en las situaciones agrícolas como consecuencia directa de los mayores niveles de COT y la ausencia de compactación por el tránsito de maquinaria. En este sentido, Reynolds et al. (2002), en suelos con diferentes texturas, encontraron mayor DA en situaciones de cultivos bajo SD respecto de situaciones de referencia (cuasi-prístina). Hamza & Anderson (2005) relacionaron el incremento de la DA de la capa superficial en los sistemas bajo SD con la mayor intensidad de tránsito de maquinaria en operaciones de siembra. Por lo tanto, los mayores valores de DA observados en las situaciones agrícolas, en relación con AN, puede atribuirse a una combinación de efectos por menores niveles de COT y compactación por tránsito de maquinaria.

A su vez, en Monte Buey y Pergamino, con una mayor proporción de limo en los suelos (575 y 605 g kg^{-1} , respectivamente), potenció los efectos del tránsito de la maquinaria y produjo una mayor compactación verificado en los valores de DA (1,22 y 1,36 Mg m^{-3} , respectivamente). Así, un mayor número de pasadas de maquinaria, puede ocasionar síntomas de compactación como los observados en BP. Este aumento en la DA tuvo efecto principalmente sobre la macroporosidad del suelo, observándose relaciones negativas de la DA y los Mp, los cuales a su vez se relacionaron negativamente con el contenido de limo de los suelos (Tabla 5), afirmando lo anteriormente mencionado en los sitios de Monte Buey y Pergamino. Mejorar las propiedades físicas por cambios en el manejo presentan escasa respuesta en los suelos franco-limosos (Taboada et al., 2008), debido a la baja resiliencia de la porosidad estructural de estos suelos (Varela et al., 2011). Por lo tanto, la mayor intensificación agrícola en BP, dada por la mayor frecuencia de cultivos (Tabla 1), con el consecuente mayor tránsito de maquinaria puede ser el motivo de los valores más elevados de DA tanto en Monte Buey como Pergamino.

Los valores de DA_c , calculados a partir de los contenidos de arcilla, presentaron diferencias significativas entre sitios observándose valores de 1,24, 1,33, 1,38 y 1,44 Mg m^{-3} en Viale, Monte Buey, Pergamino y Bengolea, respectivamente. Estos valores coinciden con los observados por Álvarez et al. (2009) y Pilatti & de Orellana (2000), como valores límite para los Molisoles franco-limosos de la Región Pampeana. Si bien, en relación con AN, los manejos agrícolas presentan un aumento de la DA, al comparar con los valores óptimos citados en la literatura, únicamente el tratamiento BP de Monte Buey se encuentra por encima del valor máximo.

El uso de CR se ha sugerido para superar limitaciones de la compactación de DA entre diferentes tipos de suelo (Lipiec & Hatano, 2003). Dicha estimación deriva de la relación entre DA y DA_{max} , expresada en porcentaje (Tabla 2). Al igual que DA, la DA_{max} fue

afectada de manera significativa por los sitios (Bengolea > Monte Buey > Viale > Pergamino) y los tratamientos (AN = MP < BP) (Tabla 3). En general, suelos con valores de CR de 75 al 87% producen rendimientos óptimos para diferentes cultivos y suelos, mientras que valores superiores al 90% comienzan a generar efectos negativos sobre los cultivos (Carter, 1990). Los valores medios de CR observados en AN fueron siempre muy por debajo de este umbral (Tabla 3). Dentro de los manejos agrícolas, MP presentó valores cercanos o por encima del umbral crítico en Monte Buey, Pergamino y Viale; mientras que en BP se encontraron valores por encima del umbral en Monte Buey y Pergamino. Estos resultados reflejan la existencia de problemas de compactación superficial, principalmente en aquellos suelos con mayor proporción de limo, independientemente del manejo agrícola.

Capacidad de aire

La CA mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), sitios ($p < 0,001$) e interacción no significativa ($p = 0,31$). Los valores promedio de CA para los tratamientos AN fueron 0,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, muy por encima del mínimo propuesto de 0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para aireación adecuada de suelos franco arcillosos (Tabla 3). A su vez, los valores de CA fueron mayores en AN, hallando diferencias significativas solo con BP (Tabla 3, promedio). Si bien, los sitios agrícolas presentaron un ligero descenso en la aireación del suelo, la misma estuvo por encima del valor umbral de 0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ considerado necesario en suelos de textura fina para compensar las demandas de oxígeno por la actividad biológica y no generar limitaciones en la producción de cultivos (Drewry & Paton, 2005; Drewry, 2006). Por lo tanto, ningún tratamiento fue sensible a déficits de aireación en 0-10 cm, no hallando diferencias entre prácticas agrícolas.

Capacidad de campo relativa

La CCR mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), sitios ($p < 0,001$) e interacción no significativa ($p = 0,28$). Una característica importante del rango óptimo de CCR es que presenta independencia tanto de la textura del suelo, el contenido de COT y la DA y, de este modo, se aplica a la mayoría de los suelos (Doran et al., 1990). En promedio, para todos los tratamientos, los valores de CCR se encuentran dentro del rango óptimo (0,6-0,7) para la máxima actividad microbiana del suelo. Sin embargo, en Bengolea los valores de CCR fueron menores al límite inferior de dicho rango, lo cual hace que se reduzca la actividad microbiana debido a insuficiente humedad del suelo (Linn & Doran, 1984). Los suelos de Bengolea se caracterizan por ser de textura gruesa (Tabla 1), por lo tanto, son suelos que tienen baja capacidad de retención de agua, principal limitante de éste sitio, afirmando los menores valores de CCR.

Capacidad de agua útil

Los valores de CAU, en promedio, se encontraron dentro del rango considerado "ideal" en los tratamientos agrícolas ($> 0,20 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) y "bueno" en AN (0,15-0,20 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), según Cockroft & Olsson (1997), para maximizar el crecimiento y funcionamiento de las raíces en suelos de texturas medias y finas. Se observaron diferencias significativas entre AN y los manejos agrícolas a favor de éstos últimos.

El contenido de agua de PMP está determinado principalmente por el contenido de arcilla (Brady, 1974), mientras el contenido de agua en CC, está determinada por una interacción compleja entre contenido de arcilla, estructura del suelo, DA, y COT (Olness et al., 1998). En este estudio, utilizando regresiones múltiples, las variables COT y fracción fina (limo + arcilla) explicaron el 71% de la variabilidad de los contenidos de agua en PMP, mientras que las variables COT, L+a y macroporosidad ($> 9 \mu\text{m}$) explicaron el 84%

Tabla 3: Parámetros e índices físicos en los distintos sitios y tratamientos en 0-10 cm y rangos óptimos propuestos en la literatura.

| Sitio | Tratamientos | COT | DA | DA _{max} | CR | IEE | CA | CAU | CCR |
|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------|--------------------------------|---------|---------|-----------|
| | | g kg ⁻¹ | Mg m ⁻³ | | % | m ³ m ⁻³ | | | |
| Bengolea | AN | 16,9 b | 1,11 a | 1,56 a | 71 a | 9,5 b | 0,34 b | 0,17 a | 0,43 a |
| | BP | 14,4 ab | 1,13 a | 1,55 a | 73 a | 7,1 a | 0,31 ab | 0,20 b | 0,49 ab |
| | MP | 11,9 a | 1,20 a | 1,56 a | 77 a | 5,8 a | 0,29 a | 0,20 b | 0,52 b |
| Monte Buey | AN | 30,6 b | 1,16 a | 1,40 a | 83 a | 7,6 b | 0,20 b | 0,21 a | 0,67 a |
| | BP | 18,3 a | 1,40 b | 1,42 b | 99 b | 4,5 a | 0,14 a | 0,20 a | 0,74 b |
| | MP | 15,5 a | 1,32 b | 1,42 b | 93 b | 3,7a | 0,18 b | 0,23 a | 0,68 ab |
| Pergamino | AN | 32,1 b | 1,12 a | 1,36 a | 82 a | 8,1 a | 0,21 a | 0,18 a | 0,63 a |
| | BP | 17,5 ab | 1,27 b | 1,38 b | 92 b | 4,2 a | 0,19 a | 0,23 b | 0,67 a |
| | MP | 15,7 a | 1,16 a | 1,36 a | 86 ab | 4,0 a | 0,23 a | 0,22 ab | 0,60 a |
| Viale | AN | 35,2 a | 1,09 a | 1,38 a | 80 a | 7,3 a | 0,24 a | 0,19 a | 0,65 a |
| | BP | 34,1 a | 1,08 a | 1,41 b | 76 a | 7,0 a | 0,19 a | 0,20 a | 0,71 a |
| | MP | 24,8 a | 1,21 a | 1,37 a | 89 a | 4,9 a | 0,22 a | 0,17 a | 0,66 a |
| Promedio | AN | 28,7 b | 1,12 | 1,43 | 79 | 8,1 b | 0,25 b | 0,19 a | 0,60 a |
| | BP | 21,1 a | 1,23 | 1,44 | 85 | 5,7 a | 0,21 a | 0,21 b | 0,65 b |
| | MP | 17,4 a | 1,22 | 1,43 | 86 | 4,6 a | 0,23 ab | 0,21 b | 0,61 a |
| Rangos óptimos | | 20-50 | 0,9-1,4 | | 75-87 | >7 | >0,14 | ≥0,15 | 0,60-0,70 |

Para cada sitio y parámetro, letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), test DMS.

de la variabilidad del contenido de agua en CC. Por lo tanto, los valores más bajos de CAU en AN se deben principalmente a un mayor contenido de macroporos relacionados con infiltración y conductividad de agua en el suelo.

En los tratamientos agrícolas, en general, se observó una mayor frecuencia de poros $< 9 \mu\text{m}$ (Figura 1), estos cambios en la distribución de los poros (aumento de mesoporos en detrimento de los macroporos) podría haber favorecido una mayor retención de agua. Otros autores también relacionaron un aumento de los poros de menor tamaño bajo SD con aumentos en la retención de agua del suelo (Ferrerías *et al.*, 2000). También, Fernández Ugalde *et al.* (2009) trabajando en suelos franco arenosos, encontraron diferencias en la CAU entre sistemas de labranza, principalmente debido a un significativo aumento en la frecuencia de poros entre 9 y $6 \mu\text{m}$ bajo SD.

Porosidad (macro, meso y microporos)

La porosidad total del suelo se relacionó de forma inversa con la DA (Tabla 5). El manejo agrícola redujo el volumen total de poros ($p < 0,05$) y modificó la distribución por tamaño en comparación con AN (Tabla 4 y Figura 1). Este comportamiento concuerda con lo señalado por Pilatti & de Orellana (2000) y Cerisola *et al.* (2005), quienes mencionan como característica de los suelos bajo SD la presencia de mayores valores de DA y menor volumen de poros de transmisión (o baja porosidad estructural) a nivel superficial.

La macroporosidad del suelo (Mp), tendió a disminuir del AN a los tratamientos agrícolas, aunque esto no siempre fue estadísticamente significativo, mientras que entre tratamientos agrícolas no se observó un efecto similar en los diferentes sitios. La mayor macroporosidad en AN fue probablemente una consecuencia de los mayores niveles de COT y una mayor masa de raíces en relación a BP y MP (Gregorich *et al.*, 1997). De acuerdo con esto, Benjamin *et al.* (2007) reportaron que las pasturas perennes son más eficaces para la creación de poros continuos y estables que los cultivos anuales en SD. En los tratamientos agrícolas, BP presentó mayor cantidad de macroporos, aunque no significativo, en Bengolea. En el resto de los sitios, la macroporosidad fue superior en MP, con diferencias significativas únicamente en Monte Buey, donde los menores valores de macroporosidad en BP son causa de los altos valores de DA. En este tipo de suelos, franco-limosos, se han encontrado escasa respuesta de la macroporosidad de los suelos a cambios por el manejo (Taboada *et al.*, 2008).

Se observó una negativa y altamente significativa ($p < 0,001$) correlación lineal entre macroporosidad ($> 9 \mu\text{m}$) y DA (Tabla 5), es decir, los cambios observados en DA se debieron principalmente a los cambios en el volumen de los poros del suelo $> 9 \mu\text{m}$. Estos resultados concuerdan con los observado por Reynolds *et al.* (2007) en suelos franco arcillosos bajo SD. Sasal *et al.* (2010) también encontraron asociaciones negativas entre la DA y la macroporosidad al comparar diferentes secuencias de cultivos bajo SD.

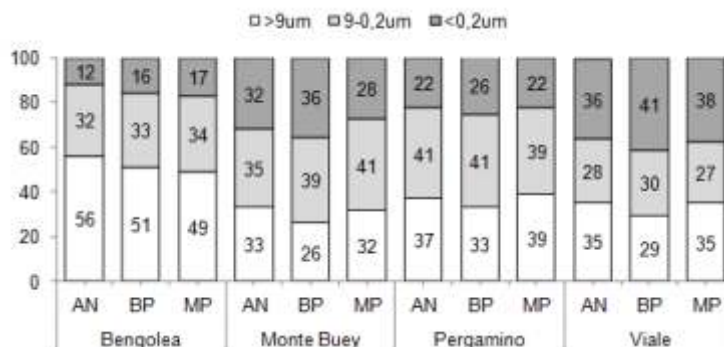
Figura 1: Distribución de tamaño de poro en 0-10 cm.

Tabla 4: Porosidad total y tamaños de poros en 0-10 cm.

| Sitio | Tratamientos | Mp | mP | μ P | PT |
|-----------------------|--------------|----------------------------|--------|---------|---------|
| | | $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ | | | |
| Bengolea | AN | 0,34 b | 0,19 a | 0,07 a | 0,61 b |
| | BP | 0,31 ab | 0,20 a | 0,09 b | 0,60 ab |
| | MP | 0,29 a | 0,20 a | 0,10 b | 0,58 a |
| Monte Buey | AN | 0,20 b | 0,21 a | 0,19 b | 0,60 b |
| | BP | 0,14 a | 0,20 a | 0,19 b | 0,53 a |
| | MP | 0,18 b | 0,23 a | 0,15 a | 0,56 ab |
| Pergamino | AN | 0,21 a | 0,23 a | 0,13 a | 0,57 a |
| | BP | 0,19 a | 0,23 a | 0,15 b | 0,56 a |
| | MP | 0,23 a | 0,22 a | 0,13 a | 0,59 a |
| Viale | AN | 0,24 a | 0,19 a | 0,24 a | 0,67 a |
| | BP | 0,19 a | 0,20 a | 0,27 a | 0,66 a |
| | MP | 0,22 a | 0,17 a | 0,24 a | 0,64 a |
| Promedio | AN | 0,25 b | 0,21 a | 0,16 | 0,61 b |
| | BP | 0,21 a | 0,21 a | 0,18 | 0,59 a |
| | MP | 0,23 ab | 0,21 a | 0,16 | 0,59 a |
| Rangos óptimos | | $\geq 0,14$ | | | |

Macroporos (Mp, $>9\mu\text{m}$); mesoporos (mP, $9\text{-}0,2\mu\text{m}$); microporos (μ P, $<0,2\mu\text{m}$). Para cada sitio y tamaño de poro, letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), test DMS.

Para todos los sitios se observó que la proporción de macroporos fue $>25\%$ de la porosidad total para los tratamientos evaluados (Figura 1). Debido a que la porosidad del suelo regula la aireación y la retención de agua, valores de macroporosidad ($>50\mu\text{m}$) de 10 a 25% son considerados necesarios para una adecuada aireación y para permitir una rápida percolación del agua excedente del suelo (Topp *et al.*, 1997). Por lo tanto, a pesar de no ser un parámetro sensible para predecir el efecto de las prácticas de manejo agrícolas, los macroporos permiten inferir que los suelos estudiados presentaron buena aireación y movimiento de agua.

Los mesoporos ($9\text{-}0,2\mu\text{m}$), en la mayoría de los sitios se observó una mayor proporción en los manejos agrícolas con respecto a AN (Figura 1). Se considera que al menos un 10% de los poros debe oscilar entre 50 y $0,5\mu\text{m}$ de diámetro para asegurar una buena retención de agua (Blackwell *et al.*, 1990). Es decir, en todos los casos evaluados, no hubo restricciones en el almacenamiento de agua útil, ya que los valores observados superaron ampliamente los valores críticos propuestos en la literatura, también reflejado en los valores de CAU “ideales y buenos” descriptos anteriormente (Tabla 3).

La intensidad y tipos de cultivos, principal diferencia entre los manejos agrícolas, en general, no reflejaron los mismos cambios en las propiedades hidrológicas del suelo en todos los sitios, evidenciando que el tipo de suelo influyó sobre el comportamiento de las variables analizadas. En este sentido, en el Haplusol y en el Hapludert, BP presentó menores valores de DA y mayores de PT en relación con MP. Por el contrario, en los Argiudoles (Monte Buey y Pergamino), suelos más vulnerables a los procesos de degradación física, BP presentó mayores procesos de compactación ($>DA$ y $<PT$) que MP. El uso agrícola de los suelos, en relación con AN, afectó negativamente a las propiedades físicas del suelo. Es decir, el efecto agrícola generó una compactación, aunque no crítica, a expensas de una disminución de los macroporos. Los cambios en la distribución de tamaño de los poros por causa de la compactación se caracterizó por un aumento en el porcentaje de poros de diámetros pequeños e intermedios en detrimento de los poros más grandes (Iglesias *et al.*, 2014). Estos resultados concuerdan con los reportados por otros autores donde no encontraron diferencias en las propiedades físicas evaluadas (DA, tamaño de poros, conductividad

hidráulica saturada, etc.) después de 15 años en diferentes secuencias de cultivo bajo SD (Benjamin *et al.*, 2007). También, escasas o nulas diferencias en DA, conductividad hidráulica y tamaños de poros se observaron en Argiudoles de la provincia de Entre Ríos al evaluar distintas rotaciones (Sasal *et al.*, 2010).

Carbono orgánico y su relación con las propiedades físicas

El COT y la DA se han utilizado como indicadores de calidad de suelos, dado que la degradación física de algunos suelos se relaciona con la reducción de la MO y aumento de la DA (Li & Shao, 2006; Grosbellet *et al.*, 2011). Los niveles de COT en 0-10 cm fueron mayores (aunque no siempre estadísticamente significativo) bajo AN en relación a BP y MP (Tabla 3). Esto sin duda refleja la mayor masa de raíces y biomasa aérea de plantas que existen bajo los suelos naturales, en relación a los suelos cultivados anualmente (Gregorich *et al.*, 1997). En todos los sitios, no se encontraron diferencias significativas en los niveles de COT entre tratamientos agrícolas (Tabla 3). Howard & Howard (1990) estimaron que los suelos con menos de $20,0\text{ g kg}^{-1}$ de COT son propensos a la desestabilización estructural, la erosión y la reducción de rendimiento de los cultivos. Si se comparan con los niveles de carbono considerados como “deseables” u “óptimos” por la literatura, en ningún caso superaron los umbrales superiores ($50,0\text{ g kg}^{-1}$), mientras que los tratamientos agrícolas presentaron niveles de COT menores a los niveles críticos inferiores ($20,0\text{ g kg}^{-1}$), por debajo del cual puede ocurrir pérdida de la estructura del suelo por un manejo inadecuado (Greenland, 1981). La DA fue negativamente correlacionada con el COT y COP_f (Tabla 5), evidenciando el efecto significativo que tiene el COT y sus fracciones sobre dicha propiedad física. Estos resultados son coincidentes con los reportados por Reynolds *et al.* (2002) y Ferreras *et al.* (2007), quienes hallaron mayor DA y menor proporción de COT en suelos de diferente textura y estados estructurales bajo SD en comparación con situaciones no cultivadas o ambientes naturales.

Si bien el COT correlacionó negativamente con DA (Tabla 5), estas relaciones fueron mejor representadas por función “lineal y meseta” (Figura 2). Como puede observarse, a medida que aumenta los niveles de COT se produce una disminución significativa de la DA hasta un valor “crítico” que para los suelos de texturas medias y finas (Monte Buey, Pergamino y Viale) es de $26,0\text{ g kg}^{-1}$, a partir del

cual no se observan cambios en la DA por aumentos del COT. La relación que existe entre ambos parámetros es la siguiente:

$$DA (Mg m^{-3}) = 1,63 - (0,0186 \times COT) \quad \text{sí} \quad COT < 26,0 \text{ g kg}^{-1}$$

$$DA (Mg m^{-3}) = 1,14 \quad \text{sí} \quad COT \geq 26,0 \text{ g kg}^{-1}$$

Por lo tanto, para los sitios de texturas medias y finas valores de COT inferiores a 26,0 g kg⁻¹ en 0-10 cm, se pueden considerar "críticos" ya que pueden ocurrir aumentos importantes de la DA por un manejo inadecuado.

No se encontraron asociaciones entre los valores de DA con los contenidos de L+a (Tabla 5). Estos resultados no concuerdan con los reportados por otros autores donde encontraron dependencia de la DA con la textura del suelo (Reichert *et al.*, 2009). Jones (1983) evaluando valores de DA_c para el crecimiento de raíces, informó relaciones negativas altamente significativas entre el contenido de L+a y DA. Sin embargo, el IEE, que relaciona el COT con la textura del suelo (L+a) permitió explicar mejor las variaciones de DA que en forma individual (Tabla 5). En la Figura 3 puede observarse que, a medida que aumenta el IEE se produce una disminución significativa de la DA hasta un valor

"crítico" de 6,13, a partir del cual no se observan cambios en la DA. La relación que existe entre ambos parámetros es la siguiente:

$$DA (Mg m^{-3}) = 1,61 - (0,08 \times IEE) \quad \text{sí} \quad IEE < 6,13$$

$$DA (Mg m^{-3}) = 1,13 \quad \text{sí} \quad IEE \geq 6,13$$

Por lo tanto, para todos los sitios valores de IEE inferiores a 6,13 se pueden considerar "críticos" ya que pueden ocurrir aumentos importantes de la DA por un manejo inadecuado. Es decir, cada sitio presentará niveles "críticos" de COT diferentes según el contenido de L+a. Por lo tanto, valores críticos de 15,1, 28,8, 29,2 y 34,4 g kg⁻¹ de COT se encontraron para Bengolea, Monte Buey, Pergamino y Viale, respectivamente. Pieri (1992) considera que valores de IEE en suelos cultivados entre 5 y 7 indican alto riesgo de degradación. Si bien el IEE no se relaciona directamente con la porosidad del suelo, dicho índice es un estimador de la "capacidad de recuperación" de la estructura del suelo. Si se compara con los valores críticos citados en la literatura (Tabla 3), los AN presentaron valores >7, considerados de bajo riesgo de degradación estructural, al igual que BP en Bengolea y Viale. En el resto de los tratamientos, los valores de

Tabla 5: Coeficientes de correlación entre pares de indicadores de calidad del suelo (p < 0,05).

| | COT | COP _g | COP _f | L | a | L+a | IEE | Mp | mP | μP | PT | DA | CR |
|------------------|-------|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|----|
| COT | 1 | | | | | | | | | | | | |
| COP _g | 0,40 | 1 | | | | | | | | | | | |
| COP _f | 0,46 | 0,59 | 1 | | | | | | | | | | |
| L | 0,37 | | -0,39 | 1 | | | | | | | | | |
| a | 0,79 | | | 0,53 | 1 | | | | | | | | |
| L+a | 0,65 | | | 0,88 | 0,86 | 1 | | | | | | | |
| IEE | 0,41 | 0,57 | 0,79 | -0,58 | | -0,37 | 1 | | | | | | |
| Mp | | | 0,38 | -0,68 | -0,53 | -0,68 | 0,63 | 1 | | | | | |
| mP | | | | | | | -0,35 | | 1 | | | | |
| μP | 0,74 | | | 0,51 | 0,95 | 0,83 | | -0,59 | | 1 | | | |
| PT | 0,68 | | 0,49 | | 0,49 | | 0,53 | 0,40 | -0,27 | 0,42 | 1 | | |
| DA | -0,46 | | -0,59 | | | | -0,64 | -0,62 | | | -0,74 | 1 | |
| CR | | | -0,64 | 0,61 | | 0,48 | -0,75 | -0,82 | | | -0,61 | 0,89 | 1 |

COT, carbono orgánico total; COP_g, carbono orgánico particulado grueso (>105 μm); COP_f, carbono orgánico particulado fino (105-53 μm); L, limo; a, arcilla; L+a, limo+arcilla IEE, índice de estabilidad estructural; Mp, macroporos; mP, mesoporos; μP, microporos; PT, porosidad total; DA, densidad aparente; CR, compactación relativa.

Figura 2: Relación entre el carbono orgánico total (COT) (g kg⁻¹) y la densidad aparente (DA) (Mg m⁻³) para los suelos de texturas medias y finas (Pergamino y Monte Buey-franco limosos, Viale-franco arcillo limoso).

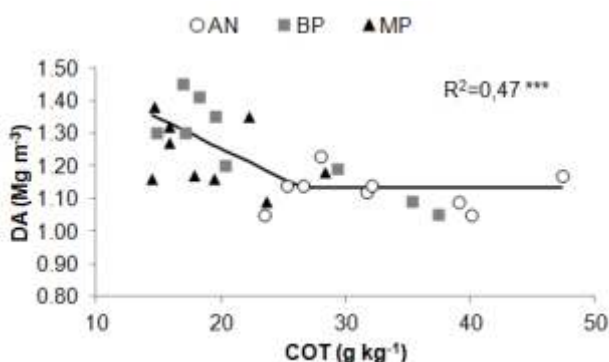
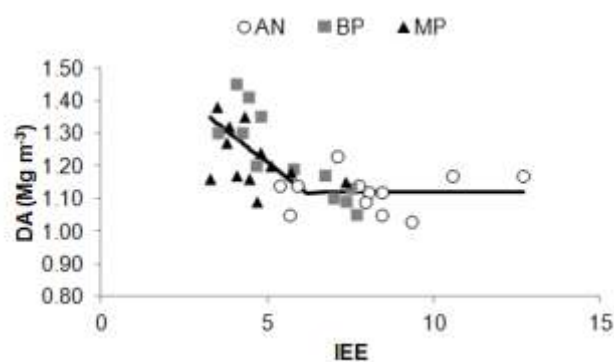


Figura 3: Relación entre el índice de estabilidad estructural (IEE) y la densidad aparente (DA) (Mg m⁻³) para todos los sitios.



IEE indican alto riesgo de degradación o suelos estructuralmente degradados.

El IEE se relacionó significativamente con otras propiedades físicas del suelo como PT, principalmente, macroporosidad (asociación positiva) y CR (asociación negativa) (Tabla 5). Por lo tanto, suelos con valores de IEE superiores a 6,13 presentarán una buena macroporosidad, mientras que valores inferiores, pueden presentar elevados niveles de CR y perjudicar el normal desarrollo de los cultivos como se mencionó anteriormente. La presencia de MO tiene un efecto protector frente a la compactación. La adsorción de compuestos orgánicos humificados a la superficie de las arcillas aumenta la porosidad intra-agregados para constituir el complejo arcillo-húmico,

Conclusión

Independientemente del tipo de suelo, la actividad agrícola generó disminuciones en los niveles de COT, afectando negativamente la mayoría de las propiedades físicas evaluadas, con aumentos de la DA y disminución de la porosidad total, principalmente por el menor volumen de macroporos, los cuales disminuyeron un 12% en promedio.

Ninguno de los indicadores/índices evaluados permitió diferenciar prácticas agrícolas, común para todos los sitios, reflejando que la sensibilidad fue dependiente del tipo del suelo, principalmente debido a las características texturales y mineralógicas. Sin embargo, propiedades indirectamente relacionadas con la calidad física de los suelos como el COT y, principalmente, su relación con el contenido de L+a (IEE) fueron las únicas variables en donde se encontraron valores por debajo del óptimo en los tratamientos agrícolas.

Debido a la estrecha relación entre la mayoría de las propiedades físicas evaluadas y el IEE, este último puede ser útil para evaluar

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por el Ministerio Argentino de Ciencia, Tecnología e Innovación (Grant FONCyT PAE-36976-PID53). Asimismo, desean agradecer a las siguientes instituciones que proporcionaron la infraestructura y equipos para llevar a cabo esta experiencia: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona semiárida (CERZOS) y Departamento de Agronomía (Universidad Nacional del Sur).

Bibliografía

1. **AAPRESID** http://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2013/02/aapresid.evolucion_superficie_sd_argentina.1977_a_2011.pdf (2012). Acceso: 27 de Octubre del 2015.
2. **ALVAREZ MF, OSTERRIETH ML, BERNAVA LABORDE V, MONTTILF** (2008) Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de argiudoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ci. Suelo* 26(2), 115-129.
3. **ÁLVAREZ CR, TABOADA MA, GUTIERREZ BOEM FH, BONO A, FERNANDEZ PL, PRYSTUPA P** (2009) Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
4. **ARSHAD MA, MARTIN S** (2002) Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agric. Ecosys. Environ.* 88: 153-160.
5. **BENJAMIN JG, MIKHA M, NIELSEN DC, VIGIL MF, CALDERÓN F, HENRY WB** (2007) Cropping intensity effects on physical properties of a no-till silt loam. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1160-1165.
6. **BLACKWELL PS, RINGROSE-VOASE AJ, JAYAWARDANE NS, OLSSON KA, MCKENZIE DC, MASON WK** (1990) The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *J. Soil Sci.* 41: 215-228.
7. **BLAKE GR, HARTGE KH** (1986) Bulk Density. In: Klute A (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1*, 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp: 363-375.
8. **BOLINDER MA, ANGERS DA, GREGORICH EG, CARTER, MR** (1999) The response of soil quality indicators to conservation management. *Can. J. Soil Sci.* 79(1), 37-45.
9. **BOTTA G, JORAJURIA D, BALBUENA R, ROSATTO H** (2004) Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil Till. Res.* 78: 53-58.
10. **BOTTA G, POZZOLO O, BOMBEN M, ROSATTO H, RIVERO D, RESSIAM, TOURN M, SOZAE, VÁZQUEZ J** (2007) Traffic alternatives in harvest of soybean (*Glycine max* L.): effect on yields and soil under direct sowing system. *Soil Till. Res.* 96: 145-154.

11. **BRADY NC** (1974) *The Nature and Properties of Soils*, 8th ed. MacMillan Publishing, New York, NY. 639 p.
12. **CAMBARDELLA CA, ELLIOTT ET** (1992) Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
13. **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.
14. **CARTER MR** (2002) Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47.
15. **CELIK I** (2005) Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Till. Res.* 83: 270-277.
16. **CERISOLA CI, GARCÍA MG, FILGUEIRA RP** (2005) Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Ci. Suelo* 23(2): 167-178.
17. **COCKROFT B, OLSSON KA** (1997) Case study of soil quality in south-eastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. In: Gregorich EG, Carter MR (Eds.) *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. In: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 339-350.
18. **DANIELSON RE, SUTHERLAND PL** (1986) Porosity. In: Klute A (Ed.) *Methods of Soil Analysis*, Part 1, 2nd Ed. Agron. 9, pp. 443-461.
19. **DEXTERAR, CZYZ EA, RICHARD G, RESZKOWSKAA** (2008) A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma* 143: 243-253.
20. **DI RIENZO JÁ, CASANOVES F, BALZARINI MG, GONZALEZ L, TABLADA M, ROBLEDO CW** (2013) *InfoStat*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
21. **DORAN JW, MIELKE LN, POWER JF** (1990) Microbial activity as regulated by soil water filled pore space. Symposium III-3, *Ecology of Soil Microorganisms in the Microhabitat Environments III*. Transactions of the 14th International Congress of Soil Science, August 12-18, Kyoto, Japan, pp. 94-99.
22. **DREWRY JJ, PATON RJ** (2005) Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aust. J. Soil Res.* 43: 525-531.
23. **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.
24. **DUVALME, GALANTINI JA, IGLESIAS JO, CANELOS S, MARTINEZ JM, WALL L** (2013) Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131: 11-19.
25. **ELLIOTT ET, CAMBARDELLA CA** (1991) Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34: 407-419.
26. **FERNÁNDEZ-UGALDE O, VIRTO I, BESCANS P, IMAZ MJ, ENRIQUE A, KARLEN DL** (2009) No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. *Soil Till. Res.* 106: 29-35.
27. **FERRERAS LA, COSTA JL, GARCIA FO, PECORARI C** (2000) Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 31-39.
28. **FERRERAS L, DE BATTISTA JJ, AUSILIO A, PECORARI C** (2001) Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesq. Agrop. Bras.* 36: 161-170.
29. **FERRERAS L, 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. *Ci. Suelo* 25(2): 159-172.
30. **FRANZLUEBBERS AJ** (2002) Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Till. Res.* 66: 197-205.
31. **GEE GW, BAUDER JW** (1986) Particle -size Analysis. *Methods of soil analysis*. Part I. Physical and Mineralogical Methods. II Ed. A.M.S.A. Inc., S.S.S.A. Inc. Madison, Wi. USA.
32. **GREENLAND DJ** (1981) Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.* 32: 301-322.
33. **GREGORICH EG, CARTER MR, ANGERS DA, MONREAL CM, ELLERT BH** (1994) Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74: 367-385.
34. **GREGORICH EG, CARTER MR, DORAN JW, PANKHURST CE, DWYER LM** (1997) Biological attributes of soil quality. In: Gregorich EG, Carter MR (Eds.) *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 81-113.
35. **GROSBELLET C, VIDAL-BEAUDET L, CAUBEL V, CHARPENTIER S** (2011) Improvement of soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma* 162: 27-38.
36. **HAMZA MA, ANDERSON WK** (2005) Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
37. **HOWARD PJA, HOWARD DM** (1990) Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons. *Biol. Fert. Soils* 9: 306-310.
38. **IGLESIAS JO, GALANTINI JA, ROSELL RA, MIGLIERINA AM, LANDRISCINI MR** (1996) Cambios en la distribución del espacio poroso en un Entic Haplustoll con diferentes secuencias de cultivos en la región semiárida argentina. *Agricultura Técnica* 56(1): 43-48.
39. **IGLESIAS JO, GALANTINI JÁ, KRÜGER H, VENANZI S** (2014) Soil pore distribution as affected by cattle trampling under no-till and reduced-till systems. *Agriscientia* 31 (2): 93-102.
40. **INTA**, 1974-1997. Colección: Cartas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:50.000. CIRN, INTA, Buenos Aires.
41. **JONES CA** (1983) Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1208-1211.
42. **KAY BD, VANDENBYGAART AJ** (2002) Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118.
43. **KARLEN DL** (2004) Soil quality as an indicator of a sustainable tillage practices. *Soil Till. Res.* 78: 129-130.
44. **KLUTE A** (1986) *Water Retention: Laboratory Methods*. In: Klute A (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 1. 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 635-661.
45. **LAL R** (2000) Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Sci.* 165: 191-207.
46. **LI YY, SHAO MA** (2006) Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *J. Arid. Environ.* 64: 77-96.
47. **LINN DM, DORAN JW** (1984) Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1267-1272.
48. **LIPIEC J, HATANO R** (2003) Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116(1): 107-136.
49. **MORET D, ARRÚE JL** (2007) Characterizing soil water-conducting macro- and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 500-506.
50. **MOTA JCA, ALVES CVO, FREIRE, AG, DE ASSIS JÚNIOR RN** (2014) Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau-CE, Brazil. *Soil Till. Res.* 140, 66-73.
51. **NOELLEMEYER E, QUIROGA AR, ESTELRICH D** (2006) Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *J. Arid Environ.* 65, 142-155.
52. **OLNESS A, CLAPP CE, LIU R, PALAZZO AJ** (1998) Biosolids and their effects on soil properties. In: Wallace A, Terry RE (Eds.) *Handbook of Soil Conditioners*. Marcel Dekker, New York, NY, pp. 141-165.
53. **PIERI C** (1992) *Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
54. **PIERI C** (1995) Long-term soil management experiment in semiarid Francophone Africa. *Adv Soil Sci.* 225-264.

55. **PILATTI MA, DE ORELLANA JA** (2000) The ideal soil: II. Critical values of an "ideal soil," for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *J. Sustainable Agric.* 17(1): 89-112.
56. **PILATTI MA, DE ORELLANA JÁ, IMHOFFS, DA SILVA AP** (2012) Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *Ci. Suelo.* 30(1): 9-21.
57. **QUIROGA AR, DÍAZ-ZORITA M, BUSCHIAZZO DE** (2001) Safflower productivity as related to soil water storage and management practices in semiarid regions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(17-18): 2851-2862.
58. **QUIROGA A, FUNARO D, NOELLEMEYER E, PEINEMANN N** (2006) Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 90: 63-68.
59. **REICHERT JM, SUZUKI LEAS, REINERT DJ, RAINER H, HÅKANSSON I** (2009) Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.* 102: 242-254.
60. **REYNOLDS WD, BOWMAN BT, DRURY CF, TAN CS, LU X** (2002) Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131-146.
61. **REYNOLDS WD, YANG XM, DRURY CF, ZHANG TQ, TAN CS** (2003) Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. *Can. J. Soil Sci.* 83: 318-393.
62. **REYNOLDS WD, DRURY CF, YANG XM, FOX CA, TAN CS, ZHANG TQ** (2007) Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Till. Res.* 96: 316-330.
63. **REYNOLDS WD, DRURY CF, YANG XM, TAN CS** (2008) Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions *Geoderma* 146: 466-474.
64. **RICHARDS LA** (1947) Pressure-membrane apparatus-construction and use. *Agricultural Engineering* 28, 451-454.
65. **SASAL MC, CASTIGLIONI MG, WILSON MG** (2010) Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
66. **SCHMIDT ES, AMIOTTI NM** (2015) Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la región pampeana semiárida sur. *Ci. Suelo.* 33(1): 79-88.
67. **SHUKLA MK, LAL R, EBINGER M** (2006) Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Till. Res.* 87: 194-204.
68. **SOJKARE, UPCHURCH DR** (1999) Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1039-1054.
69. **STRUDLEY MW, GREEN TR, ASCOUGH JC** (2008) Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Till. Res.* 99: 4-48.
70. **TABOADA MA, BARBOSA AO, COSENTINO DJ** (2008) Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
71. **TOPP GC, REYNOLDS WD, COOK FJ, KIRBY JM, CARTER MR** (1997) Physical attributes of soil quality. In: Gregorich EG, Carter MR (Eds.) *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. In: *Developments in Soil Science*, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 21-58.
72. **VARELA MF, FERNANDEZ PL, RUBIO G, TABOADA MA** (2011) Cultivos de cobertura: efectos sobre la macroporosidad y la estabilidad estructural de un suelo franco-limoso. *Ci. Suelo.* 29: 99-106.
73. **WHITE RE** (2006) *Principles and Practice of Soil Science*, 4th edition. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
74. **WILSON MG, SASAL MC, CAVIGLIA OP** (2013) Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma* 192: 354-361.