

EVALUACIÓN MICROMORFOMÉTRICA DE LA POROSIDAD DE UN ARGIUDOL TÍPICO CON DOS INTENSIDADES DE USO BAJO SIEMBRA DIRECTA

FILIFE BEHRENDIS KRAEMER^{1-3*}, MARIO GUILLERMO CASTIGLIONI¹,
HÉCTOR JOSÉ MARÍA MORRÁS²

Recibido: 11/11/2016

Recibido con revisiones: 13/11/2017

Aceptado: 05/12/2017

RESUMEN

En Argentina y en particular en la Región Pampeana, la siembra directa (SD) es el principal sistema de implantación de cultivos agrícolas. Dentro de este marco, en los últimos años dos situaciones han caracterizado la SD: una con baja intensificación de la secuencia agrícola y alta participación de soja y otra con mayor diversidad de cultivos. En este trabajo se evaluaron a través de estudios micromorfológicos y micromorfométricos, las consecuencias de dos tratamientos que representan estas situaciones, denominadas aquí malas prácticas agrícolas (MP) y buenas prácticas agrícolas (BP) respectivamente, conjuntamente con una situación de referencia (ambiente natural-AN). La presencia de una mayor proporción de cultivos durante el año, sin la recurrencia a largos períodos de barbecho invernal, favoreció el desarrollo de la macroporosidad ($>50 \mu\text{m}$) superficial (0-6 cm) en BP (13%) respecto a MP (8,8%) mientras que en el estrato 6-12 cm BP disminuyó su macroporosidad a 10% y MP mantuvo su porcentaje con respecto al estrato superficial. Por su parte, AN presentó una porosidad superficial similar a BP con un valor de 12%. Las diferencias de porosidad entre tratamientos estuvieron asociadas a las proporciones relativas de macroporos $>1000 \mu\text{m}$ que se corresponden mayoritariamente con los poros de morfología elongada. También se observó una mayor participación de poros redondeados en MP respecto a BP y AN cuyo origen estaría relacionado a compactación de microagregados y partículas individuales mientras que en BP y AN, su origen está asociado a canales biológicos. A su vez y si bien se observó un predominio en la orientación vertical de los macroporos en BP respecto a MP, ambos tratamientos mostraron en los poros elongados una fuerte tendencia a la dirección horizontal. Estas direcciones horizontales asociadas a estructuras laminares fueron notorias en ambos tratamientos agrícolas aun cuando la conformación de dichas estructuras presentó diferencias entre tratamientos, reflejadas claramente a nivel microscópico. Este trabajo destaca el valor del análisis micromorfológico y micromorfométrico conjunto como herramienta para caracterizar la porosidad y rasgos estructurales en suelos bajo SD, y pone de manifiesto la heterogeneidad morfológica de las estructuras laminares encontradas en este sistema de cultivo.

Palabras clave: Poros elongados, estructura laminar, soja, orientación de poros

MICROMORPHOMETRIC POROSITY ASSESSMENT IN A TYPIC ARGIUDOLL WITH TWO INTENSITY USES UNDER NO TILLAGE.

ABSTRACT

In Argentina and particularly in the Pampa region, no-tillage (NT) is the main cropping system. Within this framework, in recent years two situations have characterized NT: one with low crop sequence intensification and thus high soybean participation, and another with greater crop diversity. In this work two treatments represent these situations, referred herein as poor (MP) and good agricultural practices (BP) respectively, together with a reference situation (AN – natural environment) have been evaluated through micromorphological and micromorphometric methods. The presence of a larger crop proportion during the year and shorter winter fallow periods favored the development of the surface (0-6 cm) macroporosity ($> 50 \mu\text{m}$) in BP (13%) compared to MP (8.8%) while in the 6-12 cm layer, BP macroporosity decreased to 10% and MP maintained its percentage respect to the topsoil layer. AN presented a surface porosity similar to BP (12%). Porosity differences between treatments were associated with the relative proportion of macropores $> 1000 \mu\text{m}$ which corresponded mainly to the elongated pores. Higher frequency of rounded pores in MP respect to BP and AN was observed; in MP their origin would be related to compaction of microaggregates and individual particles, while rounded pores in BP and AN would be associated with biological channels. In turn, and although macropores with vertical orientation were more frequent in BP respect to MP, elongated pores showed a strong tendency to horizontal orientation in both agricultural managements. Although horizontal planes, associated with platy structures were notorious in both agricultural treatments, some of their features appeared clearly different between treatments at the microscopic level. This paper highlights the value of coupling micromorphological and micromorphometric analyses as a tool to characterize the porosity and structural features in soils under NT, and highlights the morphological heterogeneity of the platy structures found in this cultivation system.

Key words: Elongated pores, platy structure, soybean, pore orientation

1 Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía UBA

2 Grupo Mineralogía, Micromorfología y Biomimética, Instituto de Suelos - INTA-Castelar

3 CONICET

* Autor de contacto: filipebk@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

En Argentina, la siembra directa (SD) es el principal sistema de implantación de cultivos agrícolas con una adopción que llega a casi el 90% del área cultivada (<http://www.aapresid.org.ar/superficie/>). No obstante y como es señalado por Derpsch *et al.* (2014), a menudo se aplica el término SD a sistemas con baja cobertura del suelo, barbechos largos, alternancia de labranzas convencionales con métodos sin labranza, sumado a la presencia de secuencias de cultivos con una tendencia al monocultivo. Estos aspectos están presentes en gran parte de los casos donde se implementa la SD en la región pampeana (Argentina), dado que dicho sistema no siempre se ha desarrollado en forma conjunta con otras recomendaciones de la agricultura conservacionista, especialmente en lo que respecta a la fertilización y a la rotación de cultivos (Austin *et al.*, 2006).

Por otra parte, la disparidad de manejos utilizados y que son considerados como SD, ha conducido a resultados contradictorios. Así, en algunos trabajos se han señalado aumentos en la densidad aparente y resistencia mecánica del suelo (Chagas *et al.*, 1994), que como consecuencia han producido un aumento en los coeficientes de escurrimiento (Unger & Kaspar, 1994), mientras que en otros estudios se han encontrado disminuciones de la densidad aparente, aumentos en la tasa de infiltración y disminución del escurrimiento (Castiglioni *et al.*, 2013; Derpsch *et al.*, 2010). Esta disparidad en los resultados podría ser explicada, además, por diferencias en el tipo de suelo, clima, secuencias de cultivos y años bajo SD, entre otras variables que interactúan en cada caso de estudio.

Asociada con la incorporación de la SD, en Argentina se observó un incremento marcado del área destinada al cultivo de soja (*Glycine max* L., Merr.) (Novelli *et al.*, 2011), lo cual generó un manejo más simple y homogéneo de los sistemas productivos. El predominio de este cultivo representa un riesgo desde el punto de vista de la sustentabilidad, ya que su rastrojo aporta no sólo una menor cantidad de residuos al suelo (Studdert & Echeverría, 2000), sino que éstos también poseen una baja relación C/N, lo que favorece su rápida descomposición. Dadas estas características, para el caso que éste sea el único cultivo en

la rotación, el suelo permanecería con baja cobertura durante gran parte del año (Bathke & Blake, 1984). Como consecuencia, generalmente sistemas agrícolas con baja cobertura traen aparejado una disminución en los rendimientos y en la agudización del proceso de erosión hídrica (Sasal *et al.*, 2017; Kraemer, 2015).

Contrariamente, otros esquemas productivos han evidenciado un aumento en la intensificación de la secuencia de cultivos bajo SD. En este sentido, algunos trabajos han mostrado resultados positivos como consecuencia de esta intensificación, tanto en la porosidad del suelo (Kraemer *et al.*, 2014; Sasal, 2012), como en el balance de carbono y la estabilidad estructural (Duval *et al.*, 2013, 2016; Novelli *et al.*, 2011, 2013; Studdert *et al.*, 2010;). Sin embargo, este tipo de prácticas también estarían relacionadas con un aumento en la presión por tránsito de la maquinaria agrícola, lo cual podría conducir a compactaciones superficiales (Kraemer, 2015; Álvarez *et al.*, 2014). Debido a estos efectos contrastantes, aún son inciertas las consecuencias generadas sobre distintas propiedades edáficas, a partir de la intensificación en la secuencia de cultivos bajo SD en la región pampeana.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que las propiedades edáficas dependen tanto de sus características permanentes como de otras más dinámicas (Karlen *et al.*, 2001). Las primeras varían poco en el tiempo y son determinadas por los factores básicos de formación de suelos, como por ejemplo la distribución granulométrica, la mineralogía y las características de la expansión-contracción del suelo. Por otra parte, las segundas se refieren a atributos como la materia orgánica o la estructura del suelo, los cuales pueden ser modificados en un período corto de tiempo por manejos agronómicos (Carter, 2002).

La estructura del suelo, resultante de la organización espacial de las partículas y de los espacios vacíos que se generan, es una de sus propiedades físicas más importantes y más complejas (Morrás, 2015) la cual sintetiza estas características permanentes y dinámicas del suelo. Por ejemplo, los procesos de humedecimiento-secado regulan la formación de la estructura y la porosidad, como también su regeneración en la mayoría de los sue-

los (Reeve & Hall, 1978). También, una variedad de procesos biológicos junto con la actividad del hombre, tienen una influencia marcada en la evolución de la porosidad (Morrás, 2015).

La porosidad del suelo puede ser evaluada mediante dos tipos de métodos: los procedimientos indirectos, basados en la densidad aparente o en la desorción de fluidos a diferentes tensiones, y los métodos directos, en los que la información se obtiene por observación visual directa del espacio poral, tal como se logra a través del análisis micromorfológico (Morrás, 2015). La evaluación descriptiva que permite la micromorfología, se ha potenciado por la posibilidad de obtener datos cuantitativos a través de una variedad de procedimientos, en particular por las técnicas del análisis digital de imágenes (Castiglioni & Morrás, 2007). De esta forma se logra integrar el análisis de la porosidad total, con la determinación de la distribución por tamaño, morfología y orientación de los poros. Estos parámetros de la porosidad condicionan muchos procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, los que afectan el desarrollo de las plantas, de los microorganismos y de la fauna edáfica (Pagliai & Vignozzi, 2003).

Mediante esta metodología, diversos autores han analizado los efectos del manejo sobre la estructura superficial del suelo (Morrás, 2014; Rasa *et al.*, 2012; Morrás *et al.*, 2008; VandenBygaart *et al.*, 1999; Pagliai, 1987). Shipitalo y Protz (1987), en un Cambisol (ISSS, ISRIC, FAO, 1998) de Ontario, Canadá, cultivado en SD durante 7 años, señalan la aparición de una microestructura laminar y la tendencia de los poros a orientarse paralelamente a la superficie del suelo. Estos autores encontraron una reducción de casi el 50% de la macroporosidad en el horizonte Ap en relación al suelo laboreado, la que sería compensada desde el punto de vista funcional por el importante incremento de bioporos. Drees *et al.* (1994) (suelo Maury de Kentucky con 18 años bajo SD) identificaron en los 5 cm superiores del suelo tres zonas diferentes en sus características morfológicas, resaltando en particular la fuerte estructura laminar, con poros alargados orientados horizontalmente, los que aparecen interconectados por poros biológicos. También, modificaciones en el número de poros, distribución de

tamaño de poros y su forma han sido utilizados para describir la microestructura en SD (Rasa *et al.*, 2012; VandenBygaart *et al.*, 1999).

En la Argentina, Bonel & Morrás (2000), Morrás *et al.* (2004), Bonel *et al.* (2005) y Álvarez *et al.* (2014) realizaron análisis micromorfológicos en diversos suelos bajo SD de la región pampeana norte. En todos estos casos se encontraron rasgos comunes en los primeros centímetros del suelo, tales como la marcada anisotropía vertical de la estructura y la alta frecuencia de poros planares, poniendo de relieve además una gran variabilidad horizontal en la morfología y evolución de poros y agregados, dando lugar al reconocimiento de distintos modelos microestructurales en los suelos cultivados en SD (Morrás *et al.*, 2012).

Dado el cambio en la arquitectura y en el comportamiento físico del suelo que trae aparejado el cultivo bajo siembra directa, así como las diferencias que se generan en las propiedades edáficas según sean las prácticas de manejo utilizadas (rotación de cultivos, insumos utilizados, etc.), el propósito de este trabajo ha sido evaluar el efecto de la SD y de la intensificación del sistema de cultivo sobre la microestructura y la porosidad del suelo. Con el fin de obtener información detallada y cuantitativa sobre diversas variables relacionadas con la porosidad del suelo, el estudio se llevó a cabo utilizando un abordaje micromorfológico mediante el análisis digital de imágenes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se muestreó un Argiudol típico con un horizonte A franco limoso (serie Monte Buey; INTA, 1974-1997) ubicado en Monte Buey (Prov. Córdoba, Argentina; 32° 58' 14" S; 62° 27' 06" W), en un área de baja pendiente en el límite entre el Piedemonte de las sierras de Córdoba y la Pampa Ondulada. El área de estudio, así como los suelos presentes y lotes bajo distintos manejos de este trabajo, corresponden a una de las áreas seleccionadas de forma conjunta entre científicos y productores integrantes del consorcio BIOSPAS (www.biospas.org), proyecto interdisciplinario, cuyo objetivo es la definición de indicadores ecológicos de sostenibilidad en manejos bajo SD (Wall, 2011). En este trabajo se analizaron tres

tratamientos, siendo dos de ellos agrícolas: buenas prácticas agrícolas (BP) y malas prácticas agrícolas (MP), y una situación cuasi-prístina denominada ambiente natural (AN).

El tratamiento BP se refiere a un manejo agrícola sostenible bajo SD, con una secuencia de cultivos más intensificada (**Tabla 1**), reposición de nutrientes y mínimo uso de agroquímicos (herbicidas, insecticidas y fungicidas). MP se refiere a manejos agrícolas no sostenibles bajo SD, con una simplificación en la secuencia de cultivos (**Tabla 1**), baja reposición de nutrientes y alto uso de agroquímicos. Para caracterizar de forma objetiva

ambos manejos agrícolas se determinaron distintos indicadores, teniendo en cuenta la secuencia de cultivos de los seis años previos a la toma de muestras (2004-2010). Estos fueron: el índice de intensificación de la secuencia de cultivos (ISI), el cual es calculado teniendo en cuenta el período de ocupación de cada cultivo o secuencia de cultivos por cada año para un período considerado (Sasal, 2012); años bajo siembra directa (años SD) y número de cultivos de soja respecto al total de cultivos (Soja/cultivos) (**Tabla 1**). Así como se detalla en la **Tabla 1**, BP presenta una menor relación soja/cultivos y un ISI mayor, indicando una mayor intensificación de la secuencia de cultivos.

Tabla 1. a) Caracterización física, química y mineralógica de los suelos; b) Secuencia de cultivos y variables de manejo evaluadas para los manejos: AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas). Carbono orgánico total (COT), capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica (CE), coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), Años bajo siembra directa (años bajo SD), Índice de intensificación de la secuencia de cultivo (ISI), Relación número de cultivos de soja/número de cultivos totales (Soja/Cultivos). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de manejo ($P < 0.05$, Tukey). Entre paréntesis se indica el error estándar.

Table 1. a) Soil physical, chemical and mineralogical characterization; b) Crop sequence and management variables assessed for AN (Natural Environment), BP (Good Practices) and MP (Poor Practices). Total organic carbon (COT), cationic exchange capacity (CIC), electrical conductivity (CE), coefficient of linear extensibility (COLE). Years under no-till (Años bajo SD), index of the crop sequence intensification (ISI), relationship between number of soybean crops/number of total crops (Soja/Cultivos). Different letters indicate significant differences among management treatments ($P < 0.05$, Tukey). Standard error is presented between parentheses.

Variables físicas y químicas			AN	BP	MP
a)					
Granulometría	Arcilla (<2 µm)		22,6 (0,8) a	24,6 (2,3) a	20,2 (1,0) a
	Limo (2-50 µm)	(%)	60,8 (0,5) a	58,1 (3,4) a	62,3 (0,9) a
	Arena (>50 µm)		16,6 (0,3) a	17,3 (1,4) a	17,4 (0,2) a
COT		(%)	3,7 (0,4) a	2,2 (0,1) a	1,8 (0,0) b
CIC		mS cm ⁻¹	26,8 (1,6) a	23,3 (1,4) a	21,2 (0,3) b
CE		mS cm ⁻¹	25,6 (1,5) a	25,1 (0,5) a	20,0 (2,0) b
pH		1:2.5 agua	5,8 (0,4) a	5,5(0,2) a	6,4 (0,0) b
COLE			0,049 (0,00) a	0,077 (0,01) a	0,054 (0,01) a
b)					
Secuencia de cultivos	2004/2005	-	Trigo/ Sorgo	Soja de 1°	
	2006/2007	-	Maíz	Trigo/ Soja	
	2005/2006	-	Trigo/ Soja	Maíz	
	2007/2008	-	Vicia/Maíz-Soja	Soja de 1°	
	2008/2009	-	Maíz	Soja de 1°	
	2009/2010	-	Trigo/ Soja	Soja de 1°	
	Años bajo SD			28	10
ISI			0,64	0,49	
Soja/Cultivos			0,28	0,75	

Cuantificación del tamaño, forma y orientación de poros

Más detalle sobre las características de manejo de este ensayo puede encontrarse en Rosa et al. (2014) y en Kraemer (2015).

El abordaje elegido para la evaluación de distintas variables relacionadas a la porosidad del suelo, fue la micromorfometría en secciones delgadas de suelo. Así, en cada uno de los tratamientos estudiados, se recolectaron mediante cajas de Kubiena (210 cm³) muestras no disturbadas del horizonte superficial tomadas a dos profundidades: 0-6 cm y 6-12 cm. Las muestras fueron secadas al aire (3 meses) e impregnadas con resina sintética de tipo poliéster. Se prepararon cortes delgados de 42 cm² (7 x 6 cm) con un espesor aproximado de 30 µm. Estos cortes fueron analizados por microscopía óptica en luz transmitida y polarizada (LPP: luz polarizada plana; LPX: luz con polarizadores cruzados) con un equipo Leica Wild MZ8. Cada corte delgado fue digitalizado mediante un cámara Cannon Powershot S3/S 6MP, acoplada al software Image Capture[®]. En cada uno de ellos, se seleccionaron y digitalizaron cuatro áreas equidimensionales (dos superiores y dos inferiores) (magnificación del objetivo del microscopio 0,63X, resolución: 15,9 µm / pixel), evitando los bordes donde pudiesen haber ocurrido rupturas de la muestra (**Figura 1**). Así, de acuerdo con Rasa et al. (2012), se evitó también contabilizar el efecto de la superficie del suelo (2 mm), donde la rugosidad y las micropendientes afectan la cuantificación de diversos parámetros de área y forma de poros. Luego de obtenidas las imágenes, estas se transformaron a escala de grises (0-255, 8 bit), seleccionando únicamente el área central (2,25 cm²) (**Figura 1**). Esta nueva selección responde a la diferencia de foco y tonalidad entre el centro y el borde de la imagen, la cual disminuye la precisión en la segmentación (separación de los poros respecto a la matriz del suelo).

Esta segmentación, mediante la cual se asignan valores de la escala de grises a poros y sólidos, es el punto crítico en el análisis cuantitativo de la muestra (Bayeve et al., 2010). Por un lado, una gran cantidad de granos minerales redondeados como el cuarzo y feldespato, correspondientes a la fracción arena y limo, aparecen transparentes en LPP, lo cual sobreestima la porosidad

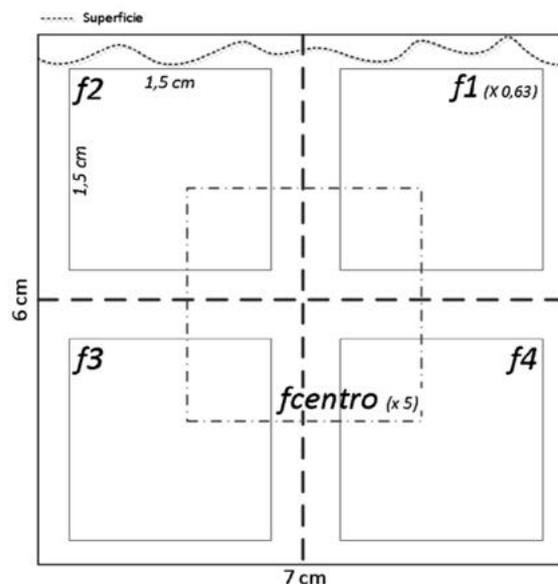


Figura 1. Esquema del procedimiento de obtención de imágenes para el análisis micromorfométrico. Valores entre paréntesis corresponden al aumento utilizado mientras que f1-4 corresponde al número de sector de la imagen analizada de cada sección delgada de suelo.

Figure 1. Scheme of the image obtention procedures for the micromorphometric analysis. Values between parenthesis correspond to the magnification use whereas f1-4 correspond to the number of sectors of the analyzed image in each thin section.

total. Por ello, siguiendo la metodología de Moretti et al., (2012), se corrigieron las imágenes descontando la presencia de estos minerales por su color de interferencia. Brevemente, de cada zona seleccionada del corte delgado se obtuvieron una imagen en LPP y otra en LPX, la cual fue también transformada a escalas de grises y luego convertida al negativo (Adobe Photoshop 6.0). Por último, se superpusieron dichas imágenes al 50%, visibilizando los tonos de grises correspondientes a cuarzos y feldespatos. A partir de esta nueva imagen binarizada, se analizaron los aspectos micromorfométricos de la porosidad mediante el programa *JMicro Vision v 1.2* (Roduit, 2008). Tomando en cuenta los procedimientos de selección de área y eliminación de falsos poros, se logró que el umbral más frecuentemente elegido (150) para separar poros de la matriz del suelo no variara en más de 2 unidades de grises. La elección de este umbral se corroboró en cada muestra por inspección visual. El mismo se encontró cercano al punto de inflexión de la curva espectral de la

imagen. De esta forma se obtuvo el porcentaje del área de poros $>50 \mu\text{m}$ de la imagen ($PI >50 \mu\text{m}$), tamaño que correspondería a los macroporos (Pagliai, 1987).

El trabajo efectuado se centró en el análisis de los macroporos mayores a $50 \mu\text{m}$, ya que estos son responsables del movimiento de aire, agua y crecimiento radical (Greenland, 1977). Además, se analizó la distribución por tamaño de $P >50 \mu\text{m}$, subdividiendo a los mismos en las siguientes categorías: $50-100 \mu\text{m}$, $100-200 \mu\text{m}$, $200-400 \mu\text{m}$, $400-800 \mu\text{m}$, $800-1000 \mu\text{m}$ y $1000-3000 \mu\text{m}$ (Morrás *et al.*, 2008; Fernández *et al.*, 2012). También se seleccionó y digitalizó una región central de la muestra, para evaluar la superficie ocupada por los poros entre $7-50 \mu\text{m}$ ($PI 7-50 \mu\text{m}$) (**Figura 1**). Para ello, dentro de esta región se eligieron tres áreas de $0,14 \text{ cm}^2$ (objetivo del microscopio 5X, resolución: $2 \mu\text{m}$ x pixel). Además, se discriminaron los poros de acuerdo a su forma, la cual fue expresada por la relación área/perímetro² (A/Pe^2), subdividiéndose esta en tres grupos: redondeados ($A/Pe^2 > 0,04$); irregulares ($0,015 < A/Pe^2 < 0,04$) y elongados ($A/Pe^2 < 0,015$). Por último, con este mismo programa se obtuvo la orientación de los poros (agrupados cada 10°). A su vez, y para evaluar de forma detallada la orientación de poros según su tamaño y forma, se decidió establecer tres grandes categorías de orientación angular: poros horizontales: $0-30^\circ/150-180^\circ$, poros de ángulo intermedio: $30-60^\circ/120-150^\circ$ y poros verticales $60-120^\circ$. Las descripciones micromorfológicas fueron realizadas de acuerdo a Stoops (2003) y su actualización en Loaiza *et al.* (2015).

Caracterización física, química y mineralógica del suelo presente en cada tratamiento

Para cada tratamiento se recolectaron muestras compuestas (5 submuestras) de $0-15 \text{ cm}$, en tres bloques según el diseño del proyecto BIOS-PAS (Rosa *et al.*, 2014; Duval *et al.*, 2016). Las muestras fueron tamizadas (2 mm) y secadas al aire. Las determinaciones efectuadas fueron: pH (1:2.5 suelo:agua), carbono orgánico oxidable total (COT) (Walkley & Black, 1934), conductividad eléctrica (CE) mediante conductímetro.

Los cationes intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fueron determinados por el método del acetato de amonio 1N (Klute, 1986). El Na^+ y el K^+ fueron medidos por fotometría de llama, mientras que el Ca^{+2} y el Mg^{+2} mediante espectrometría de absorción atómica. La granulometría fue determinada mediante pipeta de Robinson para el tamaño arcillas ($<2 \mu\text{m}$) y la fracción limo ($2-50 \mu\text{m}$), mientras que el porcentaje de arena ($>50 \mu\text{m}$) fue determinado por tamizado en agua (Gee & Bauder, 1986). Por último, se determinó el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) (Soil Survey Staff, 2010), que refleja la composición del material de suelo al determinar su cambio de volumen con el contenido de humedad.

Análisis estadístico

Los resultados referentes a las características físicas, químicas y mineralógicas se evaluaron mediante ANOVA (Snedecor & Cochran, 1980). Cuando se encontraron diferencias significativas se aplicó el test de Tukey con un nivel de significancia $P=0,05$. Los resultados relativos a la cuantificación de poros fueron analizados mediante estadística descriptiva. Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa Infostat/P v1.1 (2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características edáficas de los tratamientos evaluados

Los tres manejos presentaron valores elevados de limo, no presentando diferencias significativas entre las distintas fracciones granulométricas (Tabla 1). La abundancia de esta fracción incrementa la fragilidad al proceso de degradación física, el cual se manifiesta por la formación de estructuras masivas, encostramiento superficial y disminución de la porosidad estructural (Wischmeier *et al.*, 1971). El contenido de COT y la CIC presentaron el siguiente ordenamiento: $AN > BP > MP$, detectándose diferencias significativas únicamente entre AN y los dos tratamientos agrícolas (**Tabla 1**). El pH de los suelos fue levemente ácido con un valor significativamente

mayor en MP, mientras que los de conductividad eléctrica fueron bajos (**Tabla 1**). El COLE fue clasificado como bajo en AN y MP, mientras que BP se pudo clasificar como moderado (Soil Survey Staff, 2010) (**Tabla 1**). Debido a su distribución de partículas, bajo COT y CIC, el tratamiento MP sería el más frágil y el menos resiliente, lo que podría ser compensado en parte por presentar un valor de COLE intermedio.

Descripción micromorfológica

En la parte superior del estrato 0-6 cm de AN, se presentaron poros de empaquetamiento compuesto entre pequeños agregados esferoidales (grumos y gránulos), en tanto en la parte inferior se presentaron bloques subangulares y láminas con alta porosidad interna (**Figura 2a**). Los excrementos relleno canales y sueltos en la masa basal son abundantes, así como los restos vegetales en proceso de humificación. La microestructura se clasificó como migajosa en el sector superficial y en bloques en el sector más profundo.

Por su parte, lo observado en el nivel más superficial del suelo correspondiente a BP, fue similar a lo encontrado en AN, con dominancia de agregados esferoidales y poros de empaquetamiento compuesto (**Figura 2b**). En sectores intermedios se presentó una abundancia de agregados esferoidales de origen fecal, que aquí presentaron una mayor coalescencia, originando pequeños bloques subangulares, siendo los poros dominantes cavidades y canales. Así, la microestructura del suelo de BP entre 0 y 6 cm de profundidad, fue granular y parcialmente esponjosa en el sector intermedio. No obstante, en esta profundidad se detectaron algunas estructuras laminares asociadas a poros planares. Estas estructuras estaban conformadas por agregados biológicos redondeados y compactados con una alta porosidad interna. En el estrato 6-12 cm de este tratamiento, se observó una estructura en bloques moderadamente desarrollados. Sin embargo, estos presentaron alta porosidad constituida por cavidades y canales (**Figura 2c**).

Finalmente, en el sector superficial del suelo correspondiente al tratamiento MP, si bien los agregados derivados de excrementos fueron muy

abundantes, estos se encontraron compactados mientras que la porosidad dominante fue de cavidades. Por su parte, en el sector inferior de este estrato fue conspicua la presencia de agregados laminares con finas y cortas fisuras onduladas en su interior, resultante de la compactación de excrementos (**Figura 2d**). En el estrato de 6-12 cm de dicho tratamiento, se encontraron bloques moderadamente desarrollados con una abundante porosidad de cavidades. También se observaron en posición subhorizontal, pequeñas láminas de agregados esféricos (excrementos) coalescentes (**Figura 2e**). Así, la microestructura del suelo de MP (0-12 cm), fue principalmente de cavidades y parcialmente de tipo laminar.

En resumen, se observó una importante diferenciación de la microestructura en los tres casos analizados. No obstante, todos los tratamientos presentaron abundantes rasgos biológicos (e.g. excrementos) y estructuras laminares asociadas a poros planares. La frecuencia de las mismas fue mayor en las situaciones agrícolas, donde se evidenciaron estructuras laminares de diferente desarrollo y conformación.

Análisis micromorfológico

Corrección de imágenes

Moretti *et al.* (2012) señalan que para realizar una evaluación precisa de la porosidad sin el agregado de pigmentos, es aconsejable la corrección de las imágenes debido a la presencia de minerales de colores blancos en LPP (principalmente cuarzo y feldespato). En el presente trabajo esta corrección resultó necesaria, ya que existió una diferencia absoluta promedio de la porosidad para todos los tratamientos del 2,8% (21% relativo), al contrastar los resultados de las imágenes corregidas y sin corregir (**Tabla 2**). Como se observa en la **Tabla 2**, las diferencias absolutas de porosidad entre las imágenes corregidas y no corregidas oscilaron entre el 0,2 y 8,2%. En promedio, las diferencias absolutas fueron del 3,9 % para AN, 1,7 % para BP y del 4,3% para MP, mientras que para los tratamientos agrícolas se observó además un aumento de dichas diferencias en profundidad. Estas diferencias de porosidad encontradas entre imágenes ("falsos poros"

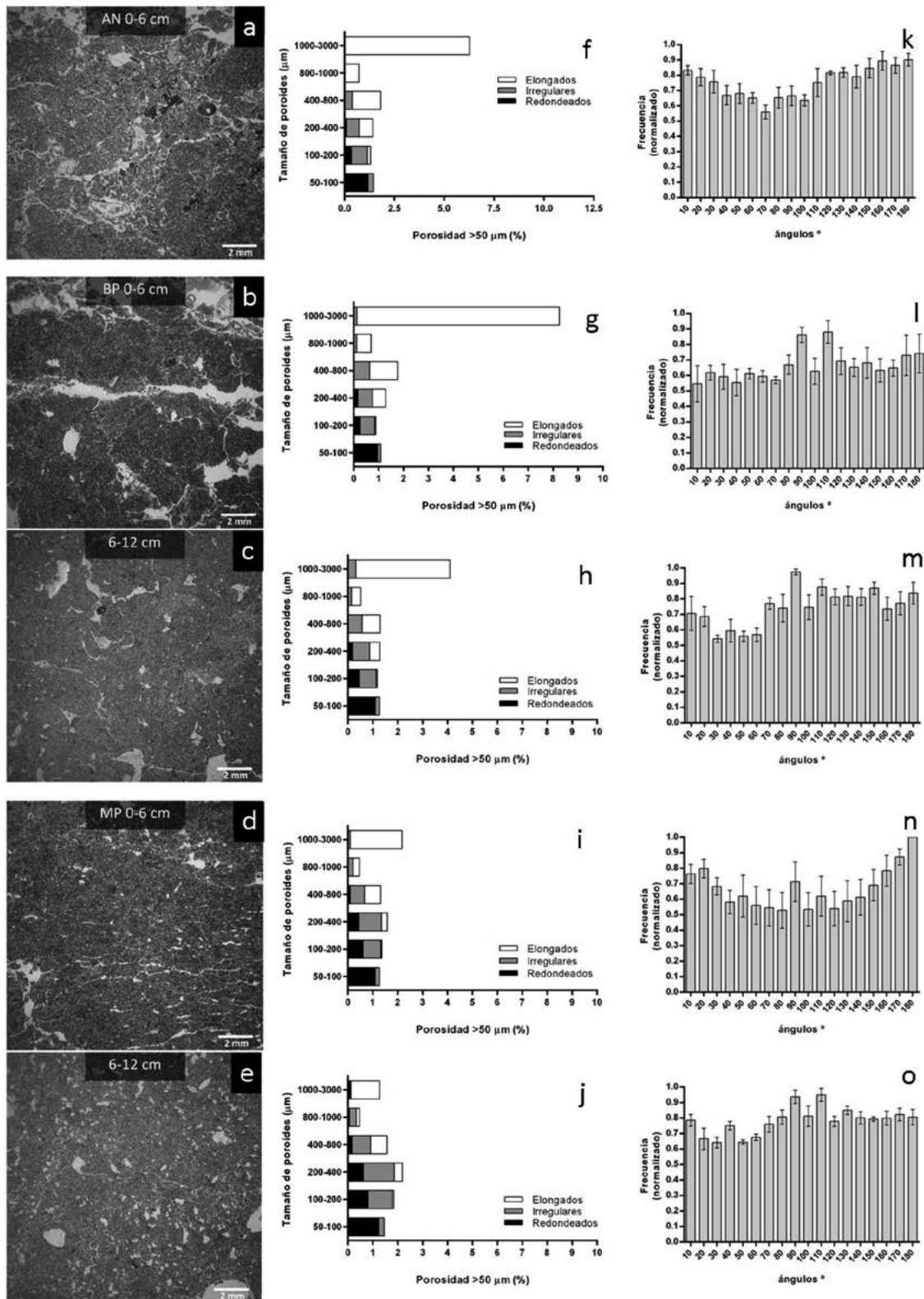


Figura 2. a-e: Ejemplo de secciones delgadas de suelo (X0,63); f-j: distribución por tamaño de la porosidad de la imagen y l-o: orientación de la porosidad, correspondiente a la porosidad de imagen >50 μm para AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para dos profundidades: 0-6 y 6-12 cm para las situaciones con agricultura y 0-6 cm para AN.
Figure 2. a-e: Example of soil thin section (X0,63); f-j: size distribution of image porosity and l-o: porosity orientation, corresponding to image porosity >50 μm for NE (Natural environment), GP (Good practices) and PP (Poor practices) at two sampling depths: 0-6 and 6-12 cm for agricultural treatments and 0-6 cm for NE.

Tabla 2. Porosidad de la imagen (>50 μm) corregida y no corregida por la presencia de minerales transparentes para AN (Ambiente Natural), BP (Buenas prácticas agrícolas) y MP (Malas prácticas agrícolas) para dos profundidades en los tratamientos agrícolas: 0-6 y 6-12 cm para las situaciones con agricultura y 0-6 cm para AN. \square Corresponde al desvío estándar.

Table 2. Image porosity (>50 μm) corrected and uncorrected by the presence of transparent minerals for AN (Natural Environment), BP (Good agricultural practices) and MP (Poor agricultural practices) for two sampling depths in the agricultural treatments: 0-6 and 6-12 cm and 0-6 cm for AN. \square Denote standard deviation.

Tratamiento	Profundidad	Sector de imagen	Porosidad de la imagen (>50 μm) (%)		
			Corregida	Sin corregir	Diferencia
AN	0-6 cm	f1	19,8	20,7	0,9
		f2	11,8	18,3	6,5
		f3	8,9	14,3	5,4
		f4	11,5	14,1	2,6
		f (1-4)	13,0	16,9	3,9 (2,5) \square
BP	0-6 cm	f1	17,2	18,7	1,5
		f2	15,9	16,6	0,6
		f3	10,3	11,9	1,6
		f4	12,4	12,9	0,4
		f (1-4)	14,0	15,0	1,0 (0,6)
	6-12 cm	f1	8,8	15,5	6,7
		f2	7,6	8,5	0,9
		f3	13,2	13,4	0,2
		f4	8,8	10,7	1,8
		f (1-4)	9,6	12,0	2,4 (2,9)
BP (0-12 cm)					1,7 (2,1)
MP	0-6 cm	f1	10,3	11,1	0,8
		f2	7,2	10,8	3,6
		f3	8,8	9,7	1,0
		f4	6,4	11,7	5,3
		f (1-4)	8,2	10,9	2,7 (2,2)
	6-12 cm	f1	11,7	15,9	4,2
		f2	8,7	11,4	2,7
		f3	7,7	9,9	2,2
		f4	7,0	15,0	8,1
		f (1-4)	8,8	13,1	4,3 (2,7)
MP (0-12 cm)					3,5 (2,4)
Promedio del suelo			10,7	13,6	2,8 (2,4)

>50 μm en las imágenes sin corregir) en los distintos tratamientos, podrían explicarse a partir de las diferencias granulométricas que existen entre estos (**Tabla 1**). En la **Tabla 1** se comprueba que los tratamientos AN y MP presentan un mayor contenido de fracciones gruesas (limo + arena)

respecto a BP, que en parte serían tomados como poros de no mediar la corrección. El incremento en las diferencias encontradas entre imágenes (corregidas y sin corregir) en el estrato de 6-12 cm respecto al de 0-6 cm, si bien no fue evaluada la granulometría convencional, podría indicar un

ligero incremento de la fracción mineral gruesa con la profundidad, dentro de este horizonte.

En contraposición, Rasa *et al.* (2012) trabajando con un suelo arcillo limoso, encontraron que el error debido a la sobreestimación fue bajo, encontrándose este en el rango del 0,07–0,18%, lo que fue atribuido al reducido tamaño de los granos minerales.

Selección del umbral de segmentación

En el análisis de la porosidad realizado a partir de los cortes delgados, la determinación del área ocupada por poros depende de la elección del umbral de segmentación de la imagen analizada. La forma de realizar esta elección está todavía sujeta a controversias, siendo objeto de varios trabajos (Bavaye *et al.*, 2010; Thompson *et al.*, 1992). En el presente estudio, coincidiendo con lo reportado por Bavaye *et al.* (2010), el uso de algoritmos automáticos para seleccionar dicho umbral (determinados mediante OTIMEC; URL <http://mehmetsezgin.net/>) no fue satisfactorio, dado que se obtuvieron valores contrastantes de acuerdo al algoritmo considerado (Shape_Sezan, Cluster-Otsu y Local_Yasuda) (datos no mostrados). Por ello, de la misma forma que lo propuesto por diversos autores (Rasa *et al.*, 2012; Bavaye *et al.*, 2010), se procedió a la elección del umbral de segmentación a partir de la inspección visual de la porosidad resultante de cada umbral seleccionado y de contrastar dicha imagen con la observada mediante lupa en la muestra original del corte delgado. Además, y de acuerdo a lo sugerido por Thompson *et al.* (1992) y Sleutel *et al.* (2008), se compararon los resultados obtenidos del análisis de imágenes con métodos indirectos tradicionales. De esta forma, los resultados de porosidad mayores a 50 μm obtenidos mediante la micromorfometría, fueron comparados con este mismo tamaño determinado a partir de la curva de retención hídrica (Reynolds, 2009). Así se encontró un coeficiente de correlación de 0,78 ($P=0,09$), en tanto los datos se mantuvieron de manera aceptable en la línea 1:1, lo que indica que los resultados micromorfométricos de porosidad son confiables y comparables con otras técnicas.

Porosidad total evaluada por imágenes

Los tratamientos evaluados presentaron diferencias de porosidad en $\text{PI}>50$, en $\text{PI } 7\text{-}50 \mu\text{m}$ (**Tabla 3**), como también en la distribución por tamaño, forma y orientación de los poros (**Figura 2, Tabla 3 a y b**). De esta manera, en el estrato superficial (0-6 cm), el área ocupada por $\text{PI } >50 \mu\text{m}$ se ordenó de la siguiente forma: $\text{BP}(14\%)>\text{AN}(13\%)>\text{MP}(8,8)$, disminuyendo esta en profundidad para BP (9,6%), mientras que para MP se mantuvo (8,8%). Similares resultados han sido encontrados por Rasa *et al.*, 2012, determinando valores de $\text{PI}>50 \mu\text{m}$ de 13,6% en un Cryaquept típico (Soil Survey Staff, 2010) no disturbados y 12,4% para suelos cultivados. Sin embargo, en un Argiudol típico de la región pampeana se hallaron valores más altos, correspondiendo un 26,5% para una pastura y 17,7% para un sistema integrado agrícola-ganadero (Fernández *et al.*, 2012).

Por su parte el $\text{PI } 7\text{-}50 \mu\text{m}$ presentó en el estrato superficial el siguiente ordenamiento: $\text{MP}>\text{BP}>\text{AN}$. En el estrato de 6-12 cm, BP no presentó cambios mientras que a dicha profundidad el área ocupada por estos poros disminuyó en MP (**Tabla 3b**).

Estas diferencias observadas en $\text{PI}>50 \mu\text{m}$, no tuvieron su correlato en el número total de poros y en el número de poros por cm^2 . Más bien, estos parámetros presentaron una tendencia opuesta a la observada con $\text{PI}>50 \mu\text{m}$, con una menor presencia de poros en BP (**Tabla 3a**). Por consiguiente, el área promedio de $\text{PI}>50 \mu\text{m}$ para este tratamiento fue cercana al doble respecto a lo observado en MP y un 60% mayor con respecto a lo determinado en AN (**Tabla 3a**). En contrapartida, el $\text{PI } 7\text{-}50 \mu\text{m}$ fue acompañada por el número de poros mientras que el área promedio de poros fue similar en todos los tratamientos (**Tabla 3b**).

Resulta interesante comparar los valores obtenidos en el número de poros y el área ocupada por $\text{PI } >50 \mu\text{m}$ en las dos profundidades de análisis, con los valores obtenidos de los mismos parámetros para $\text{PI } 7\text{-}50 \mu\text{m}$ (**Tabla 3**). Tomando como ejemplo los datos de BP, puede verse que el área ocupada por $\text{PI } >50 \mu\text{m}$ es alrededor diez veces mayor que el área de $\text{PI } 7\text{-}50 \mu\text{m}$, mientras

Tabla 3. Variables micromorfométricas relacionadas a la porosidad del suelo a) Porosidad de la imagen (PI) >50 μm y b) PI 7-50 μm , para AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para dos profundidades de muestreo. 0-6 y 6-12 cm para las situaciones con agricultura y 0-6 cm para AN. + Corresponde al desvío estándar.

Tabla 3. Micromorphometric variables related to soil porosity. a) Image porosity (PI)>50 μm and b) PI 7-50 μm for AN (Natural environment), BP (Good practices) and MP (Poor practices) at two sampling depths. 0-6 and 6-12 cm for agricultural treatments and 0-6 cm for AN. + Correspond to standard deviation.

a)

Tratamiento de manejo	Profundidad (cm)	PI >50 μm (%)		Nº de poros		Poros/cm ²		PI >50 μm /nº de poros	
AN	0-6	13,0	(4,7) ⁺	1420	(313)	623	(137)	0,010	(0,006)
BP	0-6	14,0	(3,2)	869	(191)	381	(84)	0,016	(0,004)
	6-12	9,6	(2,5)	1081	(176)	474	(77)	0,009	(0,003)
MP	0-6	8,2	(1,7)	1176	(170)	516	(75)	0,007	(0,002)
	6-12	8,8	(2,1)	1505	(360)	660	(158)	0,006	(0,001)

b)

Tratamiento de manejo	Profundidad (cm)	PI 7-50 μm (%)		Nº de poros		Poros/cm ²		PI 7-50 μm /nº de poros	
AN	0-6	1,3	(0,46) ⁺	527	(185)	3754	(1325)	0,0024	(0,00006)
BP	0-6	1,58	(0,17)	621	(90)	4435	(646)	0,0025	(0,00002)
	6-12	1,59	(0,06)	649	(23)	4638	(165)	0,0024	(0,0002)
MP	0-6	2,41	(0,03)	1204	(62)	8600	(447)	0,0020	(0,0001)
	6-12	1,71	(0,05)	668	(35)	4773	(252)	0,0025	(0,0001)

que el número de poros/cm² es unas diez veces mayor en PI 7-50 μm respecto a PI >50 μm . En otros términos, estos datos indican que en todos los tratamientos PI >50 μm es menor en número, pero resulta mayor en volumen respecto a la categoría PI 7-50 μm . El volumen ocupado por los microporos en el suelo es siempre mayor que el correspondiente a la macroporosidad (Reynolds, 2002). Por lo tanto, y de acuerdo con lo analizado recientemente, la microporosidad de este suelo estaría concentrada fundamentalmente en tamaños de poro inferiores a los 7 μm , es decir básicamente asociada a las fracciones coloidales (arcilla y materia orgánica).

Respecto a las dos categorías de poro evaluadas en el presente trabajo, se advirtió un desvío estándar creciente entre tratamientos con el siguiente orden: MP < BP < AN (**Tabla 3a,b**). Esto refleja un incremento en la heterogeneidad desde MP hacia AN, lo cual se pudo asociar con una mayor actividad biológica determinada en ese mismo sentido. Trabajos previos realizados sobre este mismo suelo y a partir de muestras tomadas

en la misma fecha, mostraron un mayor número de microorganismos, mayor actividad de denitrificadores (Rosa *et al.*, 2014), una superior macro y meso fauna (Domínguez, 2012) e hidrofobicidad (Kraemer *et al.*, 2012) en AN, con valores intermedios en BP y menores en MP. De la misma forma, algunos autores mencionan que la diversidad de las comunidades bacterianas así como su actividad y su distribución en una microescala dependen de la conformación porosa (Nunan *et al.*, 2003). También ha sido destacado que suelos más estructurados favorecen la supervivencia bacteriana, debido a que disponen de una mayor diversidad de hábitats físicos (Chenu & Cosentino, 2011).

Distribución de tamaño de poros, forma y orientación

En relación a la distribución por tamaño de poros, se puede observar un comportamiento muy semejante entre AN y BP. En ambos tratamientos la categoría de poros de 1000-3000 μm fue

dominante, decreciendo luego abruptamente con valores muy bajos para la categoría 800-1000 μm (**Figura 2 f-h**). A su vez, MP presentó una distribución de la porosidad más homogénea entre las distintas categorías por tamaño de poro, con un máximo en 1000-3000 μm en el estrato superficial y 200-400 μm en el estrato de 6-12 cm (**Figura 2 i-j**).

Los datos obtenidos muestran también que las categorías de poros 1000-3000 μm y 800-1000 μm estuvieron constituidas casi exclusivamente por aquellos de forma elongada. Este tipo de poro disminuyó su proporción en las categorías de menor tamaño (**Figura 2 f-j**). En el tratamiento BP debe destacarse una disminución con la profundidad de poros de tamaño intermedio (principalmente en el rango 400-800 μm), mientras que sucedió lo contrario en los poros de menor tamaño (200-50 μm) (**Figura 2 g,h**). En MP, el rango 400-800 μm no varió con la profundidad, mientras que se observó un leve incremento de la categoría 200-400 μm (**Figura 2 i,j**).

Los poros redondeados estuvieron representados en gran proporción en las categorías de poros más pequeños (**Figura 2f-j**), particularmente desde la categoría 200-400 μm hasta la categoría de menor tamaño (50-100 μm) (**Figura 2 f-j**). Además, se puede observar que en el estrato superficial de MP, los poros redondeados también están presentes en categorías mayores (400-800 μm), mientras que en profundidad estos se encuentran en casi todos los tamaños de huecos (**Figura 2 i,j**). Según Murphy *et al.* (1977), los poros redondeados tienden a ser pequeños lo cual fue también comprobado en este trabajo. Similares resultados fueron obtenidos por Castiglioni & Morrás (2007), quienes encontraron que los poros redondeados correspondían a tamaños menores a los 400 μm . Debe tenerse en cuenta, que los poros redondeados desde el punto de vista morfológico corresponden a vesículas, las que en muchos casos resultan de procesos de degradación de la estructura, generada por entrapamiento del aire (Morrás, 2015). Además, este tipo de poros puede resultar del redondeamiento de cavidades o poros de empaquetamiento por acción de la compresión mecánica. En este sentido, Lima *et al.* (2006) encontraron que los poros redondeados

son más frecuentes en suelos compactados, con y sin *hardsetting* (endurecimiento del suelo en seco). En otros casos, los poros redondeados corresponden a secciones transversales de canales biológicos, producidos por raíces o la fauna del suelo (Morrás, 2015), lo que por el contrario reflejaría mejores condiciones microestructurales y del comportamiento del flujo de fluidos dentro del suelo. Así, Murphy *et al.* (1977) sugirieron que los poros redondeados podrían estar asociados a antiguos canales de raíces, lo cual se traduciría en condiciones más favorables para el movimiento del agua en el suelo y para el crecimiento de nuevas raíces. Las observaciones sugieren que en AN y BP, buena parte de los poros redondeados tienen este último origen (**Figura 4 a,b,c,d**). En MP la génesis de estos poros es más variada y en parte está vinculada a poros planares asociado a la génesis de estructuras laminares (**Figura 4 e**) y por otra parte vinculadas a la modificación de otros poros por compresión (**Figura 4 f**).

Los poros irregulares se presentaron en tamaños intermedios (100-800 μm) mientras que mostraron una leve tendencia en el ordenamiento de los distintos tratamientos evaluados: MP>BP>AN y en general valores más altos en profundidad que en superficie. Si bien este tipo de poro fue el segundo más representativo, al mismo tiempo fue el tipo de poro con una presencia más balanceada en todos los tamaños y el que presentó menos diferencias entre los tratamientos de manejo.

En relación a la orientación de poros, en el tratamiento AN (0-6 cm) todas las orientaciones presentaron frecuencias angulares elevadas y con una homogeneidad relativamente mayor respecto a la misma profundidad de los tratamientos agrícolas, aunque se evidencia una ligera preferencia en la orientación de poros subhorizontales en este tratamiento (**Figura 2k**). En el estrato superficial de BP, la frecuencia fue muy homogénea en los distintos ángulos con un leve aumento de la frecuencia en los poros con una inclinación entre 90 y 110°, indicando esto una orientación sesgada a la verticalidad (**Figura 2i**). En contraposición, MP presentó una marcada horizontalidad con frecuencias máximas cercanas a 0 y 180°, aún cuando también se observa un pico en 90° (**Figura**

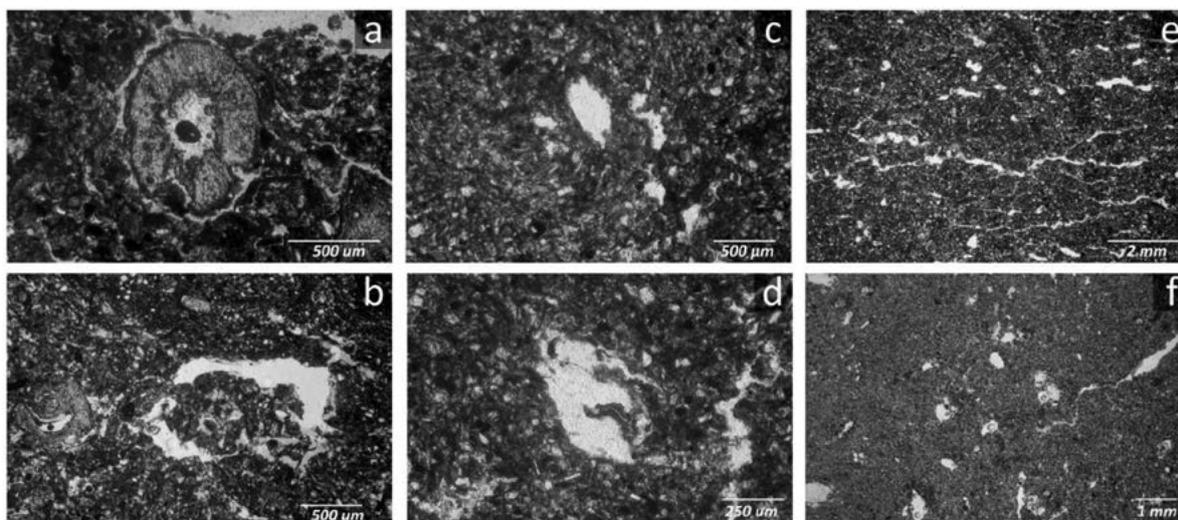


Figura 4. Poros redondeados de distinto origen, correspondientes a secciones delgadas de los tres tratamientos evaluados. a y b: corresponden al ambiente natural (AN) donde se observa una sección transversal de una raíz que conformará un poro redondeado (canal) (a) y tejidos vegetales y agregados biológicos en el centro de otro canal (b); c y d: corresponde al tratamiento de buenas prácticas (BP) donde se observa un poro redondeado (canal) con material orgánico en los bordes del mismo indicando un origen biológico (c) y un poro similar a (b) con restos de tejido vegetal en su interior (d); e y f: corresponden al tratamiento de malas prácticas (MP) donde poros redondeados pequeños (cavidades) se encuentran asociados a poros horizontales no continuos (e) mientras que la fotografía (f) indica cavidades de origen mecánico por compresión de microagregados y partículas individuales.

Figure 4. Rounded pores of different origin, corresponding to soil thin sections of the three managements evaluated. a y b: correspond to natural environment (AN) where a cross section of root will give rise to a rounded pore (channel) (a) and (b) plant tissues and biological aggregates at the center of other channel.; c y d: correspond to good practices treatment (BP); rounded pore (channel) with organic matter surrounding pore edges suggesting a biological origin (c) and a similar pore respect to (b) showing plant tissues inside (d); e y f: correspond to bad practices treatment (MP) where small rounded pores (cavities) are associated to non-continuous planar pores (e) while (f) show cavities resulting from compression of microaggregates and individual particles.

ra 2n). Estos datos se relacionan con la abundancia de pequeños poros planares que dan origen a estructuras laminares, como las observadas en la **Figura 2d**. Por el contrario, en el estrato 6-12 cm no se observa orientación preferencial ni en BP ni en MP.

Cuando se toman en cuenta los poros de menor tamaño 7-50 μm , la orientación subhorizontal de AN desaparece para dar lugar a una orientación más vertical (**Figura 3a**). En los tratamientos agrícolas BP (0-6 y 6-12 cm) y en MP (6-12 cm) la tendencia vertical de este rango de poros también se acentúa aunque con mayores valores de dispersión. Lo mismo sucede en MP (0-6 cm) cuya orientación horizontal, si bien se mantiene, pierde intensidad (**Figura 3 b,c**). Este cambio en la orientación de este tamaño de poros respecto a lo observado con $\text{PI} > 50 \mu\text{m}$ se relacionaría con las diferencias en su morfología y génesis (poros redondeados e irregulares) respecto a la abundancia

de poros elongados entre los poros de mayor tamaño.

Porosidad y orientación de los poros elongados

Los poros elongados corresponden morfológicamente a las fisuras y a los canales. Las primeras son planos de debilidad en la superficie de los agregados, que se originan básicamente como consecuencia de los procesos de expansión-contracción. Los canales son poros tubulares de origen biológico, producidos por la fauna y las raíces de las plantas (Morrás, 2015). Los poros elongados son de especial interés agronómico ya que diversos trabajos señalan que las categorías de mayor tamaño de este tipo de poros son las más afectadas por los manejos agrícolas (Fernández *et al.*, 2012; Rasa *et al.*, 2012), mientras que a su vez se correlacionan positivamente con el movimiento de aire y agua en el suelo (Castiglioni *et al.*, 2007). En el presente trabajo se observó el siguiente ordenamiento de los tratamientos según

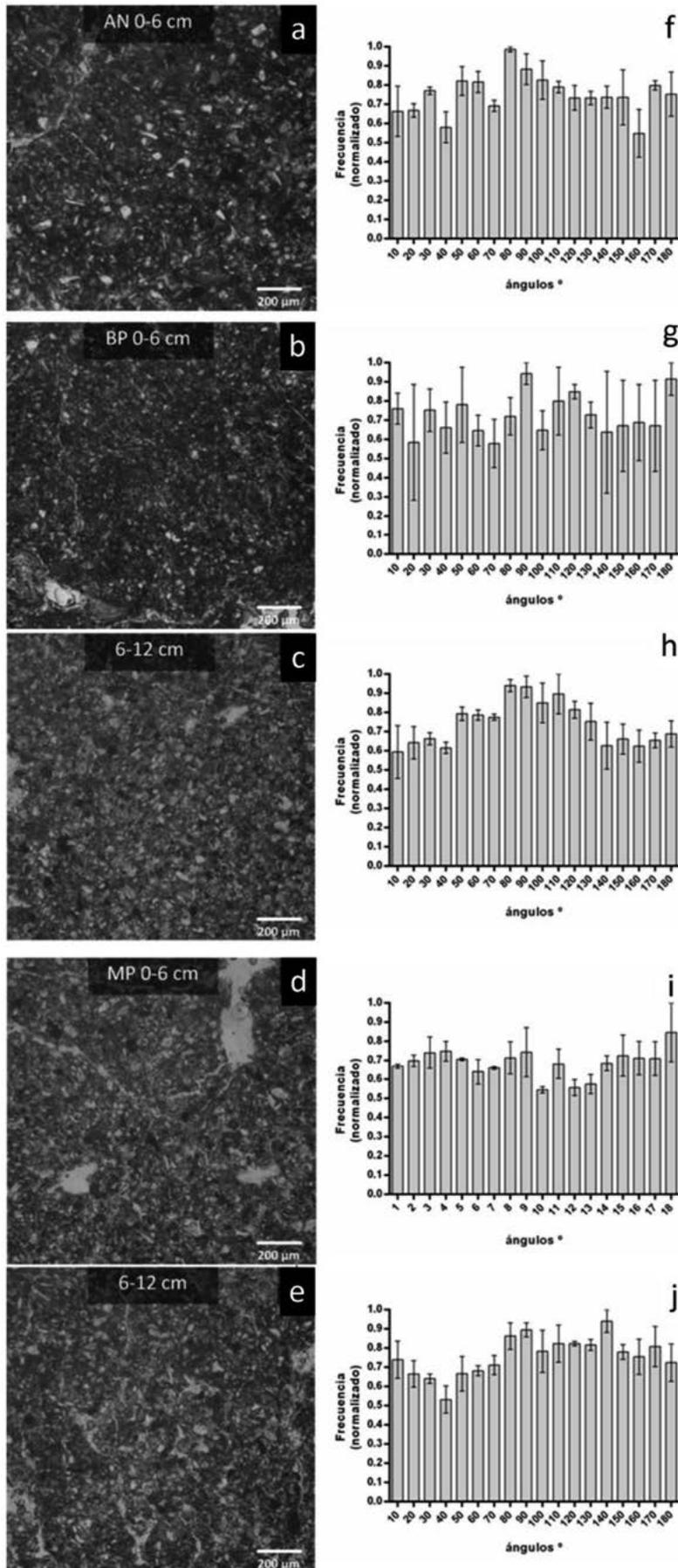


Figura 3. a-e: Ejemplo de secciones delgadas de suelo (X5); f-j: orientación de la porosidad, correspondiente a la porosidad de imagen 7-50 μm para AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para dos profundidades: 0-6 y 6-12 cm para las situaciones con agricultura y 0-6 cm para AN.

Figure 3. a-e: Example of soil thin section (X5); f-j: porosity orientation, corresponding to image porosity 7-50 μm for AN (Natural environment), BP (Good practices) and MP (Poor practices) at two sampling depths: 0-6 and 6-12 cm for agricultural treatments and 0-6 cm for AN.

la abundancia de poros elongados (1000-3000 μm): BP>AN>MP (**Figura 2 f-j**, **Figura 3**). A su vez para los tratamientos agrícolas, esta categoría por tamaño de poros disminuyó en profundidad (6-12 cm), lo mismo que representó más del 50% de la PI >50 μm con un máximo de 73,7% en BP (0-6 cm). Por el contrario, MP presentó porcentajes bajos de poros elongados, con un 37,6% para el estrato superficial y 23,9% para el subsuperficial.

La predominancia de este tipo de huecos, ha sido documentada mediante estudios micromorfológicos realizados en el horizonte superficial de diversos suelos sin la presencia de capas compactadas. Costantini *et al.* (2006) trabajando con diversos suelos (Entisoles, Inceptisoles y Alfisoles) sugirieron que su proporción debería situarse alrededor del 80% para obtener un óptimo drenaje y características favorables para la infiltración, aireación y crecimiento vegetal. No obstante, en ambientes no cultivados de la región pampeana, con Argiudoles típicos y vérticos, se han encontrado valores promedio de 57% de poros elongados (Castiglioni *et al.*, 2007). Por su parte, y de manera coincidente con lo encontrado en el presente trabajo (**Figura 2**), diversos autores reportaron

una alta proporción de poros elongados en las categorías de mayor tamaño (Morrás *et al.*, 2008; Fernández *et al.*, 2012; Rasa *et al.*, 2012) y con tamaño intermedio (>400 μm) (Castiglioni & Morrás, 2007).

En consecuencia, considerando solamente la morfología y el tamaño de poros, podría considerarse que para los tratamientos AN y BP, los altos porcentajes de poros elongados de gran tamaño podrían asegurar una buena calidad física del suelo.

No obstante, particularmente dentro de los poros elongados, también es de importancia la consideración de su orientación. Como se observa en la **Figura 5**, entre estos predominan aquellos con orientación horizontal, especialmente en la categoría 1000-3000 μm . En el estrato de 0-6 cm de los tratamientos agrícolas, la proporción de poros elongados horizontales decreció al disminuir el tamaño de poros, a pesar de que al mismo tiempo se comprobó un segundo pico máximo de frecuencia en la categoría de 400-800 μm . Para el estrato 6-12 cm, se observó que en el tratamiento MP se incrementa relativamente la proporción de poros elongados horizontales, registrándose también

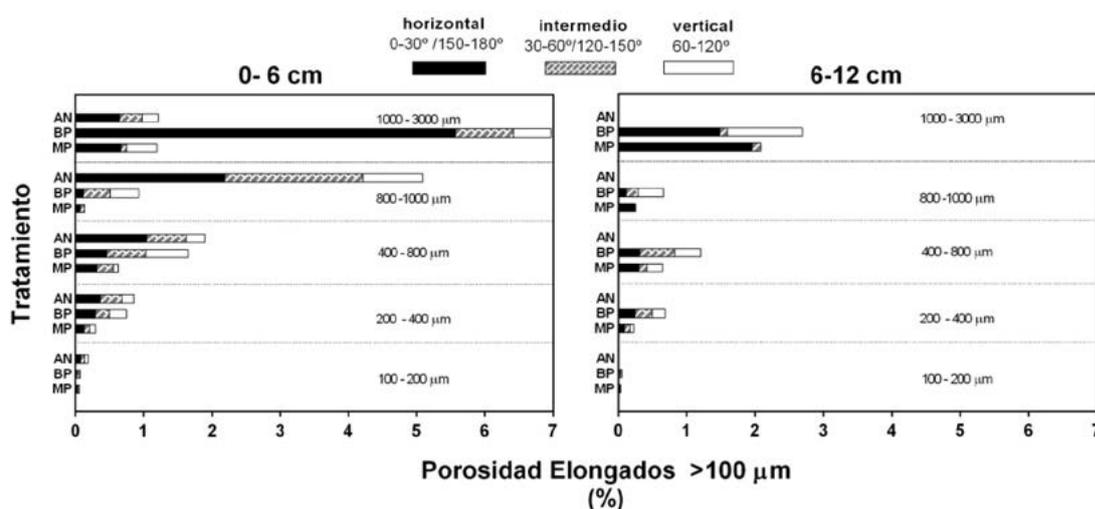


Figura 5. Distribución de poros elongados >100 μm (% del área analizada) en distintas categorías de poros y orientaciones: horizontal: 0-30°/150-180°, intermedio: 30-60°/120°-150° y vertical 60-120° para AN (Ambiente natural), BP (Buenas prácticas) y MP (Malas prácticas) para dos profundidades. 0-6 y 6-12 cm para las situaciones con agricultura y 0-6 cm para AN.

Figure 5. Distribution of >100 μm elongated pores (% refers to total area analyzed) according to size and orientation: horizontal: 0-30°/150-180°, intermediate: 30-60°/120°-150° and vertical 60-120° for AN (Natural environment), BP (Good practices) and MP (Poor practices) at two sampling depths. 0-6 and 6-12 cm for agricultural treatments and 0-6 cm for AN.

a esta profundidad para ambos tratamientos agrícolas, un segundo pico máximo de frecuencia en la categoría de 400-800 μm (**Figura 5**).

La generación de un gran número de poros elongados orientados horizontalmente, como ocurre particularmente en SD, podría contribuir a un inadecuado drenaje bajo condiciones muy húmedas y un aumento del escurrimiento superficial (Sasal *et al.*, 2017). Sin embargo, también es posible que el mayor número de bioporos con orientaciones variadas que se forman en SD contrarresten este efecto (VandenBygaart *et al.*, 1999; Morrás *et al.*, 2012). VandenBygaart *et al.* (1999) estudiaron la evolución estructural de un suelo Luvisol de Ontario Canadá, en parcelas con diferente antigüedad bajo SD. Estos autores observaron también diferentes niveles estructurales en el horizonte superficial, con dominancia de una estructura laminar entre 5 y 15 cm de profundidad, debida a la presencia de huecos planares orientados horizontalmente. Sin embargo, en el mismo trabajo se menciona que luego de 11 años bajo SD, se observó el desarrollo de una estructura granular con huecos de empaquetamiento debido a la actividad biológica. En este caso, el cultivo en SD también causó una reducción en el volumen y número total de poros en relación a la labranza convencional, aunque con el tiempo se observó un incremento de poros de origen biológico.

Porosidad e intensificación agrícola

A partir de los resultados presentados aquí, se puede sugerir que una mayor intensificación de la secuencia de cultivos como la presente en BP, fue positiva en términos de un aumento en el PI $>50 \mu\text{m}$. Si consideramos la intensificación de cultivos como una mayor permanencia de raíces vivas, el AN con un valor de ISI de 1 presentó valores de porosidad muy semejantes a BP. Sasal *et al.* (2017) a partir de la evaluación de este mismo índice de intensificación de la secuencia (ISI) encontraron a mayores valores, mejores condiciones hidrológicas y estructuras más favorables. Además, estos dos manejos presentaron una importante heterogeneidad espacial (expresada por un mayor desvío estándar en PI $>50 \mu\text{m}$), lo cual indicaría una mayor actividad biológica y una situación más

favorable para el desarrollo de la biota del suelo. Esta mayor heterogeneidad de los valores de PI $>50 \mu\text{m}$ en BP, también están relacionados con la inclusión de cultivos invernales y con una menor relación soja/cultivos en dicho tratamiento (**Tabla 1**). Por consiguiente, la presencia de diferentes estructuras radicales, lo mismo que un suministro más constante y regular de fuentes carbonadas, permitió un mayor desarrollo y estabilidad de la porosidad. Novelli *et al.* (2011; 2013) también encontraron mayores contenidos de carbono total y estabilidad estructural en secuencias de cultivo intensificadas de la región pampeana bajo SD. No obstante, debe considerarse la influencia de la orientación horizontal de los poros en la dinámica hídrica y en la aireación del suelo. Si bien de forma general la orientación horizontal fue detectada más intensamente en MP, los poros elongados en BP presentaron algunos rasgos subhorizontales, a pesar de que este tratamiento presenta 28 años bajo SD y una participación del cultivo de soja en la sucesión de cultivos no tan elevada (**Tabla 1**).

Estos resultados se encuentran en sintonía con los diversos reportes de ocurrencia de estructuras laminares en la región pampeana y en SD (Sasal *et al.*, 2017; Lozano, 2015; Álvarez *et al.*, 2014; Morrás *et al.*, 2004; Bonel & Morrás, 2002). No obstante, como señala Cavalieri *et al.* (2009), no todas las estructuras laminares son homogéneas y por consiguiente su efecto sobre las propiedades físicas e hidrológicas del suelo también es variable. Por ende, los resultados cuantitativos y cualitativos encontrados deben analizarse de forma conjunta para explicar el efecto de la intensificación agrícola. Así, los estudios microscópicos revelaron diferencias en la génesis y en las características cualitativas de las láminas entre ambos tratamientos. De esta forma, si bien en BP se promovió el desarrollo de poros grandes siendo muchos de ellos planares, estos están conformados por la cohesión de microagregados redondeados de origen biológico, mientras que los agregados laminares de MP son resultantes de la compactación de partículas individuales y microagregados. Por consiguiente, es esperable que ambas estructuras laminares tengan un comportamiento diferente en cuanto al movimiento de aire y agua en el suelo.

CONCLUSIONES

La presencia de una mayor proporción de cultivos durante el año, sin la recurrencia a largos períodos de barbecho invernal, favorecieron el desarrollo de la macroporosidad en BP respecto a MP, sobretodo en el rango de poros por encima de los 1000 μm , los que a su vez conforman mayoritariamente a los poros con forma elongada. A su vez, y si bien se observó un predominio en la orientación vertical de los macroporos en BP respecto a MP, ambos tratamientos mostraron una fuerte tendencia a la dirección horizontal de los poros elongados. También se observó una mayor participación de poros redondeados en MP respecto a BP y AN cuyo origen estaría relacionado a compactación de microagregados y partículas individuales mientras que en BP y AN, su origen está asociado a canales biológicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la ANPCyT-PAE-2007 n°18 y por una beca de posdoctorado otorgado por CONICET. Todos los autores de este trabajo son miembros del consorcio BIOSPAS.

BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2012. Evolución de superficie en siembra directa en Argentina. http://www.aapresid.org.ar/images/cms/assets/docs/aapresid.evolucion_superficie_sd_argentina.1977_a_2011.pdf. Octubre, 2013.
- Álvarez, CR; MA Taboada; S Perelman & HJM Morrás. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Res.* 52(6): 533-542.
- Austin, AT; G Pineiro & M Gonzalez-Polo. 2006. More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry* 79:45-60.
- Bathke, GR & GR Blake. 1984. Effects of soybean on soil properties related to soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1398-1401.
- Bayeve, PC; M Laba; W Otten et al. 2010. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data. *Geoderma* 157:51-63.
- Bonel, B & H Morrás. 2000. Estudio de la morfología del horizonte superficial de un Argiudol con diferentes manejos de rastrojo. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina (editado en CD).
- Bonel, B; H Morrás & V Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un suelo Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ci. Suelo (Argentina)* 23:1-12.
- Carter, MR. 2002. Soil Quality for Sustainable Land Management. *Agron. J.* 94:38-47.
- Castiglioni, MG & HJM Morrás. 2007. Uso del análisis digital de imágenes para el estudio de la porosidad de la zona no saturada de Argiudoles de Argentina. En: Giráldez Cervera, JV & FJ Jiménez Hornero (Eds). Estudios de la Zona no Saturada del Suelo Vol. VIII. Cap II. Pp. 83-88. Córdoba. España.
- Castiglioni, MG; HJM Morrás; O Santanatoglia; M Altinier & D Tessier. 2007. Movimiento del agua edáfica en Argiudoles de la Pampa Ondulada con diferente mineralogía de arcillas. *Ci. Suelo (Argentina)* 25:109-121.
- Cavaliere, KMV; AP Silva; CA Tormena; TP Leão; AR Dexter; I Hakansson. 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferralsol in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.* 103:158-164.
- Chagas, C; H Marelli & O Santanatoglia. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ci. Suelo (Argentina)* 12:11-16.
- Chenu, C & D Cosentino. 2011. Microbial regulation of soil structural dynamics. En: Ritz, K & I Young (eds). The architecture and biology of soils. Life in inner space. Pp. 37-70. CABI. United Kingdom, London.
- Costantini, E; S Pellegrini; N Vignozzi & Barbetti R. 2006. Micromorphological characterization and monitoring of internal drainage in soils of vineyards and olive groves in central Italy. *Geoderma* 131:388-403.
- Derpsch, R; T Friedrich; A Kassam & H Li. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 3:1-26.
- Derpsch, et al. 2014. Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil Till. Res.* 137:16-22.
- Domínguez, A. 2012. La macrofauna edáfica y el proceso de descomposición de residuos vegetales como indicadores de sustentabilidad de los manejos agrícolas de la Pampa Húmeda. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- Drees, L; A Karathanasis; L Wilding & R Blevins. 1994. Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:508-517.
- Duval, ME; JA Galantini; JM Martínez, FM; López & LG Wall. 2016. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil Till. Res.* 159:9-22.
- Duval, ME; JA Galantini; JO Iglesias; S Canelo; JM Martínez & LG Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indica-

- tors of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131: 11-19.
- Fernández PL; FB Kraemer & HJM Morrás. 2012. Porosidad y microestructura superficial de un Argiudol típico en distintos momentos bajo diferentes manejos agropecuarios. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo. AACs. Mar del Plata, Argentina.
- Gee, GW & Bauder JW. 1986. Particle-size Analysis. En: *Methods of Soil Analysis, Part 1*. Klute, A. (ed.). Physical and Mineralogical Methods. Pp. 383-441. Madison: American Society of Agronomy.
- Greenland, DJ. 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? *Phil. Trans. Royal Soc. London* 281:193-208.
- Holtzapffel, T. 1985. Les minéraux argileux: préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord* 12:136.
- Infostat / P v1.1. 2002. InfoStat, v. 1.1. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- INTA, 1974-1997. Colección: Cartas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:50.000. CIRN, INTA, Buenos Aires.
- ISSS, ISRIC, FAO. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports N° 84. FAO UN, Rome, Italy. Pp 88.
- Karlen, DL; SS Andrews & JW Doran. 2001. Soil quality: current concepts and applications. *Adv. Agron.* 74:1-40.
- Kraemer, FB. 2015. Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Kraemer, FB; MG Castiglioni; L Carnevale; PL Fernandez & HJM Morrás. 2014. Porosidad estructural y textural en manejos bajo siembra directa en la región pampeana. Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Bahía Blanca, Argentina.
- Kraemer, FB; PL Fernández; LA Garibaldi; M Empson; M G Castiglioni; D Cosentino; H Morrás & E Bressan. 2012. Hidrofobicidad subcrítica en suelos de textura y mineralogía contrastantes de la región pampeana bajo distintos manejos agrícolas. Actas del XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo. AACs. Mar del Plata, Argentina.
- Lima, HV; AP Silva; MC Santos; M Cooper & RE Romero. 2006. Micromorphology and image analysis of a hard-setting Ultisol (Argissolo) in the state of Ceará (Brazil). *Geoderma* 132:416-426.
- Loaiza, J; G Stoops; R Poch & M Casamitjana. 2015. Manual de Micromorfología de Suelos y técnicas complementarias. Fondo Editorial Pascual Bravo, Medellín, Colombia.
- Lozano, 2015. Desarrollo de estructura laminar del suelo en siembra directa. Factores predisponentes y efectos sobre las propiedades hidráulicas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.
- Means, RE & JV Parcher. 1965. Plasticity. En: *Physical properties of soils*. Pp 68-84. Prentice-Hall of India Ltd.
- Moretti, LM; EA Favret & HJM Morrás. 2012. Un procedimiento de medición de la porosidad en cortes delgados de suelos. *Acta Microscópica* 21(A):73.
- Morrás, H. 2014. Micromorfología de un Haplustol degradado por agricultura continua con laboreo convencional. Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Bahía Blanca, Argentina.
- Morrás, H., 2015. Porosidad y microestructura de suelos. En: Loaiza, J; G Stoops; R Poch & M Casamitjana (eds). Manual de Micromorfología de Suelos y técnicas complementarias. Pp. 205-260. Fondo Editorial Pascual Bravo, Medellín, Colombia.
- Morrás, HJM; BA Bonel & R Michelena. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Paraná, Argentina.
- Morrás, HJM; BA Bonel; LM Moretti; EA Favret & EM Bressan. 2008. Porosidad y microestructura superficial de un Argiudol Típico bajo siembra directa y labranza reducida. Actas de XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Morrás, HJM; BA Bonel; FB Kraemer & CR Alvarez. 2012. Topsoil microstructural models in no-till Pampayan Mollisols of Argentina. Morphology and development. Proceedings of the 14th International Working Meeting on Soil Micromorphology. Lleida, España.
- Murphy, CP; P Bullock & RH Turner. 1977. Measurement and characterization of voids in soil thin-sections by image analysis. Principles and techniques. *J Soil Sci.* 28:498-508.
- Novelli, LE; OP Caviglia & RJM Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-68:254-260.
- Novelli, LE; OP Caviglia; MG Wilson & MC Sasal. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196:260-267.
- Nunan, N; K Wu; IM Young, JW Crawford & K Ritz. 2003. Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 44(2):203-15.
- Pagliani M & N Vignozzi. 2003. Image analysis and microscopic techniques to characterize soil pore system. En: Blahovec, J & M Kutilek (eds.). *Physical Methods in Agri-*

- culture. Pp. 13338. Kluwe Academic Publishers. United Kingdom, London.
- Pagliai, M. 1987. Effects of different management practices on soil structure and surface crusting. *Soil Micromorphol.* 7:415-421.
- Rasa, K; T Eickhorst; R Tippkötter & M Yli-Halla. 2012. Structure and pore system in differently managed clayey surface soil as described by micromorphology and image analysis. *Geoderma* 173-174:10-18.
- Reeve, MJ & DGM Hall. 1978. Shrinkage in clayey subsoils of contrasting structure. *J. Soil Sci.* 29:315-323.
- Reynolds, WD; BT Bowman; CF Drury; CS Tana & X Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110:131-146.
- Reynolds, WD; CF Drury; CS Tan; CA Fox; & XM Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152:252-263.
- Roduit, N. 2008. JMicroVision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.2.7. <http://www.jmicrovision.com>.
- Rosa, SM; FB Kraemer; MA Soria; LD Guerrero; HJM Morrás; ELM Figuerola; L Erijman. 2014. The influence of soil properties on denitrifying bacterial communities and denitrification potential in no-till production farms under contrasting management in the Argentinean Pampas. *Appl. Soil Ecol.* 75:172-180.
- Sasal, MC. 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires Argentina.
- Sasal, MC; H Boizard, AE Andriulo, MG Wilson, J Léonard. 2017. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil Till Res.* 173:33-41.
- Schafer, RL; CE Johnson; AJ Koolen; SC Gupta, R Horn. 1992. Future research needs in soil compaction. *Trans. ASAE* 35:1761-1770.
- Shipitalo, MJ & R Protz. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Canadian J. Soil Sci.* 67:445-456.
- Sleutel S; V Cnudde; B Masschaele; J Vlassenbroek; M Dieck; L Van Hoorebeke; P Jacobs & S De Neve. 2008. Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. *Computers & Geosciences* 34:931-938.
- Snedecor GW & WG Cochran. 1980. Statistical methods, 7th Ed. Iowa University Press.
- Soil Survey Staff. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Stoops, G. 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 184 p.
- Studdert, GA & HE Echeverria. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Studdert, GA; GF Domínguez; M Agostini & G Monterubbianesi. 2010. Cropping systems to manage southeastern pampas Mollisols health. I. Organic C and mineralizable N. New advances in Research and Management of World Mollisols proceedings of international symposium on soil quality and management of world Mollisols, Harbin, China.
- Thompson, ML; P Singh; S Corak & WE Straszheim. 1992. Cautionary notes for the automated analysis of soil pore-space images. *Geoderma* 53:399-415.
- Unger, PW & TC Kaspar. 1994. Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.* 86:759-766.
- VandenBygaart, A; R Protz; A Tomlin & J Miller. 1999. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of southwestern Ontario. *Soil Till. Res.* 51:139-149.
- Walkley, A & A Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Wall, LG. 2011. The BIOSPAS Consortium: Soil Biology and Agricultural Production. En: de Bruijn, FJ (ed.). Handbook of Molecular Microbial Ecology I. Pp. 299-306. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA.
- Wischmeier, WH; CB Johnson & BV Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26:189-193.