

EVALUACIÓN DEL ESTADO ESTRUCTURAL DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLA-PASTORILES

Gastón De León^{1,*}, Mario Pérez² , José Terra³ , Oswaldo Ernst² 

¹ Centro Universitario Regional Este. Universidad de la República, Uruguay.

² Facultad de Agronomía. Universidad de la República, Uruguay.

³ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay.

RESUMEN

Se evaluó el estado estructural del suelo en distintos sistemas agrícolas y agrícola-pastoriles mediante la metodología del Perfil Cultural. Se consideraron las estructuras de origen antrópico relacionadas al uso y manejo del suelo y a la actividad biológica en el perfil. La evaluación abarcó la proporción de dichas estructuras y sus características principales, así como la descripción del origen de los macroporos generados por raíces y fauna. Al mismo tiempo, se midió la resistencia al corte para cada estructura, la densidad aparente y las porosidades estructural y textural. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los sistemas con pasturas y aquellos con cultivos continuos. En los primeros predominó la macroporosidad atribuida a la actividad biológica, mientras que en cultivos continuos se relacionó mayormente con procesos físicos de expansión y contracción. Las estructuras más cohesionadas y con menor porosidad estuvieron presentes en todos los tratamientos, probablemente relacionadas con el tráfico de maquinaria. Los sistemas con pasturas revelaron mayor generación de porosidad biológica en suelos con estructuras altamente cohesionadas, con formación de poros redondeados y galerías con excrementos, mientras que en suelos agrícolas continuos surgió una estructura laminar incipiente. La resistencia al corte evidenció variaciones significativas entre estructuras, mostrando alta dependencia del contenido hídrico. Finalmente, el sistema radicular fue más desarrollado en sistemas pastoriles, en contraste con una mayor densidad aparente en cultivos continuos.

Palabras clave: perfil cultural, compactación, porosidad.

EVALUATION OF SOIL STRUCTURAL STATUS IN AGRO-PASTORAL SYSTEMS

* Autor de contacto:
deleong82@gmail.com

Recibido:
01-11-24

Recibido con revisiones:
12-12-24

Aceptado:
06-02-25

Este artículo está bajo
licencia internacional



La titularidad del derecho de
autor/a es de los/as Autores/as.

ABSTRACT

Soil structural status in various agricultural and agro-pastoral systems was evaluated using the Cultural Profile methodology. Anthropogenic-origin structures related to soil use and management and biological activity within the profile were considered. The evaluation encompassed the proportion of these structures, their main characteristics, and the origin of macropores generated by roots and fauna. Additionally, shear strength for each structure, bulk density, and both structural and textural porosities were measured. The results showed significant differences between systems with pastures and those under continuous cropping. In the former, macroporosity was primarily attributed to biological activity, while in continuous cropping systems it was more related to physical processes of expansion and contraction. The most cohesive and least porous structures were present across all treatments, likely associated with machinery traffic. Pasture systems showed greater biological porosity generation in soils with highly cohesive structures, characte-

alized by rounded pores and galleries with excrement, whereas in continuous agricultural soils, an incipient laminar structure emerged. Shear strength showed significant variation between structures, indicating high dependence on soil moisture content. Finally, the root system was more developed in soils under pasture systems, contrasting with greater bulk density in under continuous cropping.

Keywords: cultural profile, compaction, porosity.

INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo está determinada tanto por factores naturales como antrópicos. Los factores naturales están vinculados al origen de los materiales, la textura y los organismos vivos; mientras que los factores antrópicos se relacionan con el manejo de cultivos, pasturas y animales. El tipo e intensidad de laboreo, las especies cultivadas y el contenido hídrico son variables determinantes en el desarrollo de estructuras de origen antrópico en el perfil del suelo (Hamza y Anderson, 2005). El manejo de estas variables suele generar consecuencias negativas tanto a nivel de parcela como a nivel de cuenca, a través de los procesos de compactación, erosión y escurrimiento superficial. Estos procesos deterioran las propiedades físicas del suelo, son acumulativos y sus impactos generalmente son difusos y se manifiestan a largo plazo. La erosión es responsable de la pérdida de partículas del suelo, nutrientes y agroquímicos, lo que provoca una disminución de la fertilidad y, además, contribuye a la eutrofización en los cursos de agua (Rasouli et al., 2014). La reducción en la porosidad del suelo se debe al aumento de la densidad, un fenómeno gobernado por tres procesos: consolidación, compactación y densificación. Tanto la consolidación como la densificación son procesos lentos de reacomodo de partículas y pérdida de porosidad; sin embargo, la compactación es generalmente un proceso rápido provocado por la aplicación de cargas dinámicas durante períodos breves (Albuquerque y Gubiani, 2023, p 145-160). En este contexto, la compactación reorganiza los constituyentes del suelo, lo que genera un aumento en la densidad aparente (SSSA, 1996). Este fenómeno puede provocar pérdidas en el rendimiento y calidad de los cultivos, mayores emisiones de gases de efecto invernadero y un incremento en el escurrimiento de agua (Ball et al., 2008).

La compactación superficial y subsuperficial, junto con la aparición de estructuras laminares en sistemas de siembra directa con cultivos continuos con predominancia de soja (*Glycine max*), han sido reportadas por diversos autores a nivel regional (Sasal et al., 2016a, 2016b, 2010, 2006; Sasal, 2003; Álvarez et al., 2014; Taboada et al., 1998) e internacional (Boizard et al., 2017, 2013; Peigné et al., 2013). Los cambios en la estructura del suelo, descritos a través de los agregados, muestran un aumento de la cohesión entre partículas, la presencia de caras de ruptura lisas y una disminución en la macroporosidad, entendida como los espacios vacíos mayores a 80 μm de diámetro (SSSA, 1996). Estos poros son fundamentales para facilitar el movimiento del agua y el intercambio gaseoso, procesos esenciales para el crecimiento de las raíces y la actividad biológica. Una reducción en su abundancia puede comprometer el drenaje y la aireación del suelo, afectando negativamente su funcionalidad y su capacidad para soportar el manejo agrícola sin degradarse (Brady y Weill, 2008). Estas estructuras se clasifican de acuerdo con las propiedades mencionadas anteriormente y sirven como indicadores diagnóstico del estado estructural del suelo. Los tipos de estructuras resultantes del manejo del suelo difieren entre suelos arcillosos y arenosos, tanto superficial como subsuperficialmente (Ball y Munkholm, 2015), destacando la necesidad de comprender su desarrollo para planificar sistemas agrícolas sostenibles. Tanto en sistemas de labranza convencional (Roger-Estrade et al., 2004, Boizard et al., 2002) como en sistemas de siembra directa (Boizard et al., 2017, 2013, 2012) los cambios a nivel estructural pueden ser evidenciados a través de la descripción y el análisis visual de las estructuras generadas y de la actividad biológica presente. Estas metodologías de descripción son de carácter semi cuantitativas, sin embargo, las mismas suelen ir acompañadas de indicadores que permiten cuantificar los cambios en la estructura, e.g., la determinación de la densidad aparente (dap). Una de las metodologías propuestas para evaluar el proceso de compactación es a través de la detección visual y la clasificación de estructuras de acuerdo al grado de cohesión y a la presencia o no de macroporosidad visible. El perfil cultural se define como el conjunto constituido por la sucesión de capas de tierra individualizadas por la intervención de los instrumentos de cultivo, las raíces de los vegetales y los factores naturales (Henin et al. 1972).

La metodología, denominada "Perfil Cultural", fue desarrollada por Gautronneau y Manichon (1987) en Francia y desde entonces la misma ha sido utilizada en diversos estudios para determinar los efectos de los usos y manejos del suelo tanto para labranza convencional (Richard et al. 1999, Boizard et al 2002, Roger-Estrade, 2004), así como para sistemas de siembra directa o laboreo reducido (Sasal M.C., 2003, Boizard et al. 2013, Boizard et al. 2017). Además, ha servido como referencia para clasificar la estructura del suelo en

estudios sobre la actividad biológica, como el impacto de las lombrices en la formación de macroporos y la mejora de las propiedades físicas del suelo, proporcionando una base para entender los procesos de regeneración natural y el potencial de mitigación de la compactación inducida por el manejo (Capowiwz et al. 2009, Peigné et al, 2013). La fortaleza de este método es que permite evaluar detalladamente la estructura del perfil del suelo al mismo tiempo que tiene en cuenta la variabilidad espacial aportada por los cultivos y las prácticas de manejo. Debido a la introducción de la siembra directa en los sistemas de cultivo, Boizard et al. (2017) modificaron y actualizaron la metodología para mejorar la descripción del tipo de estructuras que se generan en dichos sistemas y cuáles son los factores y los procesos que lo gobiernan, teniendo en cuenta las claras diferencias con los métodos de labranza convencional.

Las estructuras formadas en el perfil de suelo pueden manifestarse como un área de límites claros donde la compactación es mayor y que puede estar o no asociada al tráfico, o como una estructura de carácter laminar dispuesta horizontalmente en los primeros centímetros del suelo. Sin embargo, a nivel local no se han reportado disminuciones significativas en los rendimientos directamente atribuidas a la degradación física, por lo cual, comprender la dinámica de las estructuras de origen antrópico resulta fundamental para evaluar de manera integral la sostenibilidad del sistema suelo y como dichos cambios están afectando los rendimientos.

En Uruguay, el principal cambio tecnológico en la agricultura a comienzos del siglo XXI fue la introducción de la siembra directa lo cual disminuyó notoriamente la erosión (García et al., 2004) mitigando así una problemática ambiental de larga data en el país. Al mismo tiempo, con el ingreso de dicha tecnología y la incorporación de nuevos materiales genéticos, la agricultura uruguaya amplió su superficie de 350.000 ha a más de un millón de ha en diez años (Ernst y Siri-Prieto, 2013). Según DIEA (2021) la superficie total cultivada para la zafra 2021 fue de 1.134mil ha y se distribuyeron en 523 mil ha de cultivos de invierno (*Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare* y *Brassica napus*) y 1078.2mil ha de cultivos estivales de secano (*Zea mays*, *Sorghum sp.* y *Glycine max.*).

Esta expansión de la agricultura ha implicado un uso más intensivo del recurso suelo y el uso de tierras de menor aptitud agrícola dadas las ventajas comparativas de la siembra directa sobre la labranza convencional. En ese sentido, Rodríguez et al 2020 y Calvo et al. 2024) han detectado una mayor densidad aparente entre los 0-5 y 5-10 cm en sitios con agricultura comparados con un suelo aledaño, pero con diferentes coberturas (campo natural y bosque nativo).

En los sistemas agrícolas de Uruguay, la práctica predominante ha sido la alternancia entre pasturas y cultivos anuales. Sin embargo, con la introducción de la siembra directa, esta práctica ha disminuido, ya que permite prescindir de la fase de pastura y aumentar el número de cultivos continuos sin rotación. Este cambio es legalmente aceptado a través de los planes de uso y manejo de suelos de la legislación nacional. Sin embargo, las pasturas aportan beneficios significativos, como la incorporación de materia orgánica en profundidad y la mejora de la estructura del suelo (Peigné et al., 2013; Place et al., 2008; Vocanson et al., 2006; Bertol et al., 1998; Unger y Kaspar, 1994).

El objetivo de este trabajo fue describir el estado estructural del suelo en sistemas agrícolas y agrícola-pastoriles en rotaciones de largo plazo, utilizando la metodología del perfil cultural. Se caracterizaron las estructuras a nivel superficial y subsuperficial mediante la descripción del sistema radicular, la resistencia al corte y el sistema poroso. La hipótesis principal es que la siembra directa y la intensidad de los cultivos promueven, a largo plazo, la formación de estructuras de alta cohesión en el suelo debido a los efectos acumulativos de las prácticas de manejo. En este sentido, se plantea que dichas estructuras pueden ser identificadas a nivel de parcela a través de descripciones visuales y mediante el uso de distintos indicadores físicos. Desde esta perspectiva, los cultivos continuos favorecerían el desarrollo de estructuras compactas por la simplificación del sistema radicular y el incremento del tránsito de maquinaria en la parcela. Por otra parte, la generación de macroporosidad en sistemas agrícola-pastoriles estaría altamente condicionada por la inclusión de pasturas en la rotación, las cuales desarrollan sistemas radiculares más grandes y disminuyen los períodos de tránsito de maquinaria por ciclos más largos, favoreciendo así el desarrollo del sistema poroso. Por lo tanto, el aumento de la macroporosidad asociada al crecimiento radicular y la creación de poros debido a la actividad biológica se verían facilitados por la presencia de ciclos de pastura en la rotación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio y tratamientos

El estudio se realizó en dos experimentos de largo plazo (Apéndice 1). El primero se ubicó en la Unidad Experimental "Palo a Pique" del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, iniciado en 1995 con el objetivo de maximizar la producción ganadera mediante rotaciones de cultivos y pasturas bajo siembra directa, promoviendo la sostenibilidad económica, ambiental y operativa (Rovira et al., 2020). El suelo corresponde a un Argiudol abruptico de textura franca, relieve suave a aplanado y pendiente entre 2 y 3%, con una profundidad superior a 50 cm y grietas de hasta 30 cm en épocas de sequía (SSS, 2014). El clima mesotérmico húmedo presenta temperaturas medias de 23°C en verano y 11°C en primavera, con una precipitación anual de 1300 mm (Pravia et al., 2019; MAP/DSF, 1976).

El segundo experimento se llevó a cabo en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni en un Argiudol típico con relieve suavemente ondulado y pendientes de 1 a 2%, de textura franco arcillosa, alta fertilidad y moderado drenaje. Las condiciones climáticas incluyen una precipitación media histórica de 1300 mm y una temperatura media anual de 18°C (Castaña et al., 2011). La Tabla N°1 presenta las principales características de cada sitio, incluyendo ubicación, textura (arcilla, limo y arena), contenido hídrico a capacidad de campo (33 kPa) y a punto de marchitez permanente (1500 KPa) así como el contenido de carbono orgánico (corg) y la densidad aparente (NCSS, 2018).

Tabla 1. Principales características de los suelos: ubicación, textura, contenido hídrico, carbono orgánico y densidad aparente.

Table 1. Main characteristics of soils: location, texture, water content, organic carbon content, and bulk density.

Suelo	Ubicación	Textura (%)			Cont. Grav. (ml)		Corg (%)	Dap (g.cm ⁻³)
		Arc	L	A	33 kPa	1500 kPa		
Argiudol abruptico	33°15'51"S 54°29'30"O	20,7	40,2	39,1	30.2	13.6	3.61	1.34
Argiudol típico	32°22'44"S 58°3'45"O	33	27.2	39.8	30.2	17	3.75	1.64

Los indicadores fueron evaluados para 0-9 cm en el Argiudol abruptico (Pedon ID: 96FN930013) y de 0-11 cm en el Argiudol típico (Pedon ID: 96FN930002). Arc.: arcilla, L: limo, A: arena, Cont. Grav.: contenido gravimétrico (ml), Corg: carbono orgánico (%), Dap: densidad aparente (g.cm⁻³).

The indicators were evaluated at 0–9 cm in the Abruptic argiudol (Pedon ID: 96FN930013) and at 0–11 cm in the Typic argiudol (Pedon ID: 96FN930002). Clay: clay, Silt: silt, Sand: sand, Grav. Cont.: gravimetric content (ml), Org. C: organic carbon (%), BD: bulk density (g.cm⁻³).

En el Argiudol abruptico se evaluaron distintas intensidades de uso del suelo bajo siembra directa. Los tratamientos fueron: Pastura mejorada permanente (PP) renovadas cada 4 años que consistió en un mejoramiento sobre campo natural con festuca (*Festuca arundinacea*), trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y lotus (*Lotus corniculatus* L.). Cultivo Continuo (CC), que consistió en una rotación de Trigo (*Triticum spp*), Avena (*Avena sativa*), Sorgo (*Sorghum spp.*) y Soja (*Glycine max*). Por último, un sistema de rotación cultivo-pasturas que consistió en Avena (*Avena sativa*), sorgo (*Sorghum spp.*), soja (*Glycine max*) y trigo (*Triticum spp*) y una pastura plurianual de trébol blanco, lotus y una gramínea perenne (*Festuca arundinacea*). Este último tratamiento se evaluó en dos momentos contrastantes; luego de los 2 años de cultivo (R2C) y luego de los 4 años de pasturas (R4P). Tanto para PP como para R4P, el muestreo se realizó cuando la pastura se encontraba en pleno crecimiento y bajo pastoreo en primavera. En el tratamiento CC, el muestreo tuvo lugar durante el barbecho previo a la siembra de verano, mientras que en el caso de R2C, se realizó después de la cosecha del cultivo de verano.

En el Argiudol típico, los tratamientos fueron cultivo continuo con siembra directa de soja (*Glycine max*) (CC3) y Sorgo (*Sorghum spp.*) (CC4) con cultivo de cobertura de invierno. Ambas fueron evaluadas luego de la cosecha y previo a la implantación de la cobertura invernal.

Características del área de muestreo

En cada tratamiento, se realizaron dos calicatas, una en la zona alta y otra en la zona baja de la parcela, con el objetivo de abarcar la mayor variabilidad espacial. Se identificaron zonas homogéneas en el paisaje dentro de las parcelas representativas del área total y del estado fenológico de los cultivos o pasturas. Las calicatas tuvieron dos metros de largo, 1 metro y medio de ancho y un metro de profundidad. Dichas calicatas fueron dispuestas perpendicularmente al sentido del tránsito de maquinaria, dejando centradas las huellas más recientes. El suelo removido fue dispuesto hacia la cara donde no se realizó ningún tipo de diagnóstico.

Muestreo y análisis

En orden cronológico, para cada calicata se determinó la presencia de raíces, a través del método del perfil cultural, se identificaron estructuras de acuerdo a sus características y se midió la resistencia al corte (RC) en las mismas. Sobre dichas estructuras se extrajeron muestras para analizar el sistema poroso a través de la densidad aparente y la descripción de la porosidad textural (Ptext). Se realizó el análisis de contenido gravimétrico para determinar la humedad del suelo.

Sistema radicular

La determinación del área ocupada por las raíces fue realizada por el método de la cuadrícula descrito por Böhm (1976), a través del cual se identificaron áreas con presencia de raíces en una matriz de dos por dos cm en un marco de un metro por 0.6 metros, el cual fue apoyado sobre una cara de la calicata. En cada calicata se realizaron dos determinaciones, lo cual fue considerado como una repetición, completándose así un total de cuatro determinaciones por tratamiento ($n=4$). La cuadrícula se apoyó sobre la cara de la calicata y se verificó la presencia o ausencia de raíces visualmente. Las raíces fueron identificadas con elementos visibles y fotografiadas para la construcción de una matriz integrada por ceros (0: ausencia de raíces) y unos (1: presencia de raíces), de acuerdo a si la raíz estaba presente o no en el área de dos por dos cm. A partir de la matriz generada se cuantificó la presencia/ausencia de raíces para la creación de mapas de distribución espacial y cuantificación de la presencia de raíces en profundidad.

Perfil Cultural

La evaluación de la calidad estructural del suelo se realizó a través de la metodología del perfil cultural (PC) descrita por Gautronneau y Manichon (1987) y adaptada para sistemas con sistema directa o laboreo reducido (Boizard et al., 2017, Ball y Munkholm, 2015). La descripción del perfil se realizó en un largo total de dos metros en la calicata y una profundidad máxima de análisis de 40 cm. En el área delimitada se identificaron estructuras de acuerdo a sus características principales, el tamaño y la forma en que se ensamblan los agregados y el estado interno de los mismos, la cohesión y la macroporosidad visible. A través de la metodología del PC se delimitaron las áreas descritas con un elemento visible y se fotografió el perfil a intervalos horizontales de 0,5m desde una distancia de un metro. Las imágenes fueron ensambladas con programas de edición de imágenes (PanaVue Image Assamblar™) para generar una única imagen escalada, la cual permitió el cálculo de la proporción de las estructuras a partir de una única imagen a través del software (ImageJ™).

Se emplearon tres niveles de clasificación para categorizar las áreas previamente delimitadas. El primer nivel hace énfasis en la forma en que se ordenan los agregados y se definen tres tipos: Tipo "O" cuando el suelo está altamente fragmentado, con pequeños agregados y dominio de fracciones finas. El tipo "B" cuando presenta agregados mayores que 10 cm, con porosidad visible, y menor dominio de fracciones finas y por último el Tipo "C" donde no se distinguen agregados, y el suelo presenta características masivas.

El segundo nivel de clasificación define tres estructuras básicas; la gamma (Γ) la cual es una estructura con porosidad visible a simple vista tanto dentro del agregado como entre ellos, de fácil desagregación y con baja cohesión entre las partículas constituyentes. La estructura tipo delta (Δ) se refiere a las zonas compactadas con estructuras masivas que se identifican por su elevada cohesión, reducida porosidad y presencia de caras de ruptura lisas. Por último, la estructura tipo phi (Φ) que es formada a partir de agregados tipo Δ por la generación de fisuras por el efecto de expansión y contracción lo cual está directamente relacionado con el clima y el tipo de material arcilloso principalmente.

La estructura tipo laminar (P) fue incorporada a la metodología del perfil cultural debido a su aparición en sistemas de siembra directa después de sucesivos años de cultivo continuo especialmente en suelos limosos (Boizard et al., 2017, Sasal et al., 2016a, 2016b, Sasal, 2003). Dicha estructura se presenta con la porosidad orientada paralelamente a la superficie del suelo en los primeros centímetros del horizonte superficial, o por debajo del mismo. La principal característica de esta estructura es la disposición horizontal de la porosidad que puede incidir en la dinámica del agua en el suelo al mismo tiempo que dificulta las condiciones para el enraizamiento.

Por último, el tercer nivel de clasificación hace hincapié en el origen biológico de los macroporos diferenciando 2 categorías de acuerdo a la calidad de los poros siendo la denominada b1 cuando existe presencia de macroporosidad tubular de cualquier origen (raíces y/o fauna) y b2 cuando se observan desechos frescos y cámaras o galerías por actividad de la fauna del suelo (Boizard et al., 2017).

Resistencia al corte

La RC del suelo se midió aplicando un test de resistencia con una herramienta de mano ("Pocket vane tester" Eijkelkamp, Giesbeek, Holanda) en cada una de las áreas que fueron delimitadas previamente por el PC. El test a campo midió la resistencia máxima que tuvo el suelo a ser fracturado a partir de la torsión aplicada con dicha herramienta. El test se aplicó a modo de repetición cinco veces en las estructuras menores a 0.1 m² y 10 veces en las estructuras mayores que 0,1 m². Para el tratamiento el valor total de la RC fue ponderado de acuerdo con la proporción de las estructuras descritas previamente por el método del PC.

Sistema poroso

La caracterización del sistema poroso se realizó a través de la determinación de la densidad aparente, y la Porosidad total (Ptot), subclasificando a esta última en dos componentes, la Porosidad textural y Porosidad estructural (Pest). Se determinó la Dap, y para Dap textural en las estructuras previamente definidas por el PC. Los valores de Dap, y Ptot de los tratamientos fueron ponderados de acuerdo a la proporción del área ocupada por las estructuras descritas en el perfil del suelo.

La Dap se determinó mediante el método del cilindro descrito por Burke et al. (1986) y la Ptot se calculó a partir de la ecuación:

$$P_{tot} = [1 - (Dap/Dreal)] \times 100$$

siendo: Ptot: Porosidad total (%). Dap: densidad aparente (gr.cm⁻³). Dreal: Densidad de los sólidos (2,65 g.cm⁻³).

La Dap textural se determinó por inmersión en kerosene de agregados de 2 a 3 mm (Stengel, 1979) descrita por Sasal (2003). La Ptext es una expresión de la fracción mineral y orgánica por lo tanto es de esperar que los cambios en dicha variable sean lentos. La determinación de la Ptext no incluye la porosidad generada por factores climáticos, biológicos y de origen antrópico por lo cual se debería considerar constante en el experimento a lo largo del tiempo. La Pest se determinó como:

$$P_{est} = [1 - (Dap/Dtext)] \times 100$$

siendo: Pest: Porosidad estructural (%). Dap: Densidad aparente (g.cm⁻³). Dtext: Densidad aparente textural (g.cm⁻³).

La Ptot resulta de la suma de ambas porosidades; por lo cual

$$P_{text} = P_{tot} - P_{est}$$

siendo: Ptext: Porosidad textural (%). Ptot: Porosidad total (%). Pest: Porosidad estructural (%).

Por lo tanto, a partir de la determinación de la densidad aparente textural, se calculó la Pest y por diferencia con la Ptot se determinó la Ptext.

Análisis estadístico

El estudio evaluó cómo los tratamientos afectaron las propiedades del suelo a través del análisis de las unidades estructurales del perfil cultural (Δ , Φ , Γ), que representan proporciones específicas del área to-

tal y que sirven como base para la toma de muestras de variables continuas. Los tratamientos fueron aplicados en dos tipos de suelos, Argiudol abruptico (con cuatro tratamientos) y Argiudol típico (con dos tratamientos). Para controlar la variabilidad espacial, se definieron dos bloques dentro de cada tipo de suelo: una zona alta y una zona baja. Dentro de cada unidad estructural, se midieron las variables RC, Dap y Pest, cuyos valores fueron ponderados en función de la proporción que representó cada unidad estructural dentro del área total. Para el análisis estadístico, se utilizó la prueba de Chi-cuadrado de Pearson para comparar las proporciones de unidades estructurales entre los tratamientos, y, cuando se detectaron diferencias significativas, se realizaron comparaciones post hoc con la prueba exacta de Fisher. Además, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para evaluar las diferencias en las variables continuas dentro de cada tratamiento, ponderadas según las unidades estructurales. Los datos fueron analizados utilizando un modelo jerárquico, en el cual los tratamientos fueron considerados efectos fijos, los bloques dentro de cada tratamiento como efectos aleatorios, y las unidades estructurales como covariables ponderadas. Este enfoque permitió evaluar los efectos de los tratamientos sobre las propiedades del suelo, considerando tanto la variabilidad espacial como las diferencias estructurales dentro de cada bloque y unidad estructural.

RESULTADOS

Proporción de raíces en el perfil

La Figura 1 muestra la proporción de raíces en profundidad en el Argiudol abruptico (Figura 1a) y en el Argiudol típico (Figura 1b) para todos los tratamientos evaluados. En el Argiudol abruptico, se observa una marcada diferencia en los sistemas radiculares entre el tratamiento posterior a la cosecha (R2C), que presenta una baja proporción de raíces, y los tratamientos con pasturas (PP y R4P). Estos últimos presentan una mayor proporción de raíces en el intervalo de 0 a 0.6 m de profundidad, con PP alcanzando el 30,3 % y R4P el 31,7 % del área total ocupada por raíces. En contraste, el tratamiento CC muestra un 23,8 % de raíces y R2C solo un 11,8 % en el mismo rango de profundidad.

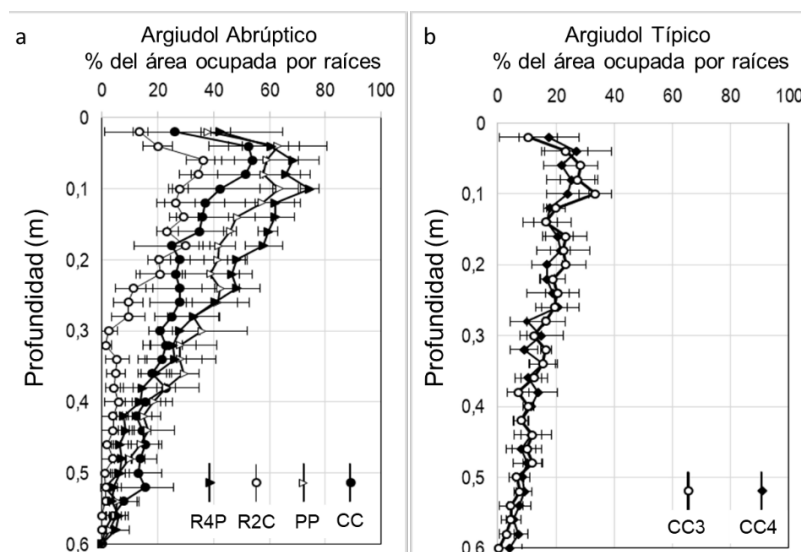


Figura 1. Proporción de raíces según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación luego de 2 años de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo.

Figure 1. Proportion of roots by soil type and treatment. CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation after 2 years of cropping. R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Permanent Pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping.

En el Argiudol típico, los porcentajes de raíces fueron de 14,3 % para CC3 y 14,9 % para CC4, valores que concuerdan con la evaluación posterior a la cosecha de cultivos en ambos tratamientos. Esto indica que, en sistemas de cultivo con especies anuales en la zafra anterior, la presencia de raíces residuales es menor en comparación con las pasturas.

Distribución espacial de las raíces

La distribución espacial de las raíces en profundidad, según el tipo de suelo, mostró variaciones entre los tratamientos, las cuales se visualizaron en un mapa de presencia o ausencia de raíces (Apéndice 2). Se

verificó que el 50% de las raíces se acumularon en los primeros centímetros del suelo, alcanzando esta proporción a profundidades de 0,13 m, 0,15 m, 0,16 m y 0,17 m para R2C, R4P, PP y CC, respectivamente, en el Argiudol abruptico. En los tratamientos CC3 y CC4 en el Argiudol típico, los límites se observaron a 0,2 m y 0,19 m de profundidad, respectivamente.

Para el 80% acumulado de la concentración de raíces, se mantuvo la misma tendencia en los tratamientos: las profundidades límite fueron de 0,24 m (R2C), 0,26 m (R4P), 0,3 m (PP) y 0,35 m (CC) en el Argiudol abruptico. En el Argiudol típico, los límites para el 80% de las raíces se alcanzaron a 0,37 m y 0,34 m de profundidad en CC3 y CC4, respectivamente. En general, las pasturas en el Argiudol abruptico presentaron mayor proporción de ocupación en el perfil y una exploración radicular más profunda en comparación con CC. En los tratamientos CC3 y CC4 del Argiudol típico, se observó una mayor profundidad de arraigamiento, aunque con menor densidad, posiblemente facilitada por un horizonte iluvial menos desarrollado, lo que favorece la exploración radicular.

Perfil cultural

La Figura 2 muestra un ejemplo de los perfiles culturales para cada tratamiento en ambos suelos. La cohesión del suelo y la resistencia a las herramientas utilizadas para describir las estructuras estuvieron fuertemente asociadas al contenido de humedad del suelo en el momento de la evaluación; los suelos con bajos contenidos hídricos fueron los más difíciles de analizar. A pesar de ello, se identificaron áreas del suelo con diferentes grados de cohesión y variaciones visibles a simple vista en el sistema poroso, permitiendo una delimitación clara y precisa de las estructuras.

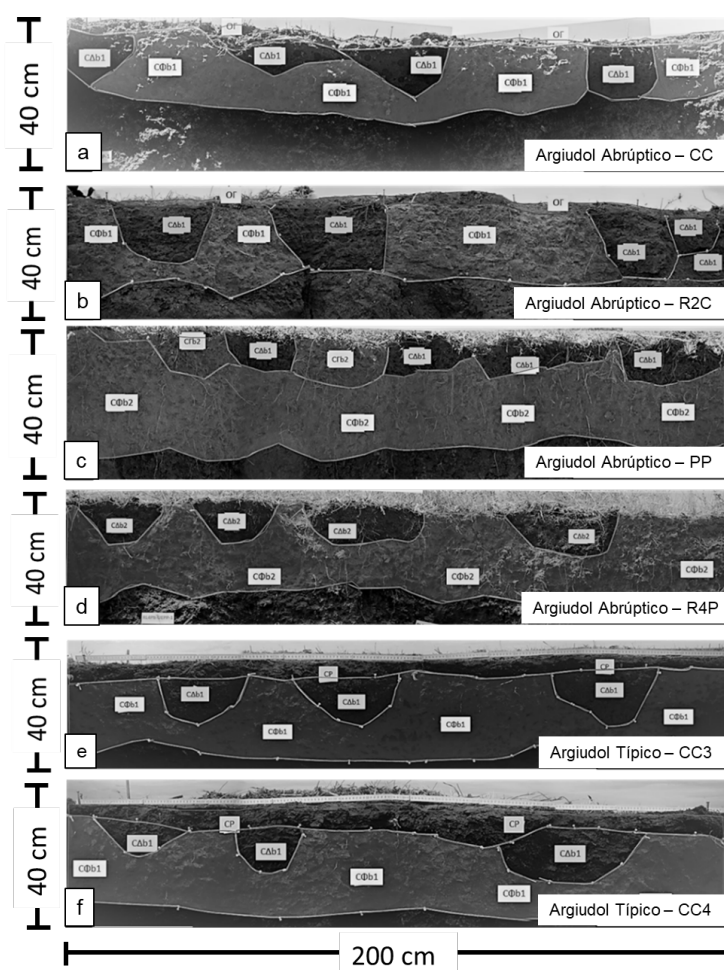


Figura 2. Perfil cultural según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2° año de cultivo. R4P: Rotación en 4° año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo

Figure 2. Cultural profile by soil type and treatment. CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation in the 2nd year of cropping, R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Permanent Improved Pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping.

En el primer nivel de clasificación la estructura tipo "C" estuvo en el 100% del perfil descrito en los tratamientos con pasturas R4P y PP en el suelo Argiudol abruptico. En tanto en los tratamientos CC y R2C el porcentaje de la estructura tipo C fue de 85,3% y 84,3%, respectivamente. En estos últimos se describió en los primeros centímetros del perfil la estructura tipo O en un 14,7% y 15,7% para CC y R2C, respectivamente. La estructura tipo "O" se traduce como un horizonte apedal de unos 3 a 5 cm de profundidad vinculada a las labores de siembra. En los dos tratamientos ubicados en el Argiudol típico se identificó la estructura tipo C en el 100% del perfil. La estructura tipo C se caracterizó por presentar un carácter masivo cuando estuvo asociado a la estructura de tipo Φ donde no se visualizaron claramente los agregados. A nivel de la calicata se observaron los rasgos determinantes de las estructuras tipo Φ principalmente en forma de grietas por efecto de la expansión y contracción que el suelo presenta por sus características vérticas. Donde se identificaron estructuras tipo Δ las mismas no superaron los 10cm de diámetro lo cual estaría indicando que ante un aumento de la cohesión del suelo (compactación) la misma no es generalizada a nivel de un horizonte o en una determinada profundidad en el perfil. En el segundo nivel de clasificación, en el Argiudol abruptico la proporción de estructuras de tipo Φ fue 60,4%, 59,7%, 75% y 73,3% en CC, R2C, PP, R4P, respectivamente. Esta estructura tuvo la característica de presentar macroporosidad visible asociada a las fracturas sufridas por el efecto de expansión y contracción por alternancia en el contenido hídrico y en menor medida por la actividad biológica.

En el Argiudol típico la estructura predominante también fue la tipo Φ con 62% y 62,8% del área total para CC3 y CC4, respectivamente. La estructura tipo Δ se describió en ambos sitios y en todos los tratamientos. Para el Argiudol abruptico en los sistemas más intensivos la proporción fue 25 % para CC y 24,7 % para R2C. En PP y R4P la proporción fue 20,2 % y 26,8 % respectivamente. Para el Argiudol típico la proporción de la estructura tipo Δ fue 22,7 y 15,6 % en CC3 y CC4, respectivamente. Dicha estructura siempre presentó macroporosidad visible, aunque el origen pudo diferir entre la expansión y contracción y la porosidad resultante de la exploración radicular. La estructura tipo laminar fue descrita en el suelo Argiudol típico en ambos tratamientos ocupando 15,3% y 17,8% en CC3 y CC4 respectivamente. Dicha estructura se identificó a campo por la clara disposición de los macroporos en el eje horizontal y siempre estuvo asociada a los primeros centímetros del suelo. La estructura tipo Γ se presentó en muy baja proporción, en PP la proporción de dicha estructura fue de 4,8% y en CC4 3,9 % y estuvo asociado a la actividad de la fauna mayor (madrigueras). Por último, en el tercer nivel de clasificación se realizó una descripción de la macroporosidad en las estructuras tipo Γ , Δ y Φ de acuerdo al origen y la calidad de los macroporos a partir del análisis de campo de las distintas estructuras. En el Argiudol abruptico en los tratamientos PP y R4P la actividad de la fauna del suelo clasificada como b2 estuvo presente en 84,7% y 100% del perfil respectivamente. En CC y R2C la actividad tipo b1 fue 100% en ambos tratamientos. En el suelo Argiudol típico la clasificación tipo b1 representó el 84,7% y 78,3% de CC3 y CC4, respectivamente. De esta forma se observa que para el Argiudol abruptico si bien la estructura tipo C Φ fue predominante, la mayor actividad biológica asociada a la presencia de las pasturas, presentaron macroporosidad visible asociada a la actividad de la fauna (b2) con presencia de canales y galerías.

La utilización de las metodologías de apreciación visual para analizar la estructura del suelo reveló diferencias significativas entre los diversos tratamientos y tipos de suelo lo cual se resume en la Figura 3. La característica más relevante es la variabilidad espacial en la formación de estructuras a lo largo del perfil y las diferencias que dichas estructuras tienen entre tratamientos. Aunque existen estructuras específicas asociadas a ciertos manejos y a diferentes condiciones de cultivo, la mayor parte del perfil está compuesto por estructuras de tipo Φ y Δ lo cual indica estructuras de alta cohesión y reducida macroporosidad (Apéndice 3). Estas estructuras se distribuyeron principalmente en forma de bulbo de compactación subsuperficial por lo que sugiere que las mismas son producto del tránsito regular dentro de la parcela.

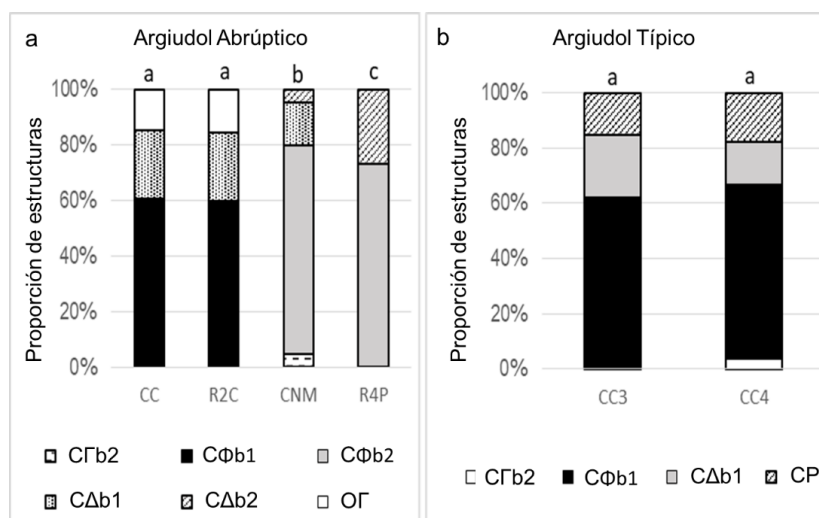


Figura 3. Proporción de estructuras según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2° año de cultivo, R4P: Rotación en 4° año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo. Las letras sobre las barras indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$) según la prueba de Chi-cuadrado de Pearson.

Figure 3. Proportion of structures by soil type and treatment. CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation in the 2nd year of cropping, R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Permanent Improved Pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping. Letters above the bars indicate significant differences ($\alpha=0.05$) according to Pearson's Chi-square test.

En los tratamientos con pasturas (PP y R4P) la presencia de actividad biológica se evidenció en un mayor número de poros circulares y galerías de lombrices (Apéndice 4). También se evidenció la mayor proporción de raíces en el perfil en ambos tratamientos. En cuanto a las estructuras identificadas como Δ se pudo verificar que, a pesar de ser estructuras compactas, de alta cohesión, mantuvieron la porosidad principalmente de origen biológico, pero también climático. El comportamiento de las estructuras clasificadas como Φ fue similar a las de tipo Δ en lo referente a cantidad de raíces y actividad biológica, sin embargo, el grado de cohesión fue menor. La estructura tipo Γ se describió en los tratamientos con cultivos (CC y R2C) y estuvo asociado a las labores en los primeros centímetros del suelo.

En el Argiudol típico los tipos de cultivos no modificaron la presencia y distribución de las distintas estructuras siendo ambos perfiles similares en cuanto a disposición espacial y área total de cada una de ellas. En CC3 y CC4 se observó la aparición de una estructura de tipo laminar incipiente entre los 0,05 y 0,1m de profundidad en sentido horizontal (P). Si bien en la estructura no se visualizaba claramente la disponibilidad de los macroporos con la ayuda de herramientas de mano se pudo verificar dicha condición (Apéndice 5). Al mismo tiempo, los límites inferiores de la estructura P no fueron claros por lo cual la detección visual y la delimitación de la misma fueron complejas. La estructura tipo P estuvo asociada a los primeros centímetros del suelo y se diferenció de la estructura tipo Γ por la disposición horizontal de los poros y mayor cohesión. La aparición de la estructura tipo Γ en CC4 estuvo directamente relacionada en una madriguera de animal que confirió al área la característica de ser una estructura de baja cohesión y fácil desagregación por lo cual no fue considerado un efecto del sistema de cultivo.

Resistencia al corte

El resultado del test de resistencia al corte si bien fue muy dependiente del contenido de humedad del suelo al momento de la evaluación, sirvió para detectar diferencias entre las estructuras descritas a través de la metodología del PC.

Resistencia al corte por tratamiento

En la Figura 4 se observa el valor de RC (MPa) de acuerdo al sitio y tratamiento.

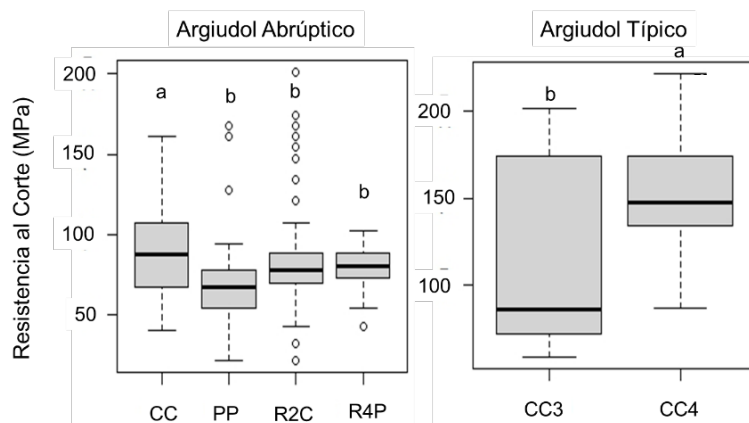


Figura 4. Resistencia al corte según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, PP: Pastura Permanente Mejorada, R2C: Rotación en el 2° año de cultivo, R4P: Rotación en el 4° año de pastura, CC3: Cultivo continuo de soja, CC4: Cultivo continuo de sorgo. La línea central en la caja representa la mediana, y la caja abarca el rango intercuartil (Q1-Q3). Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas entre los tratamientos según ANOVA ($P < 0.0001$).

Figure 4. Shear strength by soil type and treatment. CC: Continuous Cropping, PP: Permanent Improved Pasture, R2C: Rotation in the 2nd year of cropping, R4P: Rotation in the 4th year of pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping. Each box spans the interquartile range (Q1-Q3) and the central line in each box represents the median. Letters above the boxes indicate significant differences between treatments according to ANOVA ($P < 0.0001$), with different letters denoting significantly different groups.

En el suelo Argiudol abrupto la mayor resistencia al corte promedio fue en CC (88 MPa), en tanto no difirieron PP (82 MPa) y R4P (82 MPa). El tratamiento R2C presentó el menor valor de RC (72 Kg.m⁻²). Los tratamientos con pasturas presentaron mayor contenido hídrico (contenido gravimétrico %) siendo R4P 27% y PP 23%. Los tratamientos CC y R2C tuvieron un 20% y 16%, respectivamente. En el suelo Argiudol típico el tratamiento CC4 presentó mayor RC (149MPa) que CC3 (120 MPa). El contenido hídrico fue de 21% y 23% para CC3 y CC4, respectivamente.

Resistencia al corte por estructura

La Figura 5 muestra la resistencia al corte de las estructuras determinadas a través de la metodología del perfil cultural según los tratamientos.

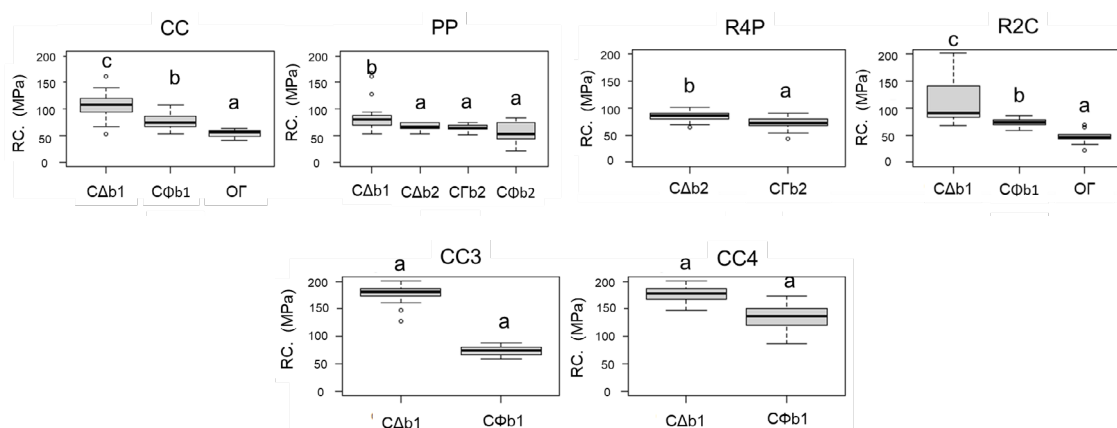


Figura 5. Resistencia al corte según tratamientos y estructuras. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2° año de cultivo, R4P: Rotación en 4° año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo. La línea central en la caja representa la mediana, y la caja abarca el rango intercuartil (Q1-Q3). Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas entre los tratamientos según ANOVA ($P < 0.0001$).

Figure 5. Shear strength by treatment and structure. CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation in the 2nd year of cropping, R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Permanent Improved Pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping. Each box spans the interquartile range (Q1-Q3) and the central line in each box represents the median. Letters above the boxes indicate significant differences between treatments according to ANOVA ($P < 0.0001$).

La RC resultó ser un indicador lo suficientemente sensible para detectar diferencias significativas en las estructuras descritas por el PC. Si bien los valores promedio fueron superiores a los encontrados por otros autores (Boizard et al., 2012; Sasal, 2003) las diferencias encontradas están en concordancia con lo esperado para dichas estructuras. En ese sentido las estructuras tipo Δ presentaron mayores valores de RC en comparación con las estructuras tipo Φ . En los sistemas con cultivo CC y R2C la estructura tipo Γ presentó valores menores de RC.

Densidad aparente

En la Figura 6 se muestra la densidad aparente según tipo de suelo y tratamiento.

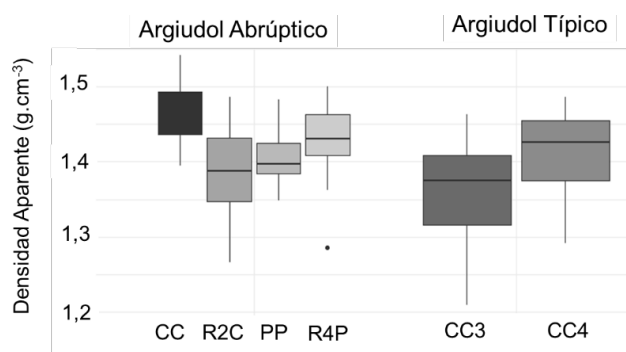


Figura 6. Densidad aparente (g.cm⁻³) según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2° año de cultivo, R4P: Rotación en 4° año de pastura, PP: Pastura mejorada permanente, CC3: Cultivo continuo de soja, CC4: Cultivo continuo de sorgo. La línea central en la caja representa la mediana, y la caja abarca el rango intercuartil (Q1-Q3). Test: LSD Fisher ($P < 0,05$).

Figure 6. Bulk density (g.cm⁻³) by soil type and treatment. CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation in the 2nd year of cropping, R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Permanent Improved Pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping. Each box spans the interquartile range (Q1-Q3) and the central line in each box represents the median. Fisher's LSD Test, ($P < 0.05$).

Componentes de la porosidad total

En la Figura 7 se muestran los dos componentes de la porosidad total, la porosidad textural y la porosidad estructural. En el suelo Argiudol abruptico la Ptot fue 44,7% en CC, 48% en R2C, 46,65% en PP y 46,15% en R4P. En el suelo Argiudol típico la Ptot fue 49% y 47% para CC3 y CC4, respectivamente.

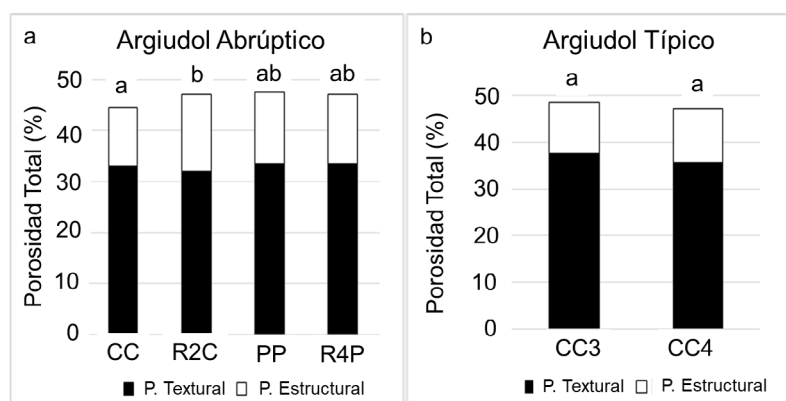


Figura 7. Porosidad total, estructural y textural según tratamiento. CC Cultivo Continuo, R2C Rotación en 2° año de cultivo. R4P Rotación en 4° año de pastura, PP Pastura mejorada Permanente, CC3 Cultivo continuo cultivo soja, CC4 Cultivo continuo sorgo. Letras diferentes significan diferencias significativas Test: LSD Fisher ($P < 0,05$).

Figure 7. Total, structural, and textural porosity by treatment. CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation in the 2nd year of cropping, R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Permanent Improved Pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping. Different letters indicate significant differences Fisher's LSD Test, ($P < 0.05$).

Al analizar la porosidad textural, se observó homogeneidad entre los tratamientos para un mismo tipo de suelo, lo cual es esperable dado que la textura del suelo influye en este aspecto. La porosidad estructural fue 11,51%, 15,66%, 13,96% y 13,34% para CC, R2C, PP y R4P respectivamente. En el Argiudol típico la Pest. fue 10,9% y 11,55% para CC3 y CC4 respectivamente. La porosidad textural en el Argiudol abrupto fue 33,19%, 32,34%, 32,69%, 32,81% para CC, R2C, PP y R4P respectivamente. Para el Argiudol típico la porosidad textural fue 38,1% y 35,45% para CC3 y CC4 respectivamente.

La Figura 8 muestra la relación entre la porosidad total y la porosidad estructural para ambos suelos.

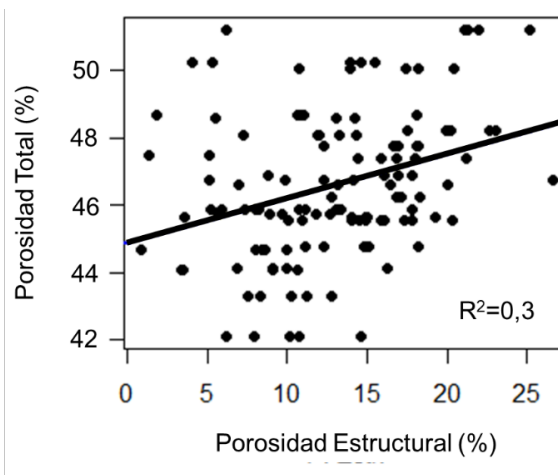


Figura 8. Regresión entre la Ptot y la Pest.

Figure 8. Regression between Ptot and Pest

Para el conjunto total de datos, el aumento de la porosidad estructural (P. Estr.) mostró una relación directa con el incremento en la porosidad total (Ptot), de acuerdo con la ecuación de regresión $P_{tot} = 44.89 + 0.13 * P. Estr.$ ($R^2=0.3$). Al mismo tiempo, la Ptext. permaneció constante, lo que es esperable dado que la composición mineralógica fue uniforme en los distintos tratamientos. La importancia en la determinación de la Pest. y la Ptext. es que las mismas permiten establecer qué proporción de la Ptot está asociada al manejo (Pest) y cuál es la proporción de la porosidad que está relacionada a la composición mineralógica y orgánica del suelo.

DISCUSIÓN

La distribución radicular en el perfil del suelo fue claramente influenciada por el manejo y el momento de la evaluación. En el Argiudol abrupto, los tratamientos con cultivos (CC y R2C) mostraron diferencias notables debido al momento en que se realizaron las evaluaciones: en CC, previo a la siembra de soja, el sistema radicular estuvo asociado a los restos de la cobertura de invierno (pastura anual invernal), mientras que en R2C se evaluó después de la cosecha de verano (*Glycine max*), resultando en un sistema radicular más escaso (Figura 1a). Esta variabilidad refleja la influencia del tipo de vegetación presente al momento de la evaluación, con CC mostrando una mayor cantidad de raíces en profundidad en comparación con R2C, y una disminución en la proporción de raíces a profundidades mayores de 0,2 m, posiblemente debido a la presencia de un horizonte argilúvico (Hamza y Anderson, 2005; Ball et al., 2008). En los tratamientos de pastura (PP y R4P), aunque ambos exhibieron un comportamiento similar, R4P mostró un sistema radicular más desarrollado, probablemente debido a la mejor calidad de la pastura en comparación con PP, que presentó mayor degradación debido al pastoreo (Figura 1a). En el Argiudol típico, la distribución radicular fue similar entre cultivos, aunque el tratamiento de soja (CC3) mostró un sistema radicular menos desarrollado (Figura 1b).

Este estudio evaluó el estado estructural del suelo en sistemas agrícola-pastoriles, observándose diferencias significativas entre los sistemas de cultivo continuo con aquellos que incluyen rotación con pasturas. Los sistemas con pasturas favorecieron la formación de macroporosidad generada principalmente por la

actividad biológica, como el crecimiento de raíces y la fauna del suelo, lo cual es crucial para mejorar la estructura del suelo, facilitando la infiltración de agua y el desarrollo radicular (Peigné et al., 2013; Place et al., 2008). Esto, en muchos casos se dio sobre estructuras de tipo compacto en las cuales se pudieron identificar poros a simple vista asociados a la actividad biológica (estructuras tipo C Δ b2) lo que indica que el sistema es capaz de reponer macroporos en periodos relativamente cortos de tiempo lo que le da mayor resiliencia a largo plazo a los sistemas de rotación cultivo pasturas. En contraste, los sistemas de cultivo continuo tendieron a desarrollar estructuras más compactas, con menor macroporosidad, lo que se asoció al tránsito de maquinaria y procesos físicos de expansión y contracción del suelo (estructuras tipo C Δ b1 y C Φ b1). Estos resultados coinciden con estudios previos que indican que la compactación derivada de sistemas agrícolas intensivos puede limitar la capacidad del suelo para sostener cultivos a largo plazo (Hamza y Anderson, 2005; Ball et al., 2008) y que la incorporación de pasturas intercaladas con cultivos generan mejor calidad del suelo en sus propiedades físico-químicas (Rovira et al. 2020, Pravia et al. 2019, Salvo et al. 2010, Salvo et al. 2014, Ernst y Siri-Prieto, 2009, Garcia et al. 2004, Terra y García Préchac 2001) a pesar de que exista una importante variabilidad espacial de las estructuras más cohesivas derivadas de los usos y manejos del suelo.

La incorporación de pasturas en las rotaciones no solo mejora el contenido de carbono orgánico en profundidad y la exploración radicular, sino que también contribuye a una mejor ciclicidad de nutrientes desde horizontes profundos y ejerce control sobre la erosión y la exportación de nutrientes (Rasouli et al., 2014). Este beneficio estructural es fundamental para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, ya que contrarresta algunos de los efectos negativos de los cultivos continuos en la estructura del suelo, especialmente la compactación y la erosión laminar. Por lo cual la metodología de perfil cultural adaptada por Boizard et al. (2017) permitió clasificar la actividad biológica en dos categorías (b1 y b2), facilitando la relación entre el origen de los macroporos y la actividad biológica. Esta clasificación fue especialmente útil en la subclasificación de las estructuras básicas (Γ , Δ , Φ), como lo describieron Gautronneau y Manichon (1987).

Además, los sistemas de cultivo continuo presentaron una mayor densidad aparente, lo que está en línea con estudios previos que reportan mayor compactación en suelos agrícolas en comparación con suelos con coberturas naturales (Rodríguez et al., 2020, 2021). Este incremento en la densidad se traduce en una reducción de la porosidad estructural, limitando la penetración radicular y el movimiento de agua en el perfil del suelo, factores esenciales para la productividad agrícola sostenible. La compactación superficial y subsuperficial en sistemas agrícolas intensivos puede afectar negativamente el crecimiento radicular y la capacidad de las plantas para acceder a nutrientes y agua en profundidad (Boizard et al., 2017), sin embargo, la Dap no fue un indicador lo suficientemente robusto para encontrar diferencias significativas entre las estructuras analizadas.

La resistencia al corte fue particularmente alta en las estructuras altamente cohesivas en los sistemas de cultivo continuo, indicando una mayor compactación del suelo. Este hallazgo es consistente con estudios anteriores que asocian mayores resistencias al corte con suelos más compactos en sistemas de manejo intensivo (Sasal, 2003). En contraste, los sistemas con rotación de pasturas, al fomentar una mayor actividad biológica, presentaron una estructura de suelo menos cohesiva, facilitando el desarrollo radicular y mejorando la capacidad del suelo para soportar el crecimiento de las plantas. La RC también estuvo influenciada por el contenido hídrico del suelo; en el tratamiento R2C, la RC fue baja, posiblemente debido a un menor contenido de agua al momento de la evaluación, lo que implicó el uso de una paleta diferente al resto de los tratamientos en el Pocket vane tester lo que pudo haber afectado la medición in-situ. Aunque la RC fue un indicador eficaz para detectar diferencias entre las estructuras, es importante considerar su dependencia del contenido de humedad del suelo. Para obtener comparaciones precisas entre suelos y tratamientos, es necesario realizar las mediciones bajo un rango de humedad uniforme. Dentro de cada tratamiento, las determinaciones de RC deben llevarse a cabo bajo condiciones de humedad constante para obtener comparaciones fiables.

Los resultados evidencian que la porosidad textural se mantuvo constante entre tratamientos, lo cual era esperado dada su dependencia de la textura y composición mineralógica del suelo. Esto refuerza la idea de que esta propiedad no es tan sensible al manejo, sino que está determinada intrínsecamente por la naturaleza del suelo (Sasal 2003). En contraste, las diferencias en porosidad estructural reflejan el impacto directo del manejo sobre la estructura del suelo, aunque su relación con la porosidad total ($R^2 = 0,3$) sugiere que otros factores también influyen como puede ser la actividad biológica y el contenido de materia orgánica. Este análisis destaca la importancia de distinguir entre porosidad textural y estructural para evaluar

cómo las prácticas de manejo afectan la funcionalidad del suelo para diseñar estrategias que favorezcan la estabilidad estructural y la productividad teniendo en cuenta que los manejos afectaran de mayor forma a una proporción menor de la porosidad total pero que está relacionada a diversas propiedades como ser la infiltración y retención de agua así como los intercambios de gases y la disponibilidad de hábitats para los organismos vivos.

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad del suelo mediante la metodología de Perfil Cultural demostró que los sistemas con pasturas presentan un estado estructural superior en comparación con los sistemas de cultivo continuo a pesar de que en los mismos se detectaron estructuras masivas, pero con mayor proporción de macroporos observados a simple vista. Las pasturas favorecieron la generación de macroporosidad, contribuyendo a modificar las estructuras compactas, especialmente la tipo Δ , lo cual mejora la capacidad del suelo para retener agua y permite un adecuado crecimiento radicular. En contraste, los sistemas de cultivo continuo mostraron una mayor compactación y una menor exploración radicular, factores que pueden comprometer la sostenibilidad del suelo a largo plazo. Este estudio subraya la importancia de incluir pasturas perennes en las rotaciones agrícolas, ya que contribuyen significativamente a mejorar la estructura del suelo, reducir la compactación y favorecer la sostenibilidad a largo plazo. Integrar pasturas en los sistemas de cultivo resulta clave para mantener un suelo saludable y productivo, promoviendo la sostenibilidad agrícola en el tiempo.

REFERENCIAS

- Albuquerque, J. A. y Gubiani, P. I. (eds.). (2023). *Física de solos*. Sociedad Brasileira de Ciencias do Solo (SBCS). Álvarez, C., Taboada, M., Perelman, S., y Morrás, H. (2014). Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Research*, 52(6), 533. <https://doi.org/10.1071/SR13281>
- Álvarez, C., Taboada, M., Perelman, S., y Morrás, H. (2014). Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Research*, 52(6), 533.
- Ball, B. C., Crichton, I., y Horgan, G. W. (2008). Dynamics of upward and downward N_2O and CO_2 fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence. *Soil and Tillage Research*, 101, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.012>
- Ball, B. C., y Munkholm, L. J. (Eds.). (2015). *Visual Soil Evaluation: Realizing Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact*. CABI.
- Bertol, I., Gomes, K., Nicoloso, R., Zago, L., y Maraschin, G. (1998). Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastura natural. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 33(5), 779–786.
- Böhm, W. (1976). In situ estimation of root length at natural soil profiles. *The Journal of Agricultural Science*, 87, 365–368. <https://doi.org/10.1017/S0021859600027660>
- Boizard, H., Peigné, J., Sasal, M. C., Guimaraes, M., Piron, D., Tomis, V., Vian, J. F., Cadoux, S., Ralisch, R., Tavares, J., Heddad, D., De Battista, J., Duparque, A., Franchini, J. C., y Roger-Estrade, J. (2017). Developments in the "profil cultural" method for an improved assessment of soil structure under no-till. *Soil and Tillage Research*, 173, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.007>
- Boizard, H., Yoon, S. W., Leonard, J., Lheureux, S., Cousin, I., Roger-Estrade, J., y Richard, G. (2013). Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. *Soil and Tillage Research*, 127, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.04.007>
- Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Dürr, C., y Boiffin, J. (2002). Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil and Tillage Research*, 64(1-2), 149–164. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00252-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00252-5)
- Boizard, H., Peigné, J., Capowiez, Y., y Roger-Estrade, J. (2012). Ability of the "Profile Cultural" method to assess the soil structure of untilled layers. *Agrociencia*, 16(3), 221–226. <https://doi.org/10.31285/AGRO.16.673>
- Brady N, Weill R. 2008. The Nature and properties of soil (14th ed.) Editorial Pearson.
- Burke, W., Gabriels, D., y Bouma, J. (1986). *Soil structure assessment*. CRC Press.
- Calvo, C., Rodríguez-Gallego, L., de León, G., Cabrera-Lamanna, L., Castagna, A., Costa, S., González, L., y Meerhoff, M. (2024). Potential of different buffer zones as nature-based solutions to mitigate agricultural runoff nutrients in the subtropics. *Ecological Engineering*, 207, 107354. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107354>
- Capowiez, Y., Cadoux, S., Bouchand, P., Roger-Estrade, J., Richard, G., y Boizard, H. (2009). Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(4), 711–717. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.006>
- Castaña, J., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., y Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009* (Serie técnica N° 193). INIA.

- Dirección de Estadísticas Agropecuarias (DIEA). (2021). *Anuario estadístico agropecuario* [En línea]. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Consultado en 2022. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2021/LIBRO%20ANUARIO%202021%20Web.pdf>
- Ernst, O., y Siri-Prieto, G. (2009). Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research*, 102, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.08.001>
- Ernst, O., y Siri-Prieto, G. (2013). Pérdida de calidad del suelo como factor limitante del rendimiento en el largo plazo. En E. Hoffman (ed.), *Actas III Simposio Nacional de Agricultura* (pp. 157-166). Facultad de Agronomía (UdelaR), EEMAC, INIA, IPNI Cono Sur.
- García, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G., y Terra, J. (2004). Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.002>
- Gautronneau, Y., y Manichon, H. (1987). *Guide méthodique du profil cultural*. CEREF/ISARA.
- Hamza, M. A., y Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Henin, S., Gras, R., y Monnier, G. (1972). *El perfil cultural: el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas*. Traducción de Carlos Roquero de Laburu. Madrid: Mundi-Prensa.
- MAP/DSF. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1000000*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.
- National Cooperative Soil Survey (NCSS), (2018). *National Cooperative Soil Survey Characterization Database*. <http://ncsslabdatamart.sc.egov.usda.gov/>.
- Peigné, J., Vian, J., Cannavacciuolo, M., Lefevre, V., Gautronneau, Y., y Boizard, H. (2013). Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profile cultural method. *Soil and Tillage Research*, 127, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.014>
- Place, G., Bowman, D., Burton, M., y Rufty, T. (2008). Root penetration through a high bulk density soil layer: Differential response of a crop and weed species. *Plant and Soil*, 307, 179–190. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9594-4>
- Pravia, M. V., Kemanian, A. R., Terra, J. A., Shi, Y., Macedo, I., y Goslee, S. (2019). Soil carbon saturation, productivity, and carbon and nitrogen cycling in crop-pasture rotations. *Agricultural Systems*, 171, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.001>
- Rasouli, S., Whalen, J. K., y Madramootoo, C. A. (2014). Review: Reducing residual soil nitrogen losses from agroecosystems for surface water protection in Quebec and Ontario, Canada: Best management practices, policies and perspectives. *Canadian Journal of Soil Science*, 94, 109–127. <https://doi.org/10.4141/cjss2013-015>
- Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J., y Guérif, J. (1999). Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil and Tillage Research*, 51(1–2), 151-160. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00058-6).
- Rodríguez-Gallego L., Calvo C., G. de León, A. Castagna, L. Cabrera-Lamanna, S. Costa, L. González, y M. Meerhoff. 2020. *Evaluación de la dinámica del fósforo en zonas buffer en el Embalse de Paso Severino y propuestas de alternativas de manejo para la reducción de los aportes difusos de este nutriente*. Convenio MVOTMA/DINAMA-UDELAR. CURE, UDELAR. 66 pp.
- Rodríguez-Gallego, L., De León, G., Cardoso, A., Pérez, W., Castagna, A., Guillén, J., Lescano, C., Costa, S., Pasquariello, S., Rodríguez, C., Goyenola, G., Meerhoff, M., Chalar, G., Arocena, R., Teixeira de Mello, F., y Tesitore, G. (2021). *Reporte con descripción del rol del bosque nativo y sus características en relación a su capacidad de amortiguamiento de los nutrientes y agroquímicos en diferentes contextos productivos*.
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard, H., Coquet, Y., Défossez, P., y Manichon, H. (2004). Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: From a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil and Tillage Research*, 79, 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.009>
- Rovira, P.; Ayala, W.; Terra, J.; García-Préchac, F.; Harris, P.; Lee, M.R.F.; Rivero, M.J. (2020). The ‘Palo a Pique’ Long-Term Research Platform: First 25 Years of a Crop–Livestock Experiment in Uruguay. *Agronomy*, 10, 441. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030441>
- Salvo, L., Hernández, J., y Ernst, O. (2010). Distribution of soil organic carbon in different size fractions under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.008>
- Salvo, L., Hernández, J., y Ernst, O. (2014). Soil organic carbon dynamics under different tillage systems in rotations with perennial pastures. *Soil and Tillage Research*, 135, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.08.014>
- Sasal, M. C. (2003). *Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa: Efecto sobre el balance de agua* [Tesis Doctoral]. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Sasal, M. C., Andriulo, A. E., y Taboada, M. A. (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.025>
- Sasal, M. C., Castiglioni, M. G., y Wilson, M. G. (2010). Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil and Tillage Research*, 108(1-2), 24–29. <https://doi.org/10.1111/sum.12606>
- Sasal, M. C., Boizard, H., Andriulo, A., Wilson, M., y Léonard, J. (2016a). Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*, 173, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.014>

Sasal, M. C., Léonard, J., Andriulo, A., y Boizard, H. (2016b). A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. *Soil and Tillage Research*, 173, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.017>

Soil Science Society of America (SSSAJ). (1996). *Glossary of soil science terms*. SSSAJ.

Soil Survey Staff (2014) (SSS) *Keys to Soil Taxonomy* [12th edition]. USDA-Natural Resources Conservation Service.

Stengel, P. (1979). Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Annales de l'Agronomie*, 30, 27–51.

Taboada, M., Micucci, F., Cosentino, D., y Lavado, R. (1998). Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 49, 57–63. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00132-9)

Terra, J. A., y García Préchac, F. (2001). Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del este: Síntesis 1995–2000 (Serie Técnica N° 125). Montevideo: INIA..

Unger, P., y Kaspar, T. (1994). Soil compaction and root growth: A review. *Agronomy Journal*, 86, 759–766. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050004x>

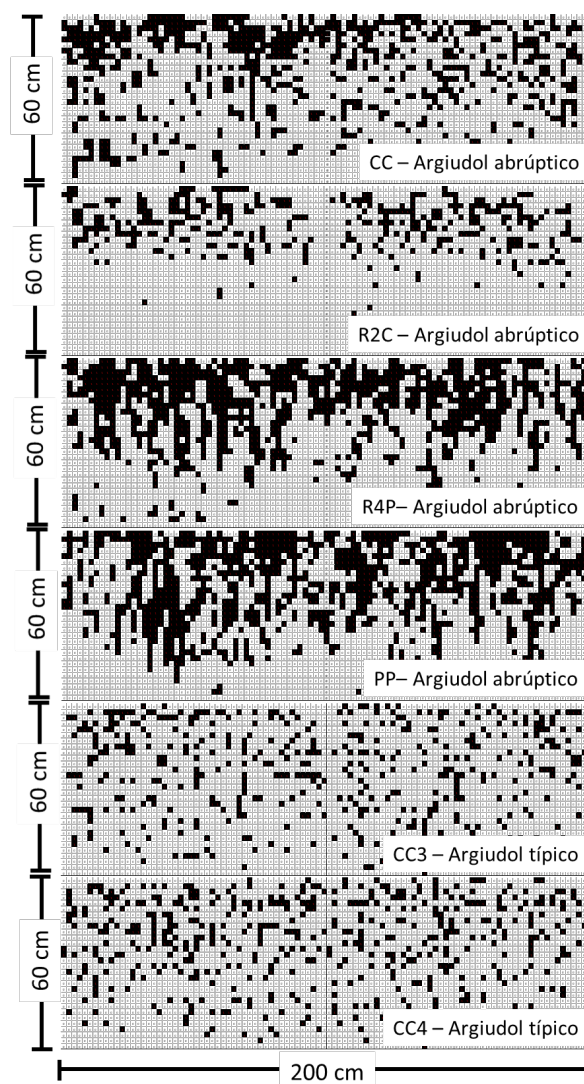
Vocanson, A., Roger-Estrade, J., Boizard, H., y Jeuffroy, M. (2006). Effects of soil structure on pea (*Pisum sativum* L.) root development according to sowing date and cultivar. *Plant and Soil*, 281, 121. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3938-0>

APÉNDICE



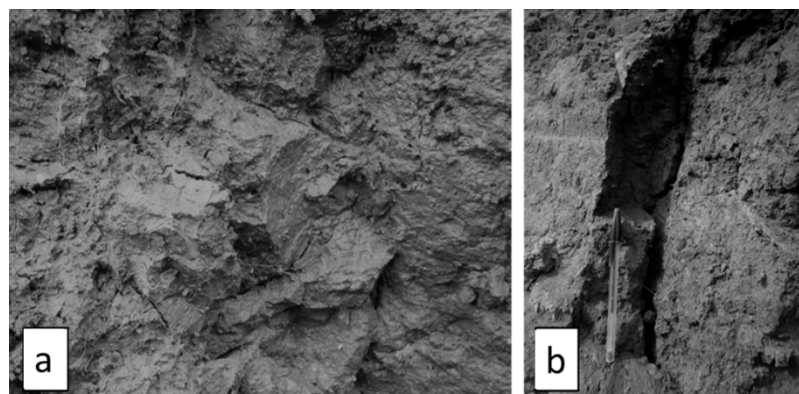
Apéndice 1. Ubicación de los sitios experimentales para los dos suelos (Argiudol típico y Argiudol abruptico) y sus tratamientos CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación luego de 2 años de cultivo. R4P: Rotación en 4° año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo.

Appendix 1. Location of the experimental sites for the two soils (Typic argiudoll and Abruptic argiudoll) and their treatments: CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation after 2 years of cropping, R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Improved Permanent Pasture, CC3: Continuous Cropping of Soybean, CC4: Continuous Cropping of Sorghum.



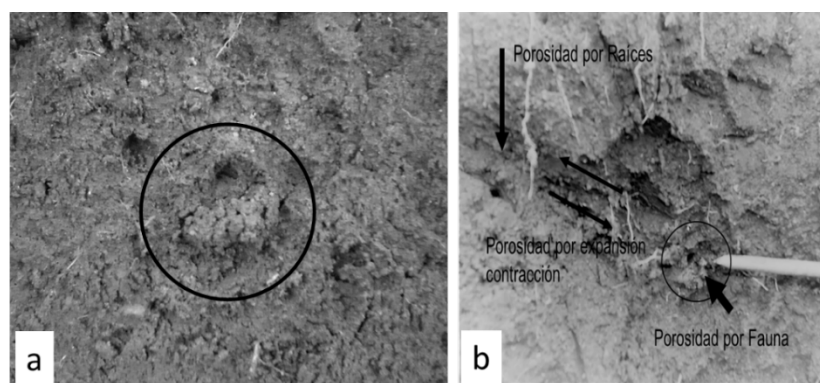
Apéndice 2. Distribución espacial de las raíces según tipo de suelo y tratamiento en el largo total de la calicata (200cm). CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación luego de 2 años de cultivo. R4P: Rotación en 4° año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo.

Appendix 2. Spatial distribution of roots by soil type and treatment across the entire pit length (200 cm). CC: Continuous Cropping, R2C: Rotation after 2 years of cropping. R4P: Rotation in the 4th year of pasture, PP: Permanent Pasture, CC3: Continuous soybean cropping, CC4: Continuous sorghum cropping.



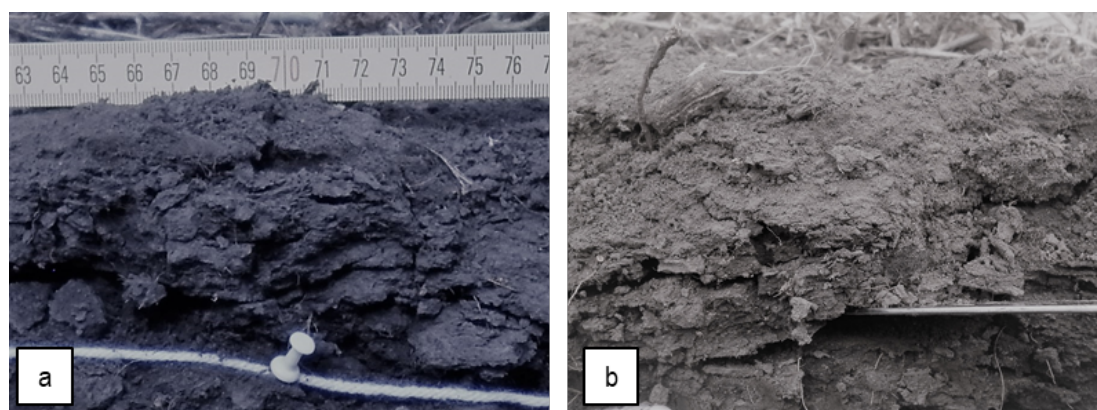
Apéndice 3. Generación de porosidad en Cultivo continuo (a) y rotación en 2° año de cultivo (b) asociado a la expansión-contracción de minerales arcillosos y en menor medida por la actividad biológica de las raíces (b1).

Appendix 3. Porosity generation in Continuous Cropping (a) and Rotation in the 2nd year of cropping (b) associated with the expansion-contraction of clay minerals and, to a lesser extent, by the biological activity of roots (b1).



Apéndice 4. a) Desechos de lombrices y macroporosidad asociada a la misma. b) Distintos orígenes de porosidad ejemplificados en raíces (tipo b1), fauna (tipo b2) y el factor expansión-contracción.

Appendix 4. a) Earthworm casts and associated macroporosity. b) Different origins of porosity exemplified by roots (type b1), fauna (type b2), and the expansion-contraction factor.



Apéndice 5. Estructura laminar incipiente en cultivo continuo CC3 (a) y CC4 (b).

Appendix 5. Incipient Platy structure in continuous cropping CC3 (a) and CC4 (b).