

EFECTO DE LAS PASTURAS PERENNES EN LA FERTILIDAD FISICA Y BIOLÓGICA EN MOLISOLES DE LA REGION SEMIARIDA PAMPEANA

ROMINA FERNÁNDEZ¹; NATANAEL EZEQUIEL FURCH²; MATEO BISSOLINO², ILEANA FRASIER¹; ERIC DANIEL SCHERGER¹; ALBERTO RAUL QUIROGA¹⁻²

Recibido: 20/03/2019

Recibido con revisiones: 07/01/2020

Aceptado: 07/01/2020

RESUMEN

El estudio tuvo como finalidad caracterizar el sistema poroso en diferentes usos del suelo y determinar si los indicadores físico-hídricos bajo el planteo mixto de rotación (cultivos anuales-pasturas), se aproximan a los niveles de los indicadores bajo el uso con pastura permanente de gramínea (línea de base) para suelos francos de la Región Semiárida Pampeana. Sobre Paleustoles petrocálcicos, se seleccionaron 3 usos diferentes, correspondientes a ensayos de larga duración: pastura permanente de Pasto Llorón (LL) considerado como suelo línea de base, pasturas perennes de Festuca+Agropiro (F+A) y Alfalfa+Agropiro (A+A) y uso agrícola (Ag). Sobre estos usos se determinó materia orgánica, densidad aparente, densidad aparente máxima, compactación relativa, humedad crítica, porosidad total, macroporosidad, resistencia a la penetración, infiltración y cantidad de raíces. Los valores de los indicadores evaluados en las dos pasturas perennes (F+A y A+A), se encontraron más próximos a los valores de LL que al uso Ag, aunque particularmente la pastura A+A fue la que más se aproximó a la situación de referencia. El uso del suelo tuvo mayor incidencia en los primeros 6 cm de profundidad en la mayoría de los indicadores, aunque los resultados demuestran la importante contribución bajo el uso A+A en la porosidad total, macroporos, densidad aparente y raíces a mayor profundidad (6-12, 12-18 cm). Estos resultados demuestran el potencial de las pasturas perennes, y más aún si incluyen especies leguminosas, en la recuperación de la fertilidad física y biológica en suelos que se encuentran en proceso de degradación.

Palabras clave: ensayo de larga duración, suelo línea de base, indicadores físico-hídricos

EFFECT OF PERENNIAL PASTURES IN PHYSICAL AND BIOLOGICAL FERTILITY IN MOLLISOLS OF THE SEMIARID PAMPAS REGION

ABSTRACT

The objective of the study was to characterize soil porosity in different land uses and to determine if physical-hydric indicators under mixed rotation (annual crops-pastures) will approach to the levels of land use with permanent grassland (baseline) in loam soils of Semiarid Pampas Region. Three different land uses were selected on petrocalcic Paleustolls, corresponding to long-term trials: permanent grassland of weeping grass considered as baseline soil (LL), perennial pastures of fescue + wheatgrass (F+A) and Lucerne + wheatgrass (A+A) and an agricultural use (Ag). On each soil use, indicators such as organic matter, bulk density, maximum bulk density, relative compaction, critical moisture content, total porosity, macroporosity, penetration resistance, infiltration and quantity of roots were determined. The values of the indicators evaluated in the two perennial pastures (F+A and A+A), were closer to the values of LL than to the Ag use, and particularly the A+A pasture was the closest to the reference situation. Land use had a greater incidence in the 0-6 cm depth in most of the indicators, although the results show the important contribution under the A+A use in total porosity, macropores, bulk density and roots at greater depth (6-12, 12-18 cm). These results demonstrate the potential of perennial pastures, especially if they include leguminous species, in the recovery of physical and biological fertility in soils that are in degradation process.

Key words: long-term trials, baseline values soils, physical-hydric indicators.

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA Anguil. Argentina

2 Facultad de Agronomía, UNLPam. Argentina

Autor de contacto: fernandez.romina@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Históricamente la pérdida de carbono orgánico del suelo (COS) se ha asociado al uso de sistemas de labranzas y monocultivos con largos periodos de barbecho (Franzluebbers *et al.*, 1994), lo que ha provocado el deterioro de la condición física de los suelos y el incremento de la superficie afectada por procesos erosivos (Quiroga & Studdert, 2014). La bibliografía plantea que estas pérdidas de carbono serían del orden del 35 al 56 % en regiones semiáridas (Zach *et al.*, 2006; Quiroga *et al.*, 2009) mientras que en regiones más húmedas se encontrarían entre el 10 al 55 % (Burke *et al.*, 1989).

La adopción de la siembra directa (SD), como práctica de manejo conservacionista, respecto a la siembra convencional permitió atenuar estas pérdidas y en algunos casos mantener los contenidos de COS incidiendo positivamente sobre el rendimiento de los cultivos (Hollinger *et al.*, 2005). Noellemeyer *et al.* (2013) concluyeron que la SD contribuyó a mejorar la captación, almacenaje y eficiencia en el uso del agua, y el ciclado de nutrientes a través de una mayor actividad biológica (Frasier *et al.*, 2016b). Brasil, Argentina y Paraguay tienen más del 70 % de las tierras de cultivo bajo manejo en SD. No obstante, solamente el 9 % de las tierras cultivadas mundialmente se encuentran bajo SD (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). En algunos casos y condicionado por la inclusión de gramíneas en la rotación de cultivos, los planteos en SD han logrado mantener los niveles de COS con respecto al contenido inicial (Fernández *et al.*, 2017), mientras que asociado a monocultivos con bajo aporte de residuos se comprobaron pérdidas de materia orgánica y degradación física de los suelos (Quiroga *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2016).

Una alternativa para reestablecer parte de la calidad del suelo es incrementar los aportes de materia orgánica, a partir de la inclusión de pasturas perennes y/o cultivos de cobertura (Franzluebbers *et al.*, 2014). Suelos bajo prácticas de uso conservacionistas, generalmente poseen mayor volumen de macroporos (McGarry *et al.*, 2000; López *et al.*, 2016) debido a la mayor actividad de la fauna edáfica (Logsdon & Kaspar, 1995) y a mayores contenidos de COS (Du-

val *et al.*, 2016). El efecto de la materia orgánica se puede constatar a través de la reducción en la densidad aparente y en la resistencia a la penetración, y de incrementos en la infiltración (Quiroga *et al.*, 1999; Franzluebbers, 2002). En relación a estas variables existe abundante información en la bibliografía, pero son escasos los estudios que abordan la caracterización del sistema poroso y su relación con propiedades físico-hídricas. En regiones semiáridas estas son las principales condicionantes para la productividad agropecuaria, ya que determinan la eficiencia de captación, almacenaje y uso de las precipitaciones, determinantes de la disponibilidad del agua y la producción de los cultivos (Glab *et al.*, 2014).

Se plantearon como objetivos:

- Caracterizar el sistema poroso y establecer relaciones con indicadores físico-hídricos en Paleustoles petrocálcicos influenciados por distintos usos del suelo: uso ganadero bajo pasturas permanentes, uso mixto agrícola-ganadero y uso agrícola.
- Determinar si los indicadores físico-hídricos bajo el planteo mixto de rotación (cultivos anuales-pasturas), se aproximan a los niveles de los indicadores bajo el uso con pastura permanente de gramínea, considerado como línea de base para suelos francos de la Región Semiárida Pampeana.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló sobre Paleustoles petrocálcicos, ubicados en el sur de la planicie con tosca de la Región Semiárida Pampeana. Se seleccionaron suelos de textura franca, con similar contenido de arcilla, limo y arena (**Tabla 1**), bajo 3 usos diferentes que corresponden a ensayos de larga duración que se encuentran dentro del campo de la EEA Anguil.

- 1) Uso ganadero de pastura permanente de pasto llorón (*Eragrostis curvula*) con 60 años de efecto acumulado (LL). Este suelo es considerado "línea de base" para los indicadores que se relacionan con la calidad físico-hídrica y biológica (Fernández *et al.*, 2018). Los valores "línea de base" expresan un valor de referencia de un determinado indicador (Micó

Tabla 1. Contenido de arena, limo y arcilla en los diferentes usos de suelo. Pasto llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), agropiro+alfalfa (A+A) y agrícola (Ag).

Table 1. Sand, silt and clay content in different soil use. Pasto llorón (LL), fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag)

| Uso suelo | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Clase textural |
|-----------|-----------|----------|-------------|----------------|
| LL | 45,9 | 36,9 | 17,2 | Franco |
| F+A y A+A | 45,7 | 35,9 | 18,4 | Franco |
| Ag | 44,6 | 36,5 | 18,9 | Franco |

et al., 2007). Estos valores se obtienen, generalmente, en suelos que corresponden a un estado deseable de salud o de calidad. En muchos casos, estos serían suelos bajo vegetación prístina, pero también se están utilizando aquéllos que se encuentren lo menos disturbados posible cuando no existen situaciones de vegetación nativa y/o prístina (Thackway & Specht, 2015). En este contexto, los valores de línea de base resultarían útiles para interpretar los niveles actuales de las variables indicadoras y evaluar el efecto de las prácticas de uso de los suelos.

- 2) Uso mixto agrícola-ganadero, con rotación de cultivos anuales y pastura perenne establecidos en siembra directa. Los muestreos fueron efectuados al quinto año de la fase de pasturas perennes. Esta secuencia comenzó en el año 2006, sobre pastura permanente de pasto llorón y los cultivos fueron: cultivo de cobertura de centeno (*Secale cereale*) + vicia (*Vicia villosa ssp. dasycarpa*), sorgo (*Sorghum bicolor*), maíz (*Zea mays*), girasol (*Helianthus annuus*), cultivo de cobertura centeno, sorgo, girasol, y centeno como cultivo de cobertura. El 2/5/2012 se implantaron dos pasturas bifíticas las cuales fueron utilizadas para corte mecánico: una de ellas a base de festuca (*Festuca arundinacea* var. Flecha) con Agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum* var. Hulk) (F+A), y la otra de alfalfa (*Medicago sativa*) con Agropiro alargado (A+A).
- 3) Uso agrícola (Ag), desde el año 2006 sobre pastura permanente de pasto llorón, se establecieron cultivos en siembra directa que alternaron con laboreo del suelo empleando rastra de discos dobles. El muestreo se realizó luego de 4 años de haber labrado el suelo. En la secuencia de cultivos anuales participaron culti-

vos de verano como girasol, soja (*Glicine max*) y cereales de invierno para cosecha como centeno y triticale (*x Triticosecale* Wittmack).

Ambas pasturas perennes (F+A y A+A) y el suelo bajo uso agrícola se encontraban en fajas apareadas con 3 repeticiones y el tamaño de cada faja corresponde a 100 m x 10 m. El suelo bajo uso en pastura permanente (LL) limita con A+A, F+A y Ag.

De cada uso del suelo durante el otoño (2018), se tomaron 4 muestras compuestas de suelo de 0-6, 6-12 y 12-18 cm de profundidad, las cuales se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron por 2 mm a fin de determinar:

- Contenido de arcilla, limo y arena, mediante el método de la Pipeta de Robinson.
- Fraccionamiento físico de suelo de acuerdo a la técnica descrita por Cambardella & Elliott (1993) modificada por Noellemeyer et al. (2006), para obtener las fracciones <50 μm y 50-2000 μm , a las cuales posteriormente se les determinó contenido de carbono y nitrógeno total por el método de combustión en seco (LECO Truspec™). El valor obtenido de carbono total fue considerado como carbono orgánico ya que los suelos no presentaron carbonato de calcio libre. El carbono se convirtió a materia orgánica (MO) utilizando el factor de conversión de 1,724 (Nelson & Sommers et al., 1996) y los resultados se expresaron como MO joven (agregados 50-2000 μm , MOJ) y MO vieja (agregados < 50 μm , MOV). La suma de estas dos fracciones se consideró MO total.

Esta determinación (MO y MOJ) también fue realizada en los cuatro usos de suelo a los 0-10 y 10-20 cm de profundidad en el año 2012 (momento de la siembra de las pasturas F+A y A+A)

y al finalizar el ciclo de las mismas que correspondió al año 2018.

Las determinaciones de propiedades relacionadas al sistema poroso fueron las siguientes:

- Densidad aparente (DA): se determinó mediante el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986).
- Distribución del tamaño de poros y curva de retención hídrica: se determinaron en muestras disturbadas mediante mesa de tensión y el equipo de tensión de Richard (Klute & Klute, 1986). Se estableció como capacidad de campo (CC) el contenido de agua a 33 kPa y como punto de marchitez permanente (PMP) la cantidad de agua retenida a 1500 kPa.
- A partir de muestras sin disturbar (cilindros) se calculó la humedad gravimétrica al estado de saturación, donde la totalidad de los poros se encuentran ocupados por agua (PT).

$$PT = ((Phs-Ps)/Ps) * 100.$$

Contenido de agua de la muestra de suelo saturada (Phs) y la muestra de suelo seco a estufa (Ps)

- Resistencia a la penetración (RP), mediante un penetrómetro de golpe (O' Sullivan *et al.*, 1987) a intervalos de 5 cm hasta los 40 cm de profundidad. Considerando que la RP varía en función del contenido de agua del suelo (Krüger *et al.*, 2008) se efectuaron determinaciones periódicas a fin de obtener los valores de RP con diferentes contenidos de agua del suelo. A partir de las curvas que relacionan ambos parámetros se obtuvieron los valores de RP a diferentes contenidos de agua gravimétrica (cerca de PMP y CC).
- Para conocer la infiltración de agua en el suelo se realizaron ensayos a campo con infiltrómetro de doble anillo (Método de Kostiaikov descrito por Fernández *et al.*, 1971).
- Se determinó la densidad aparente máxima (DAM), humedad crítica (HC) y susceptibilidad a la compactación (SC) a partir del test Proctor de Compactación (Stengel *et al.*, 1984). Se calculó la compactación relativa (CR) a partir de la DA y DAM (Lipiec & Hatano, 2003).

- Para evaluar la biomasa de raíces cada 20 cm hasta los 100 cm de profundidad se siguió el método propuesto por Frasier *et al.* (2016a).

Los resultados se analizaron estadísticamente mediante ANOVA, análisis de regresión y para detectar las diferencias entre medias se utilizó el test de Tukey ($p < 0,10$). Además, se usó análisis multivariado de componentes principales. Para evaluar el efecto del uso del suelo en los contenidos de MO entre el año 2012 y el 2018 se realizó prueba T para muestras apareadas. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los contenidos de MO (0 a 6 cm) y especialmente las fracciones lábiles fueron influenciados significativamente por el uso del suelo (**Tabla 2**). Distintos autores (Duval *et al.*, 2013; Fernández *et al.*, 2016) señalaron que el contenido de MO resulta relevante al momento de evaluar la influencia del uso del suelo sobre la sustentabilidad de los sistemas de producción. Los resultados del presente estudio mostraron para los primeros 0-6 cm de profundidad, que el suelo Ag tuvo 30 % menos de MO con respecto al uso en LL, mientras que en el suelo con pasturas la diferencia fue menor (12 y 6% para F+A y A+A, respectivamente). En cambio, para 6-12 y 12-18 cm de profundidad, no se encontraron diferencias significativas entre diferentes usos, aunque sí se observaron mayores contenidos en 6-12 cm, con respecto a 12-18 cm.

En relación a la MOJ, los usos LL, A+A y F+A tuvieron similar contenido diferenciándose solo los dos primeros de Ag en el estrato 0-6 cm. En 6-12 y 12-18 cm no se encontraron diferencias significativas. Con respecto a la MOV, no se hallaron diferencias significativas entre los distintos usos en los tres estratos de suelo evaluados.

Los contenidos de MOJ representaron un 45, 49, 49 y 36% de la MO, para LL, F+A, A+A y Ag, respectivamente. Esta menor proporción de MOJ en Ag podría estar relacionada a procesos de degradación. Ha sido ampliamente demostrado que la degradación asociada al uso agrícola reduce la fracción lábil/joven de la MO en primera

Tabla 2. Contenido de Materia Orgánica Total (MO), Materia Orgánica Joven (MOJ), Materia Orgánica Vieja (MOV), para los distintos usos de suelo Llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), alfalfa+agropiro (A+A) y agrícola (Ag)

Table 2. Total organic matter, particulate organic matter, mineral organic matter in different soil use pasto llorón (LL), fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag).

| Manejo | MO (%) | | | | | |
|--------|---------|----|---------|---|----------|---|
| | 0-6 cm | | 6-12 cm | | 12-18 cm | |
| LL | 4,10 | C | 2,14 | A | 1,67 | A |
| F+A | 3,49 | B | 2,35 | A | 1,50 | A |
| A+A | 3,76 | B | 2,34 | A | 1,89 | A |
| Ag | 2,81 | A | 2,27 | A | 1,77 | A |
| Manejo | MOJ (%) | | | | | |
| | 0-6 cm | | 6-12 cm | | 12-18 cm | |
| LL | 1,83 | B | 0,86 | A | 0,53 | A |
| F+A | 1,79 | AB | 0,77 | A | 0,97 | A |
| A+A | 1,83 | B | 0,87 | A | 0,58 | A |
| Ag | 1,01 | A | 0,64 | A | 0,49 | A |
| Manejo | MOV (%) | | | | | |
| | 0-6 cm | | 6-12 cm | | 12-18 cm | |
| LL | 2,27 | A | 1,27 | A | 1,14 | A |
| F+A | 1,70 | A | 1,59 | A | 1,53 | A |
| A+A | 1,92 | A | 1,47 | A | 1,32 | A |
| Ag | 1,80 | A | 1,63 | A | 1,28 | A |

Letras distintas en la misma profundidad indican diferencias significativas entre usos.

instancia (Bono *et al.*, 2008; Eaton & Lawrence, 2009), ya que es más sensible a los cambios en el uso y afecta en mayor medida la condición física del suelo (Cambardella & Elliott, 1993; Zach *et al.*, 2006). Por lo tanto, cuando un suelo pierde calidad se observa un predominio de las fracciones más estables asociadas a la fracción mineral (Casanovas *et al.*, 1995; Riestra *et al.*, 2012). Es por ello que la fracción joven resulta clave para interpretar cambios en la fertilidad del suelo y potencialmente puede ser utilizada como un indicador de calidad de los mismos (Veum *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014).

La PT varió entre los suelos bajo distintos usos tal como se muestra en la **Figura 1**. La PT en los primeros 0-6 cm de profundidad varió entre 42,4 y 54,7 % con diferencias significativas entre LL y los restantes usos. El mayor valor correspondió a LL (54,7 %), F+A y A+A presentaron valores intermedios (47,2; 48,4%, respectivamente) y el uso Ag el menor valor (42,4 %) (**Figura 1A**). Para la profundidad 6-12 cm y 12-18 cm, los mayores valores de PT se registraron en A+A diferencián-

dose significativamente de Ag en el estrato de 6 a 12 cm y de Ag y LL en el más profundo (**Figura 1B y C**).

Con respecto a la macroporosidad, para los primeros 6 cm de profundidad el patrón fue similar a lo obtenido con la PT. Las diferencias entre LL y A+A no fueron significativas, lo mismo entre F+A y A+A, y entre F+A y Ag. Para las profundidades comprendidas entre 6-12 y 12-18 cm, A+A fue el uso que tuvo la mayor macroporosidad, coincidiendo con lo registrado en PT.

La compactación altera la PT del suelo y la distribución del tamaño de los poros, de tal manera que se produce una disminución en la relación macroporos/microporos, lo cual se traduce en aumentos de DA (Andriulo & Rosell, 1988). La disminución en la porosidad total de los suelos bajo uso Ag, tendría lugar a expensas de pérdidas de macroporosidad. Si bien los macroporos resultan esenciales para el crecimiento de la raíz, el transporte del agua y el intercambio de gases (Moret & Arrué, 2007), son escasos los estudios que brinden mayor detalle en cuanto a la carac-

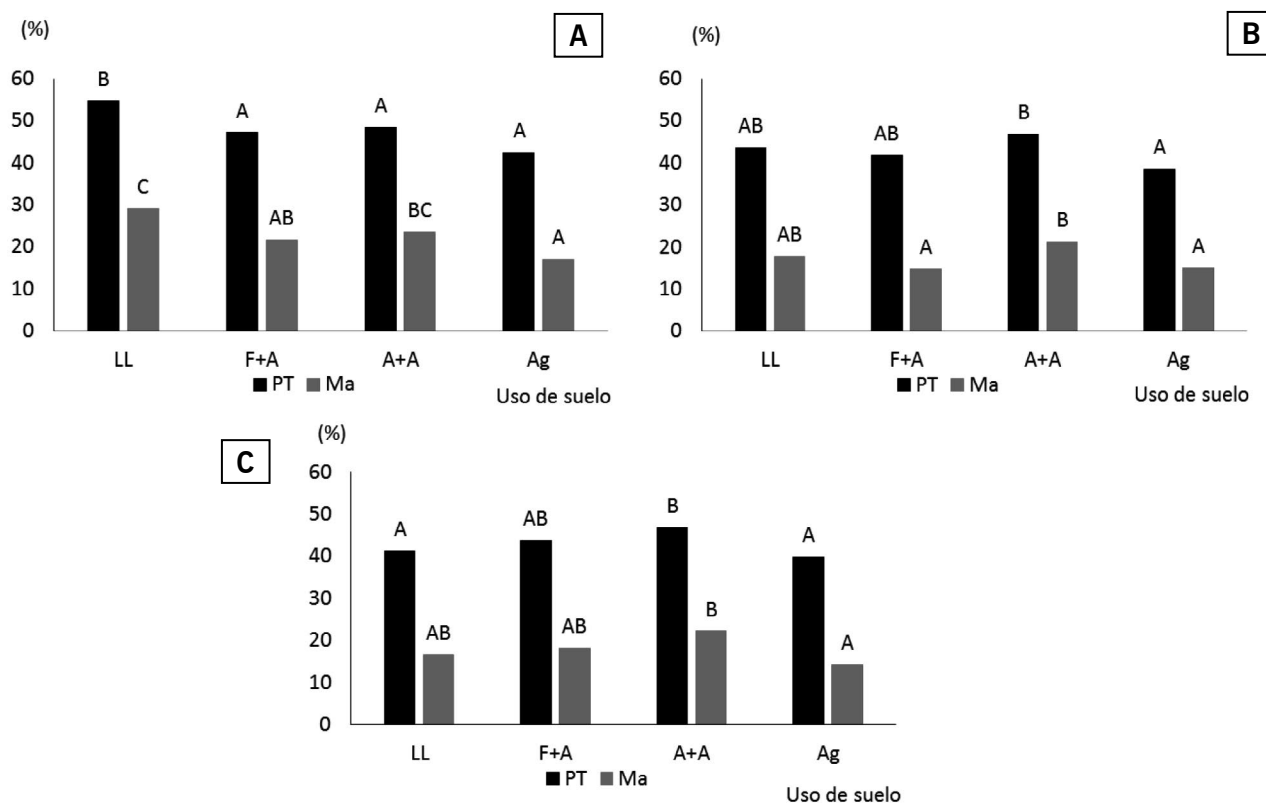


Figura 1. Porosidad total (PT) y Macroporosidad (Ma) en llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), alfalfa+agropiro (A+A) y uso agrícola (Ag) para cada profundidad: a. 0-6 cm, b. 6-12 cm y c. 12-18 cm. Letras distintas para cada profundidad indican diferencias significativas entre uso de suelo.

Figure 1. Total porosity (PT) and Macroporosity (Ma) in pasto llorón, fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag) for a. 0-6 cm, b. 6-12 cm y c. 12-18 cm. Different letters for each depth indicate significant differences between soil use

terización de los poros mayores de $10 \mu\text{m}$ de diámetro (Rasa *et al.*, 2012). La bibliografía plantea como valores umbral de macroporosidad el 10% (Greenland *et al.*, 1981) y el 15 % (Pilatti *et al.*, 2012), a partir de los cuales no existirían limitantes para el funcionamiento físico-hídrico de los suelos. Sin embargo, los resultados del presente trabajo demuestran que si bien la macroporosidad en Ag fue mayor al valor umbral, esta disminuyó significativamente en superficie con respecto a LL, después de 13 años bajo agricultura.

Los resultados obtenidos en las propiedades que reflejan la compactación del suelo se muestran en la **Tabla 3**. Con respecto a la densidad aparente, en 0-6 cm de profundidad se hallaron diferencias significativas entre Ag que presentó el mayor valor ($1,27 \text{ Mg m}^{-3}$), respecto a A+A y LL. Los resultados para F+A, A+A y LL fueron un 12, 14 y 22 % menor, respectivamente, res-

pecto a Ag. Similar tendencia se observó en el estrato 6-12 cm, mientras que no se detectaron diferencias significativas en 12-18 cm. La bibliografía plantea que el uso agrícola del suelo aumenta la DA, principalmente cuando se registra pérdida de MO (Quiroga *et al.*, 2016). En el presente estudio, el valor de DA bajo el uso Ag no superó $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ y por ende, en suelos de textura franca no reflejaría limitaciones en el sistema poroso (USDA NRCS *et al.*, 2014). No obstante, Fernández *et al.* (2016) encontraron que a un valor de DA considerado bajo ($1,17 \text{ Mg m}^{-3}$) para suelos agrícolas de textura franca, existirían limitantes en el aprovechamiento de agua por las raíces, las que no podrían aprovechar el agua físicamente disponible comprendida entre CC y PMP. En este sentido, la bibliografía plantea que la DA no sería un indicador que refleje la calidad del suelo (Dexter *et al.*, 2007), ya que por si sola no logra explicar cambios en las propiedades

Tabla 3. Densidad aparente (DA), Compactación Relativa (CR), Densidad Aparente Máxima (DAM), para los distintos usos de suelo y las profundidades estudiadas, en llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), alfalfa+agropiro (A+A) y agrícola (Ag).

Table 3. Bulk density (DA), relative compaction (CR), maximum bulk density (DAM) for different soil use and depth, in pasto llorón (LL), fescue + wheatgrass (F+A), lucerne + wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag).

| Manejo | DA (Mg m ⁻³) | | | | | |
|--------|---------------------------|----|---------|----|----------|---|
| | 0-6 cm | | 6-12 cm | | 12-18 cm | |
| LL | 0,99 | A | 1,16 | A | 1,13 | A |
| F+A | 1,11 | AB | 1,17 | AB | 1,16 | A |
| A+A | 1,09 | A | 1,11 | A | 1,13 | A |
| Ag | 1,27 | B | 1,25 | B | 1,21 | A |
| Manejo | CR (%) | | | | | |
| | 0-6 cm | | 6-12 cm | | 12-18 cm | |
| LL | 76,7 | A | 83,4 | A | 82,4 | A |
| F+A | 82,8 | A | 84,1 | A | 84,6 | A |
| A+A | 84,4 | A | 82,8 | A | 80,7 | A |
| Ag | 92,7 | B | 88,0 | A | 85,8 | A |
| Manejo | DAM (g cm ⁻³) | | | | | |
| | 0-6 cm | | 6-12 cm | | 12-18 cm | |
| LL | 1,29 | A | 1,39 | A | 1,37 | A |
| F+A | 1,34 | A | 1,39 | A | 1,37 | A |
| A+A | 1,29 | A | 1,34 | A | 1,40 | A |
| Ag | 1,37 | A | 1,42 | A | 1,41 | A |

Letras distintas para cada profundidad indican diferencias significativas entre usos de suelo.

hidráulicas del suelo como consecuencia de los diferentes manejos. Debido a ello, resulta necesario complementar los valores de DA con otros indicadores tales como la distribución del tamaño de poros, su estabilidad y fundamentalmente la continuidad del sistema poroso (Soracco *et al.*, 2003).

Para las condiciones bajo estudio, en las tres profundidades se encontró que si bien los valores de DAM fueron mayores bajo el uso Ag, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre ellos. La bibliografía sugiere que al comparar situaciones que presentan distinta compactación inicial, resulta necesario utilizar el indicador compactación relativa (CR), el que relaciona la densidad aparente actual respecto a la DAM (Lipiec & Hatano, 2003). En los primeros 0-6 cm de profundidad, la CR fue mayor bajo el uso Ag con respecto a los demás usos. En este sentido se encontraron valores de 13, 14 y 20 % menores para los usos A+A, F+A y LL, respectivamente. En cambio, en las profundidades 6-12 y 12-18 cm no se hallaron diferencias significativas en la CR entre los distintos usos del suelo. Los valores de CR entre 75-87% se corresponden

con condiciones físicas del suelo que no presentan dificultades para el desarrollo de los cultivos, valores superiores al 90 % condicionarían pérdidas de rendimientos (Carter *et al.*, 1990). El uso Ag presentó valores superiores a este umbral de CR (en 0-6 y 6-12 cm) mientras que los suelos bajo pastura tuvieron valores inferiores.

Entre las propiedades hidráulicas que permiten caracterizar el sistema poroso, se consideran la infiltración acumulada (I Ac), infiltración básica (IB) y la conductividad hidráulica (Yu *et al.*, 2015). La I Ac fue significativamente superior bajo el suelo LL con respecto a los demás usos. Bajo las condiciones del estudio se encontró que para A+A, F+A y Ag la I Ac fue un 22, 34, 61 % menor con respecto a LL (**Figura 2**). Si bien ambas pasturas (A+A y F+A) presentaron valores intermedios entre LL y Ag, resultó interesante que el suelo bajo A+A tuvo mayor valor de I Ac aunque sin diferenciarse estadísticamente de F+A. Estos resultados ponen de manifiesto que el suelo bajo Ag ha sufrido cambios en el comportamiento hidráulico, que posiblemente podrían ser causados por la disminución de la PT y la macroporosidad, tal como se planteó anteriormente. La IB

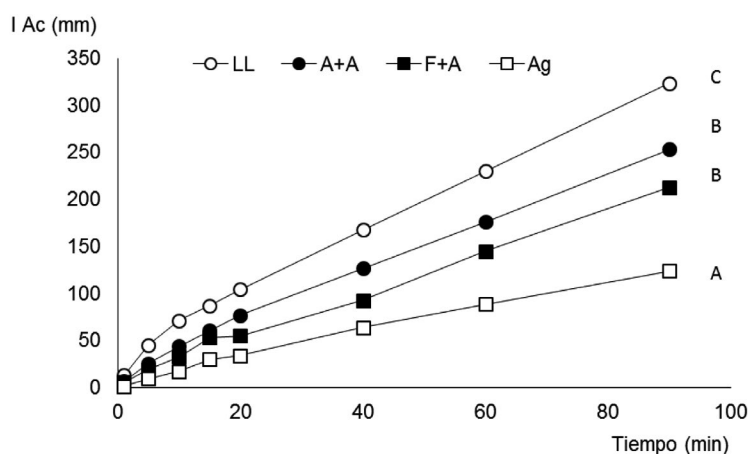


Figura 2. Infiltración acumulada (I Ac) en llorón (LL), fescua+agropiro (F+A), alfalfa+agropiro (A+A) y agrícola (Ag). Letras distintas indican diferencias significativas entre los diferentes usos para la infiltración total a los 90 minutos.

Figure 2. Accumulated infiltration (I Ac) in Pasto llorón, fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag). Different letters indicate significant differences in total infiltration after 90 minutes.

se encontró entre $1,21 \text{ mm min}^{-1}$ para el suelo bajo Ag, que presentó diferencias significativas con respecto a los usos LL ($3,23 \text{ mm min}^{-1}$), A+A ($2,51 \text{ mm min}^{-1}$) y F+A ($2,32 \text{ mm min}^{-1}$).

Los resultados obtenidos de RP de los distintos usos del suelo se pueden observar en la **Figura 3**. El suelo LL no presentó variación de la RP con la variación del contenido de agua en el suelo (8 a 28%) en ninguna de las profundidades evaluadas (**Figura 3.1A-B-C y D**). Los valores promedio fueron inferiores a 0,5 MPa. En los suelos bajo pasturas la RP fue mayor, alcanzando valores de 1,9 MPa para A+A y 1,6 MPa para F+A en el estrato de 10-20 cm (**Figura 3.2B y 3.3B**). Por su parte, el suelo Ag mostró mayor variación de la RP ante cambios en la humedad del suelo, principalmente en 0-10 cm (0,3-2,8 MPa) y 10-20 cm (0,5-2,4 MPa) (**Figura 3.4 A y B**). Estos valores encontrados en el estudio resultaron superiores a los considerados críticos para el crecimiento de las raíces (Ehlers *et al.*, 1983). Quiroga *et al.* (1999) comprobaron que el incremento en la RP se relacionó con disminuciones en el contenido de MO, comprobándose además una fuerte reducción en la conductividad hidráulica e incremento en la susceptibilidad de los suelos a la compactación.

La biomasa de raíces presentó importantes variaciones entre los diferentes usos del suelo (**Figura 4**). Bajo el uso Ag la cantidad de raíces fue significativamente menor con respecto a los demás usos en los primeros 20 cm de profundidad. Analizando la distribución en el perfil hasta los 100cm, en 0-20 cm se concentró la mayor proporción de raíces (78, 70, 53, y 53 % para

LL, F+A, A+A y Ag, respectivamente). Similares resultados fueron obtenidos por Frasier *et al.* (2019), comprobando que entre el 47 y 82% del total de raíces se concentran en los primeros 20 cm del perfil.

La relación entre la biomasa de raíces y la biomasa aérea ha sido utilizada como un indicador de cambios en la partición de fotoasimilados a estos órganos según la especie (Iwasa & Roughgarden, 1984) y el ambiente en el cual se desarrolla (Wilson *et al.*, 1988). Los resultados de esta relación indicaron que F+A (4,1) y LL (4) presentaron un valor superior a A+A (2,9) y Ag (0,35), encontrando diferencias significativas entre LL, F+A y A+A con Ag. Las relaciones obtenidas indican que bajo pastura existe entre 3 y 4 veces más biomasa (en peso) en las raíces que en la parte aérea. Estudios realizados en el Caldenal de la Región Semiárida Pampeana, sobre pastizales naturales de *Stipa tenuis* y *Piptochaetium napostaense*, reportaron una relación de 7, mientras que para el pasto llorón (*Eragrostis curvula*) la relación fue menor (4) (Golberg *et al.*, 2011). Los datos obtenidos en este trabajo se encuentran en concordancia con lo expuesto por Golberg *et al.* (2011), quienes concluyeron además que en zonas áridas y semiáridas las plantas deben invertir una considerable proporción de su productividad anual en la formación y mantenimiento del sistema radical para asegurar un suministro apropiado de agua. Además, esta relación responde a la disponibilidad de nutrientes, aumentando cuando existe una limitante en el suelo (Andrews *et al.*, 1999). Siguiendo con este concepto, la mayor relación encontrada en F+A (4,1) podría ser atribuida a la limitación del nitrógeno edáfico,

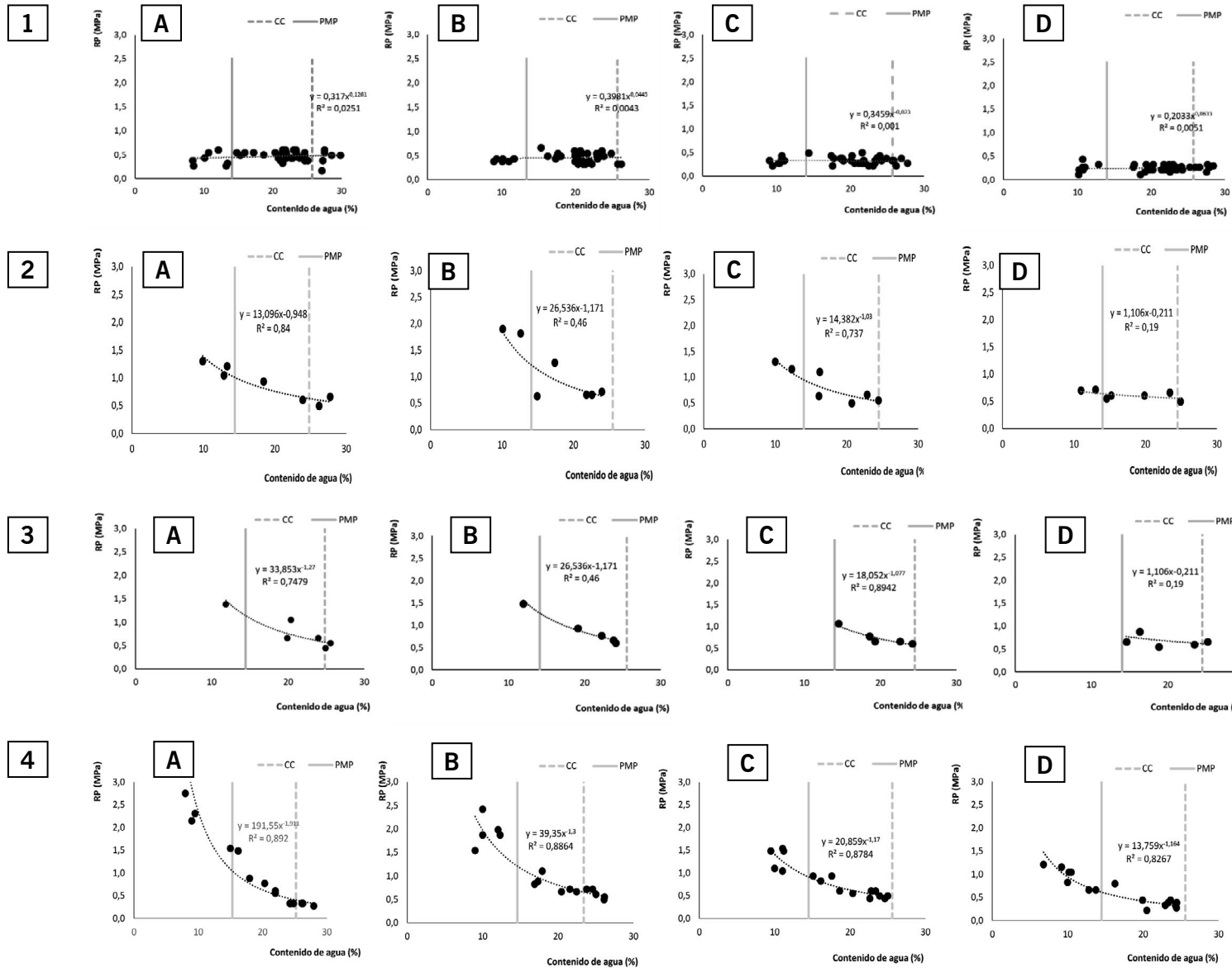


Figura 3. Resistencia a la Penetración (RP) en función al contenido de agua en 1: llorón, 2: festuca+agropiro, 3: agropiro+alfalfa y 4: agrícola, a. 0-10, b. 10-20, c. 20-30, d. 30-40 cm de profundidad. Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP).

Figure 3. Penetration resistance (RP) related water content in 1: pasto lloron, 2: fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) 4: agricultural use (Ag), a. 0-10, b. 10-20, c. 20-30, d. 30-40 cm of depth. Filed capacity (CC) and permanent wilting point (PMP)

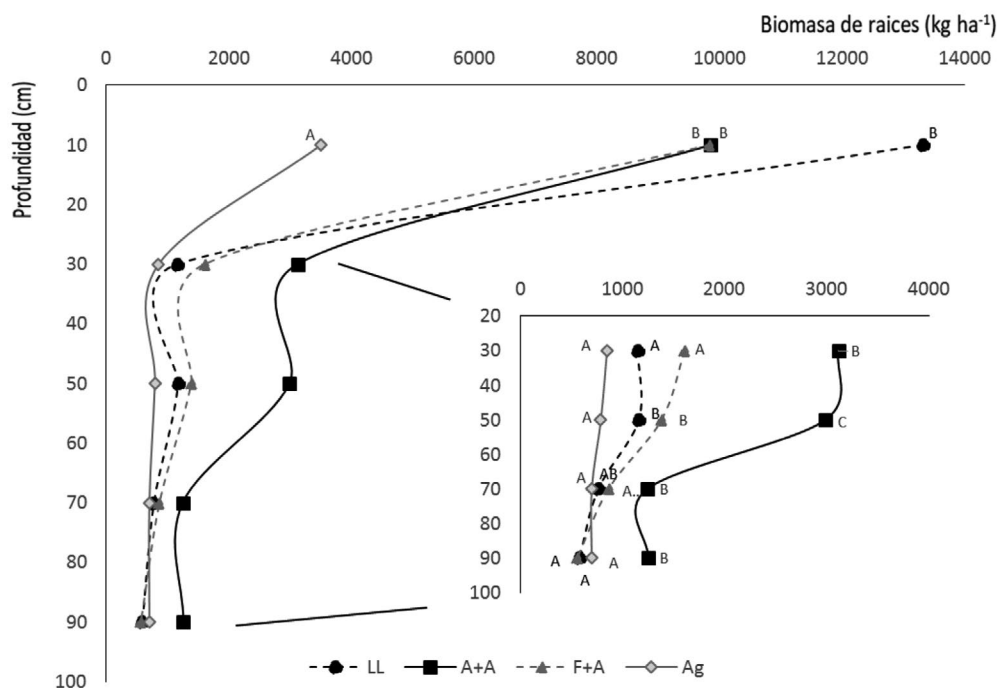


Figura 4. Distribución de biomasa de raíces en llorón (LL), agropiro+alfalfa (A+A), festuca+agropiro (F+A) y agrícola (Ag) hasta 100 cm de profundidad. Letras diferentes indican diferencias significativas entre usos de suelo en cada profundidad.

Figure 4. Root biomass distribution in pasto llorón (LL), fescue+wheatgrass (F+A), lucerne +wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag), up to 100 cm depth. Different letters indicate significant differences among soil uses at each depth stratum

en cambio en A+A (2,9) el aporte del nitrógeno por parte de la leguminosa produciría un ambiente con menos limitación nitrogenada, resultando menor cantidad de raíces con respecto a la producción de biomasa aérea. En la región semiárida se cuenta con información de diferentes cultivos invernales, acerca de la cantidad y distribución de raíces. En este sentido Oderiz *et al.* (2017) encontraron relaciones de 0,35 para centeno, mientras que valores superiores se determinaron en el cultivo de vicia (1,08). Actualmente han sido reportadas distintas relaciones biomasa de raíces/biomasa aérea bajo diferentes usos de suelo: vegetación natural (5,1), pastura perenne (1,9) y pastura permanente (4,2), las que son significativamente mayores a la de los cultivos anuales (1) (Frasier *et al.*, 2019).

El mayor valor de biomasa de raíces respecto a la biomasa aérea encontrado en la pastura, le confiere un gran potencial de fijar carbono en profundidad a través de la producción de biomasa radicular, lo que explicaría el aumento de la materia orgánica en la etapa de pastura de la rotación. Frasier *et al.*, (2019) han encontrado que el contenido de materia orgánica se relacionó

principalmente con la biomasa de raíces y en menor medida con la de los residuos dejados sobre la superficie del suelo.

La **Figura 5** muestra la distribución de los usos del suelo evaluados en el plano de las dos primeras componentes principales, comprobándose que las variables consideradas se encontraron adecuadamente representadas. La componente principal 1 explicó el 59,9 % de la variabilidad y la componente principal 2 el 31,8 %. Las variables que correlacionaron positivamente con la componente 1 fueron raíces, Ma, PT, IB, MO y MOJ y las variables que estuvieron asociadas negativamente fueron DA, DAM, CR, PMP. Para la componente principal 2 se encontraron relaciones positivas con MOV, HC, N y CC.

Los suelos A+A y LL se ubicaron en el mismo cuadrante, por lo cual se podría inferir que presentarían características similares relacionándose positivamente con algunas variables (Raíces, Ma, PT, IB) y negativamente con otras (DA, DAM, CR, PMP y SC). Por otro lado, F+A presenta una posición intermedia en cuanto a las variables que

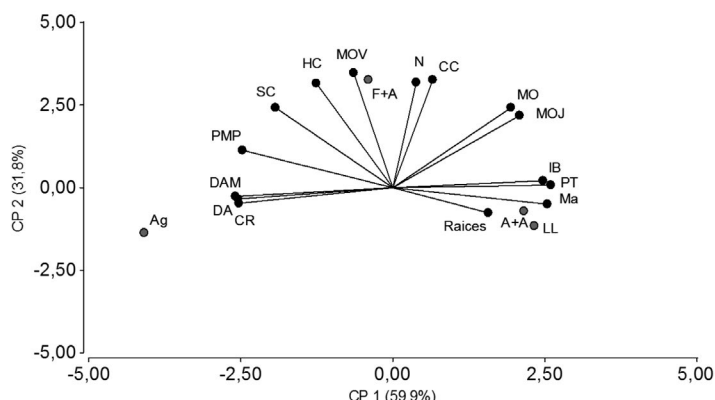


Figura 5. Análisis bi-plot de componentes principales (CP) en suelos bajo uso pasto llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), agropiro+alfalfa (A+A) y agrícola (Ag). Materia orgánica (MO),nitrógeno (N), materia orgánica joven (MOJ), materia orgánica vieja (MOV), porosidad total (PT), densidad aparente (DA), densidad aparente máxima (DAM), infiltración básica (IB), capacidad de campo (CC), macroporos (Ma), punto de marchitez permanente (PMP), humedad crítica (HC), susceptibilidad a la compactación (SC) y compactación relativa (CR).

Figure 5. Bi-plot of the main component (CP) in soils under Pasto llorón (LL), fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag). Organic matter (MO), nitrogen (N), particulate organic matter (MOJ), mineral organic matter (MOV), total porosity (PT), bulk density (DA), maximum bulk density (DAM), infiltration rate (IB), field capacity (CC), macropores (Ma), permanent wilting point (PMP), critical moisture (HC), susceptibility to compaction (SC) and relative compaction (CR).

definen la componente principal 1 asociándose positivamente con MOV, N, CC y HC. El uso de suelo Ag se asoció positivamente a CR, DA, DAM y negativamente a IB, PT, Ma y raíces.

Con el objetivo de establecer relaciones entre indicadores físico-hídricos, en la **Tabla 4** se pre-

senta la matriz de correlación entre los mismos. Se pudo comprobar que la MO se correlacionó positivamente con la MOJ, PT, IB, CC, Ma y en menor medida con raíces. La disminución en la PT a causa del uso implicó un aumento en la DA, DAM, SC. Sin embargo, los poros más susceptibles a los

Tabla 4. Matriz de coeficientes de correlación entre indicadores.

Table 4. Bi-plot of the main components for some indicator variables in soils.

| | MO | N | MOJ | MOV | PT | DA | IB | CC | Ma | PMP | DAM | HC | SC | CR | Raíces |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--------|
| MO | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 0,71 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| MOJ | 1 | 0,65 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| MOV | 0,47 | 0,87 | 0,39 | 1 | | | | | | | | | | | |
| PT | 0,75 | 0,22 | 0,8 | -0,21 | 1 | | | | | | | | | | |
| DA | -0,78 | -0,13 | -0,83 | 0,17 | -0,93 | 1 | | | | | | | | | |
| IB | 0,73 | 0,05 | 0,79 | -0,21 | 0,89 | -0,99 | 1 | | | | | | | | |
| CC | 0,78 | 0,69 | 0,74 | 0,77 | 0,22 | -0,41 | 0,41 | 1 | | | | | | | |
| Ma | 0,63 | 0,11 | 0,69 | -0,35 | 0,99 | -0,88 | 0,84 | 0,05 | 1 | | | | | | |
| PMP | -0,48 | 0,19 | -0,56 | 0,55 | -0,91 | 0,91 | -0,9 | 0,01 | -0,93 | 1 | | | | | |
| DAM | -0,78 | -0,28 | -0,83 | 0,15 | -1 | 0,92 | -0,88 | -0,26 | -0,98 | 0,88 | 1 | | | | |
| HC | 0,23 | 0,68 | 0,15 | 0,96 | -0,46 | 0,36 | -0,38 | 0,69 | -0,59 | 0,72 | 0,41 | 1 | | | |
| SC | -0,09 | 0,52 | -0,18 | 0,84 | -0,7 | 0,66 | -0,68 | 0,4 | -0,79 | 0,92 | 0,66 | 0,94 | 1 | | |
| CR | -0,8 | -0,15 | -0,84 | 0,14 | -0,92 | 1 | -0,99 | -0,44 | -0,87 | 0,89 | 0,92 | 0,33 | 0,64 | 1 | |
| Raíces | 0,32 | 0,24 | 0,35 | -0,26 | 0,69 | -0,38 | 0,29 | -0,31 | 0,76 | -0,54 | -0,7 | -0,51 | -0,52 | -0,36 | 1 |

Materia orgánica (MO),nitrógeno (N), materia orgánica joven (MOJ), materia orgánica vieja (MOV) porosidad total (PT), densidad aparente (DA), densidad aparente máxima (DAM), infiltración básica (IB), capacidad de campo (CC), macroporos (Ma), punto de marchitez permanente (PMP), densidad aparente máxima (DAM), humedad crítica (HC), susceptibilidad a la compactación (SC), compactación relativa (CR).

procesos de degradación-compactación fueron los Ma, encargados de la aireación del suelo y del movimiento del agua. El cambio en la PT y en la proporción de Ma asociados a la pérdida de MO, son las principales causas de los efectos sobre los procesos físico hídricos de los suelos (Czachor *et al.*, 2013; Fernández *et al.*, 2019). Nuestros resultados pudieron corroborar esta afirmación, ya que la macroporosidad se asoció positivamente con la IB ($r=0,84$).

No solo la cantidad de poros define el comportamiento hídrico del suelo, sino que también influye su forma, tamaño y distribución (Fernández *et al.*, 2019). La arquitectura de las raíces favoreció cambios en la estructura del suelo, dando como resultado relaciones positivas entre raíces con PT ($r= 0,69$) y con Ma ($r=0,76$). Se ha reportado que las raíces tienen un menor crecimiento en suelos densificados/compactados (Clark *et al.*, 2003) debido a la dificultad de penetrar y desplazar el suelo a fin de generar nuevos poros.

Las rotaciones de cultivos resultaron ser una buena herramienta de manejo para considerar en suelos donde existen problemas de compactación o densificación. Al introducir plantas cuyas raíces puedan penetrar y explorar mayor profundidad de suelo, se pueden crear poros estables, que al descomponerse las raíces formen bioporos, los cuales pueden ser empleados por las raíces de los cultivos posteriores. Esta perforación biológica (Gregory *et al.*, 2006) es dependiente de los cultivos que integran la rotación. Algunos reportes indican que la formación de bioporos es menor en rotaciones de oleaginosas y legumi-

nosas anuales con respecto a cultivos perennes como la alfalfa (Rasse & Smucker, 1998; Torres-Guerrero *et al.*, 2013), debido a que esta pastura puede potenciar la generación de una mejor estructura de suelo con macroporos más estables. En el mismo sentido Imhoff *et al.* (2010) remarcaron que rotaciones más diversificadas y con mayor proporción de gramíneas presentan una mejor condición física, mejorando la proporción de poros, en relación a aquellas rotaciones menos diversificadas.

En relación al objetivo que se había planteado acerca de si los indicadores físico-hídricos bajo el planteo mixto de rotación, se aproximan a los niveles de los indicadores bajo el uso con pastura permanente de gramínea (LL), se confeccionó la **Tabla 5**. En la misma, el suelo bajo uso LL es considerado condición de referencia (100%), debido a que representa un suelo en un óptimo estado de conservación para las condiciones edafoclimáticas de la región (Fernández, 2018). Los valores de los indicadores evaluados bajo las dos pasturas perennes (F+A y A+A), se encontraron más próximos a los valores del LL que al uso Ag. Particularmente la pastura A+A fue la que más próxima se encontró a la situación de referencia, presentando además una cantidad de raíces que superó a las presentes en el uso LL. Estos resultados indicarían que sistemas mixtos de rotación con pasturas perennes, y más aún si se incluyen especies leguminosas, podrían mantener condiciones muy favorables de fertilidad física y biológica, generando condiciones adecuadas para la acumulación de carbono en el suelo (Studdert *et al.*, 2017). La mayor dificultad para captar el agua de lluvia en el

Tabla 5. Valores relativos de los indicadores de suelo con respecto al uso bajo pasto llorón (LL), para festuca+agropiro (F+A), agropiro+alfalfa (A+A) y agrícola (Ag).

Table 5. Relative values of the soil indicators with respect to the use under pasto lloron (LL), for fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag).

| | MO | MOJ | DA | PT | Ma | CR | DAM | I Ac | IB | Raices |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|--------|
| LL | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| F+A | 85 | 97 | 123 | 86 | 74 | 106 | 104 | 66 | 72 | 84 |
| A+A | 91 | 100 | 110 | 89 | 81 | 107 | 100 | 78 | 77 | 108 |
| Ag | 68 | 55 | 128 | 78 | 59 | 125 | 106 | 38 | 37 | 39 |

Materia orgánica total (MO), materia orgánica joven (MOJ), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), macroporos (Ma), compactación relativa (CR), densidad aparente máxima (DAM), infiltración acumulada (I Ac), infiltración básica (IB).

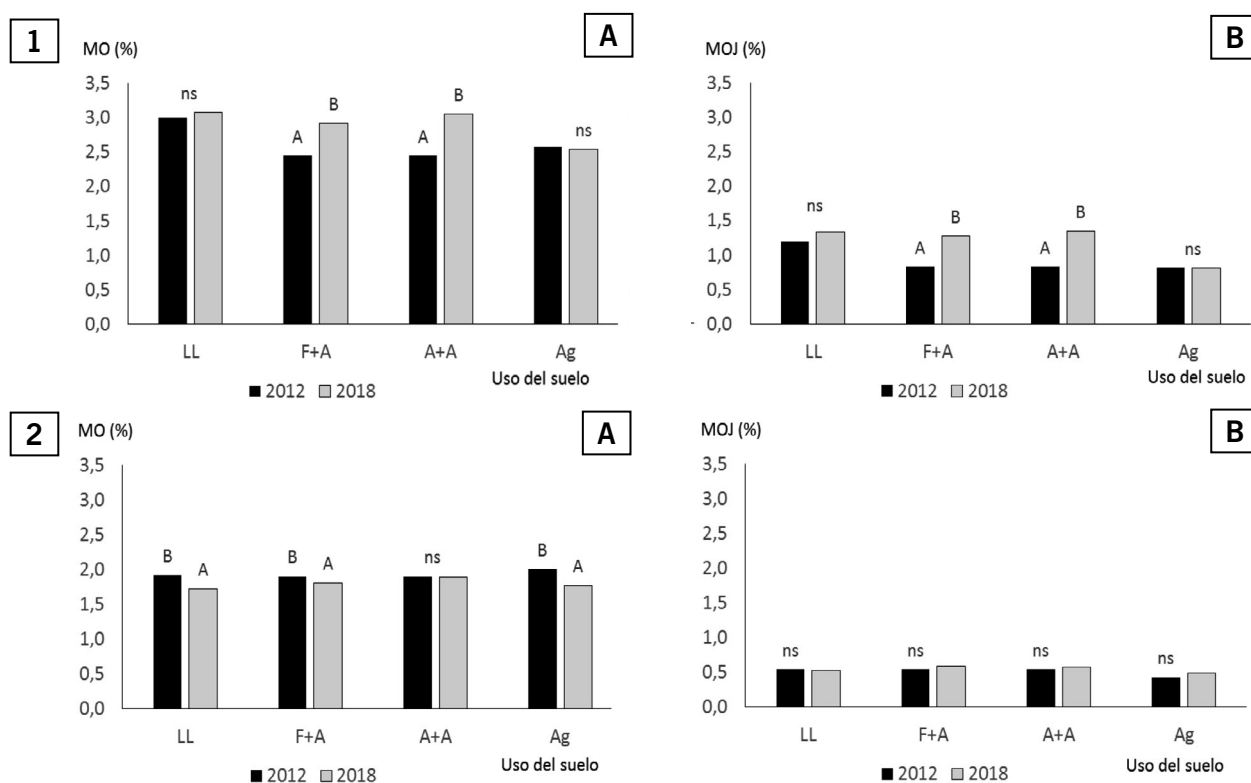


Figura 6. a) Materia orgánica total (MO) y b) Materia orgánica joven (MOJ) para los distintos usos de suelo: llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), agropiro+alfalfa (A+A) y agrícola (Ag) en 1: 0-10 y 2: 10-20 cm de profundidad. Letras distintas indican diferencias significativas en cada uso entre 2012 y 2018.

Figure 6. a) Total organic matter (MO) and b) particulate organic matter (MOJ) for different soil use: pasto lloron (LL), fescue+wheatgrass (F+A), lucerne+wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag) in 1: 0-10 and 2: 10-20 cm of depth. Different letters indicated significant differences among soil uses between 2018 and 2018.

uso Ag resulta preocupante si consideramos que en ambientes semiáridos las precipitaciones no logran cubrir normalmente el uso consuntivo de los cultivos, constituyendo la principal limitante de los sistemas de producción.

A fin de evaluar el efecto del uso del suelo sobre los contenidos de materia orgánica a través del tiempo, se presentan los contenidos de la misma entre los años 2012 y 2018 (**Figura 6**). Los resultados muestran en 0-10 cm de profundidad, que tanto en LL como en Ag no se encontraron diferencias significativas entre 2012 y 2018 ($p=0.15$ y $p=0.64$, respectivamente), en cambio en F+A y A+A los contenidos de MO aumentaron significativamente ($p=0.0071$ y 0.0036 , respectivamente) entre el 2012 y 2018 (**Figura 6 1A**). También en 10-20 cm (**Figura 6 2A**) el uso del suelo tuvo incidencia en los contenidos de MO en los años evaluados, donde se encontraron menores contenidos de MO en LL, F+A y Ag en el 2018 con respecto al 2012. En relación

a la MOJ, los usos Ag y LL mantuvieron el nivel en 0,82 y 1,35 % respectivamente y no presentaron diferencias significativas entre el 2012 y 2018. Por su parte, las pasturas consociadas al cabo de 5 años aumentaron significativamente el contenido de MOJ, resultando similares al uso LL (**Figura 6 1B**). En 10-20 cm de profundidad los valores fueron similares entre sí y no se encontraron diferencias significativas entre años en cada uso de suelo (**Figura 6 2B**).

Al momento de la siembra de las pasturas (2012), el contenido de MO se encontraba en 2,45 %, luego de 5 años de producción aumentó a 2,92 y 3,05 % para F+A y A+A, respectivamente. Estos resultados reflejan un incremento del 19% en el caso de F+A y de un 24 % para A+A, confirmando el efecto benéfico de la rotación con pasturas perennes sobre el balance de carbono. Por su parte los usos Ag (2,57%) y LL (3%) mantuvieron los valores iniciales. Fernandez *et al.* (2016) obtuvieron un valor de MO

cercano al 3 % como umbral a partir del cual los indicadores físico hidricos no limitan la captación, el almacenaje y el uso del agua por los cultivos. Las pasturas estudiadas en la experiencia (F+A y A+A) lograron alcanzar durante los 5 años este valor umbral de 3 % de MO.

CONCLUSIONES

El trabajo confirmó el efecto benéfico de incluir pasturas perennes en la rotación sobre indicadores físico-hídricos y sobre el contenido de materia orgánica y sus fracciones en Paleustoles petrocálculos de la provincia de La Pampa.

Los valores de los indicadores en las rotaciones con pasturas perennes se aproximaron al suelo considerado como línea de base o de referencia (LL). La pastura compuesta por leguminosa y gramínea (A+A) fue la más cercana a la situación de referencia. No obstante, se encontró una estratificación importante, siendo el estrato superior donde los indicadores fueron fundamentalmente influenciados por los diferentes usos de suelo.

Asociado con la disminución en el contenido de materia orgánica, en el suelo bajo uso Ag se produjeron cambios a nivel de macroporosidad. Los cultivos anuales no serían suficientemente efectivos en mantener y o formar macroporos, al ser comparado su efecto con los de las pasturas perennes y permanentes. Uno de los indicadores más afectado fue la infiltración, la que se redujo ampliamente luego de 13 años de agricultura continua.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews M; J Sprent; J Raven & P Eady. 1999. Relationships between shoot to root ratio, growth and leaf soluble protein concentration of *Pisum sativum*, *Phaseolus vulgaris* and *Triticum aestivum* under different nutrient deficiencies. *Plant, Cell Environ.* 22: 949–958.
- Andriulo A & R Rosell. 1988. Propiedades físicas edáficas en dos sistemas de labranza. *Turrialba* 38: 365–375.
- Blake G & K Hartge. 1986. Bulk density. En: Klute, A (ed). *Methods of Soil Analysis-Physical and Mineralogical Methods* 2ne edn. Am. Soc. Agron. Madison, USA. 363-375.
- Blanco-Canqui H & S J Ruis. 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326, 164–200.
- Bono A; R Alvarez; D Buschiazio & R Cantet. 2008. Tillage Effects on Soil Carbon Balance in a Semiarid Agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J* 72: 1140–1149.
- Burke I; C Yonker; W Parton; C Cole; K Flach & D Schimel. 1989. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in US Grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 800-805.
- Cambardella CA & E Elliott. 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma* 56: 449–457.
- Carter M. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433
- Casanovas E; H Echeverria & G Studdert. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. Contenido total y de distintas fracciones. *Ciencia del Suelo* 13:16-20.
- Clark LJ; WR Whalley & PB Barraclough. 2003. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil* 255: 93-104.
- Czachor H; P Hallett; L Lichner & G Jozefaciuk. 2013. Pore shape and organic compounds drive major changes in the hydrological characteristics of agricultural soils. *Eur. J. Soil Sci.* 64: 334–344.
- Dexter A; E Czyn & O Gate. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Till. Res.* 93: 412–419.
- Di Rienzo JA; F Casanoves; M Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & C Robledo. 2013. Infostat - Software estadístico. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina [WWW Document]. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Duval ME; JA Galantini; JM Martínez & J O Iglesias. 2016. Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico 34: 197–209.
- Duval M; J Galantini; J Iglesias; S Canelo; J Martinez & L Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131: 11–19.
- Eaton J & D Lawrence. 2009. Loss of carbon sequestration potential after several decades of shifting cultivation in the Southern Yucatán. *For. Ecol. Manage.* 258: 949–958.
- Ehlers W; U Kopke; F Hesse & W Bhom. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.* 3:261-275
- Fernández P; J Luque & J Paoloni. 1971. Análisis de la Infiltración y su aplicación para diseño de riego en el valle inferior del Río Colorado. Publicación N° 130 INTA. 29 pp.
- Fernández R. 2018. Valores de línea de base para evaluar la degradación en molisoles de la región semiárida pampeana. Tesis doctoral UNSur.

- Fernández R; A Quiroga; C Álvarez; C Lobartini & E Noellemeyer. 2016. Valores umbrales de algunos indicadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. *Ciencia Del Suelo* 34: 279–292.
- Fernández R; I Frasier; E Noellemeyer & A Quiroga. 2017. Soil quality and productivity under zero tillage and grazing on Mollisols in Argentina – A long-term study. *Geoderma Regional* 11: 44–52. doi:10.1016/j.geodrs.2017.09.002
- Fernández R; I Frasier; A Quiroga & E Noellemeyer. 2019. Pore morphology reveals interaction of biological and physical processes for structure formation in soils of the semiarid Argentinean Pampa. *Soil Till Res.* 191: 256–265.
- Franzluebbers A. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Till Res.* 66: 197–205.
- Franzluebbers A; F Hons & D Zuberer. 1994. Long term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *SoilSci. Soc. Am. J.* 58: 1639–1645.
- Franzluebbers A; J Sawchik & M A Taboada. 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture–crop rotations in temperate North and South America. *Agric. Ecosys. Environ.* 190: 18–26.
- Frasier I; E Noellemeyer; R Fernández & A Quiroga. 2016a. Direct field method for root biomass quantification in agroecosystems. *MethodsX Journal.* 3: 513–519.
- Frasier I; A Quiroga; R Fernández; C Álvarez; F Gómez; E Scherger; A Gili & E Noellemeyer. 2019. Soil type, land-use and -management as drivers of root-C inputs and soil C storage in the semiarid pampa region, Argentina. *Soil Till Res.* 192: 134–143.
- Frasier I; A Quiroga & E Noellemeyer, 2016b. Science of the Total Environment Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Science of the Total Environment, The* 562: 628–639.
- Glab T. 2014. Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward. *Soil and Tillage Research* 144: 8–19.
- Golberg A; M Ruíz; A Quiroga & O Fernández. 2011. ¿Qué le sucede a un cultivo cuando no llueve? Ediciones INTA, 93pp.
- Greenland D. 1981. Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.* 32: 301–322.
- Gregory PJ. 2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *Eur. J. Soil Sci.* 57: 2–12
- Hollinger SE; CJ Bernacchi & TP Meyers. 2005. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States. *Agric. For. Meteorol.* 130: 59–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.01.005>.
- Imhoff S; P Ghiberto; A Grioni & J Gay. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma* 158: 268–274.
- Iwasa Y & J Roughgarden. 1984. Shoot/root balance of plants: Optimal growth of a system with many vegetative organs. *Theor. Popul. Biol.* 25: 78–105.
- Klute A & A Klute. 1986. Water Retention: Laboratory Methods, En: *Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods.* Soil Sci. Soc. Am. and Am. Soc. Agron. 635–662.
- Krüger H; S Venanzi & E de Sá Pereira. 2008. En sistemas de producción bajo siembra directa continua system under continuous no-till 26: 211–217.
- Lemaire G; F Gastal; A Franzluebbers & A Chabbi. 2015. Grassland–cropping rotations: an avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality. *Environ. Manag.* 56, 1065–1077. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-015-0561-6>.
- Lipiec J & R Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116, 107–136.
- Logsdon S & T Kaspar. 1995. Tillage influences as measured by ponded and tension infiltration. *J. Soil Water Conserv.* 50: 571–575.
- López F; M Duval; J Martínez & J Galantini. 2016. Porosidad de ustoles bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 34: 173–184.
- McGarry D; B Bridge & B Radford. 2000. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil Till. Res.* 53: 105–115.
- Micó, C; M Peris, L Recatalá & J Sánchez. 2007. Baseline values for heavy metals in agricultural soils in an European Mediterranean region. *Sci. Total Environ.* 378: 13–17.
- Moret D & J Arrue. 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil Till. Res.* 96: 103–113.
- Nelson D & L Sommers. 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. En: Black, C; D Evans; J White; L Ensminger; F Clark. *Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Soil Sci. So. Am. and Am. Soc. Agron. Madison, USA, pp. 961–1010.
- Noellemeyer E; A Quiroga & D Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments* 65: 142–155.

- Noellemeyer E; R Fernández & A Quiroga. 2013. Crop and Tillage Effects on Water Productivity of Dryland Agriculture in Argentina. *Agriculture* 3: 1–11. doi:10.3390/agriculture3010001
- Oderiz J; M Uhaldegaray; I Frasier; A Quiroga; N Amiotti & P Zalba. 2017. Raíces de cultivos de cobertura. cantidad, distribución e influencia sobre el n mineral. *Ciencia del Suelo* 35: 249-258.
- O'Sullivan M; J Dickson & D Campbell. 1987. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *J. Soil Sci.* 38: 137–148.
- Pilatti M; J de Orellana; S Imhoff & A Da Silva. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *Ciencia del Suelo* 30: 9-21.
- Quiroga A, A Oderiz, M Uhaldegaray, C Alvarez, E Scherge, R Fernández & I Frasier. 2016. Influencia del uso de suelos sobre indicadores físicos de compactación. *Semiárida* 26: 21–28.
- Quiroga A; E Buschiazzi & N Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. 52: 21-28.
- Quiroga A & G Studdert. 2014. Manejo del suelo e intensificación agrícola: agua y materia orgánica, dos aspectos clave. En: HE Echeverría & FO García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da edn. Pp. 73-100. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Quiroga A; R Fernández & E Noellemeyer. 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems. *Soil Till. Res.* 105: 164–170.
- 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: 10–18.
- Rasse DP & A JM Smucker. 1998. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. *Plant Soil* 204: 203-212.
- Riestra D. 2012. Efecto de la forestación sobre el carbono orgánico y propiedades físicas de Molisoles y Entisoles de la región semiárida pampeana. Tesis doctoral UNSur.
- Soracco G. 2003. Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile, 2003.
- Stengel P; J Douglas; J Guerif; M Goss; R Monnier & R Cannell. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drill. *Soil Till. Res.* 4: 35-53.
- Studdert G. 2017. Sistemas de cultivo en el sudeste bonaerense: su aporte al manejo de la fracción orgánica de los suelos. En: F Salvagiotti, H Kruger & G Studdert (eds). *Ensayos de Larga Duración en Argentina: Un aporte al logro de Sistemas Agrícolas sustentables*. Pp 235:266. Ediciones INTA.
- Thackway, R & A Specht. 2015. Synthesising the effects of land use on natural and managed landscapes. *Sci. Total Environ.* 526: 136–152.
- Torres-Guerrero C; M Fuentes-Ponce; B Herrera & F De León. 2013. Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana* 31: 71–84. doi:10.2475/ajs.237.6.389
- USDA NRCS. 2014. Soil Health- Guides for Educators Soil Bulk Density, Moisture, Aeration. 1-11
- Veum K; K Goyne; R Kremer; R Miles & K Sudduth. 2013. Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. *Biogeochemistry* 117: 81–99.
- Wang Q; Y Wang; Q Wang & J Liu. 2014. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions. *Soil Till. Res.* 143: 1–6.
- Wilson J. 1988. A review of evidence on the control of shoot: root ratio in relation to models. *Ann. Bot. Anal. Chim. Acta.* 61: 433-449.
- Yu M; L Zhang; X Xu; K Feger; Y Wang; W Liu & K Schwärzel. 2015. Impact of land-use changes on soil hydraulic properties of Calcaric Regosols on the Loess Plateau, NW China. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178: 486-498.
- Zach A; H Tiessen & E Noellemeyer. 2006. Carbon Turnover and Carbon-13 Natural Abundance under Land Use Change in Semi-arid Savanna Soils of La Pampa, Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1541–1546.