

PROPIEDADES FÍSICAS DE PALEUSTOLES PETROCÁLCICOS INFLUENCIADAS POR DISTINTAS PRÁCTICAS DE USO.

Trabajo final de graduación para obtener el título de Ingeniero Agrónomo

Autores:

Bissolino, Mateo
Furch, Ezequiel Lucas Natanael

Directora:

Dra. Fernández, Romina
INTA Anguil

Codirector:

Dr. Quiroga, Alberto Raúl
*Cátedras de Edafología y Manejo de suelos de la FA
INTA Anquil*

Evaluadores:

Dra. Noellemeyer, Elke
Cátedra de Edafología y Manejo de suelos de la FA

Ing. Oderiz, Juan Agustín
INTA Anguil

FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Índice

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Introducción.....	4
Materiales y métodos.....	6
Resultados y Discusión.....	9
Conclusiones.....	34
Bibliografía.....	34

Resumen

La experiencia tuvo como finalidad caracterizar el sistema poroso en diferentes usos de 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 determinaron indicadores como, materia orgánica (total, joven y vieja), densidad aparente, densidad aparente máxima, compactación relativa, humedad crítica, porosidad total, macroporosidad, resistencia a la penetración, infiltración y 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.

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 claves: ensayo de larga duración, suelo línea de base, pasturas perennes.

Abstract

The experience purpose was to characterize soil porous system in different land uses and, to determine if physical-hydric indicators under mixed rotation approach (annual crops-pastures) will approach to the levels of land use with permanent grassland (baseline) in loam soils of Semiarid Pampa Region. Three different land uses were selected on petrocalcic Paleustolls, corresponding to long-term trials, permanent grassland of Pasto Lloron (LL) considered as baseline soil, perennial pastures of fescue + wheatgrass (F+A) and Lucerne + Wheatgrass (A+A) and agricultural use (Ag). On these land uses, indicators such as organic matter, bulk density, maximum bulk density, relative compaction, critical moisture content, total porosity, macroporosity, penetration resistance, infiltration and roots were determined.

The values of the indicators evaluated in the two perennial pastures (F + A and A + A), were found closer to the values of LL than to the Ag use, although particularly the A + A pasture was the closest to the reference situation. Land use had a greater incidence in the upper 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.

These results demonstrate the potential of perennial pastures, and even more so if they include leguminous species, in the recovery of physical and biological fertility in soils that are in the process of degradation.

Key words: long-term trials, baseline values soils, perennial pastures.

Introducción

Históricamente la pérdida de carbono orgánico del suelo se ha asociado al uso de sistemas de labranzas y monocultivos con largos periodos de barbechos (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 éstas 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; Brown & Lugo, 1990).

La adopción de la siembra directa (SD), como práctica de manejo conservacionista, respecto a siembra convencional permitió atenuar estas pérdidas y en algunos casos mantener los contenidos de carbono de los suelos incidiendo positivamente sobre el rendimientos de cultivos (Hollinger *et al.*, 2005; Quiroga *et al.*, 2009). Principalmente por mejoras en la captación, almacenaje y eficiencia en el uso del agua (Noellemeyer *et al.*, 2013) y el ciclado de nutrientes a través de una mayor actividad biológica (Frasier *et al.*, 2016b). No obstante, solamente el 9 % de las tierras cultivadas mundialmente se encuentran bajo SD, siendo Estados Unidos el país que presenta la mayor superficie bajo esta práctica seguido por Argentina y Brasil. En términos de porcentaje del área total cultivada, Brasil, Argentina y Paraguay tienen más del 70 % de las tierras de cultivo bajo manejo en 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 carbono del suelo con respecto al contenido inicial (Fernández *et al.*, 2017), mientras que asociado a monocultivos con bajo aportes de residuos (alta

incidencia de leguminosas) en detrimento de la superficie destinada a pasturas se comprueban pérdidas de materia orgánica y degradación física de los suelos (Quiroga *et al.*, 2016).

Estos cambios, influenciaron negativamente en la estructura y en el funcionamiento de algunos servicios ecosistémicos producidos por el suelo (Fernández *et al.*, 2016), donde los procesos físico hídricos han sido afectados.

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, que permitan incrementar la productividad física del agua proveniente de las precipitaciones en cuanto al aporte de biomasa aérea y radicular (Franzluebbers *et al.*, 2014). Las tradicionales rotaciones entre pasturas y cultivos anuales que caracterizaron los sistemas mixtos permitían alternar ciclos de mayor y menor aporte de carbono mediante adecuados niveles de residuos. De esta manera suelos bajo prácticas de uso conservacionistas, generalmente poseen mayor volumen de macroporos (Moran *et al.*, 1988; 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 carbono orgánico (Duval *et al.*, 2016). El efecto de la materia orgánica se puede constatar a través de reducción de la densidad aparente y de 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 aborden la caracterización del sistema poroso y su relación con propiedades físico-hídricas. Éstas son las principales condicionantes para la productividad agropecuaria en regiones semiáridas, ya que determinan la eficiencia de captación, el almacenaje y uso de las

precipitaciones, incidiendo sobre la biodisponibilidad del agua y la producción de los cultivos (Głąb, 2014).

Se plantearon como objetivos:

- Caracterizar el sistema poroso y establecer relaciones con indicadores físico-hídricos en Paleustoles petrocálcicos influenciados por distintas prácticas de uso.
- 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 este suelo 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:

1) 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 física-hídrica y biológica (Fernández *et al.*, 2018).

2) Planteo mixto de producción, con rotación de cultivos anuales y pastura perenne establecidos en siembra directa. Los muestreos fueron efectuados en la fase de pasturas perennes. Esta secuencia comenzó en el año 2006, sobre pastura permanente de pasto llorón, y los cultivos que intervinieron 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: 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) Planteo agrícola (Ag), desde el año 2006 sobre pastura permanente de pasto llorón, se establecieron cultivos en siembra directa no continua que alternaron con laboreo del suelo empleando rastra de discos dobles. En la secuencia de cultivos anuales participaron cultivos de verano como girasol, soja (*Glicine max*) y cereales de invierno para cosecha como centeno y triticale (*Triticosecale*).

De cada práctica de uso, 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 Pipeta.
- Fraccionamiento físico de suelo de acuerdo a la técnica descrita por Cambardella & Elliott (1993) modificada por Noellemeyer *et al.* (2006), para obtener las fracciones de agregados <50 μm y 50-2000 μm , a los cuales posteriormente se les determinó contenido de carbono y nitrógeno total por método de combustión en seco (LECO Truspec TM). 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 MO utilizando el factor de conversión de 1,724 (Nelson & Sommers, 1996) y los resultados se expresaron como MO joven (agregados 50-

2000 μm , MOJ) y MO vieja (agregados $< 50 \mu\text{m}$, MOV). La suma de estas dos fracciones se consideró MO total (MO).

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 porosidad total (PT) considerando el contenido de agua de la muestra de suelo saturada (P_{hs}) y la muestra de suelo seco (P_s), de acuerdo con la siguiente ecuación,

$$PT = ((P_{hs}-P_s)/P_s) * 100.$$

- 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 (cercaos a PMP y CC)
- Para conocer la infiltración de agua en el suelo se realizaron ensayos a campo con infiltrómetro de doble anillo (Método de Kostiakov descrito por Fernández *et al.*, 1971).

- Se determinó densidad aparente máxima (DAM), humedad crítica (HC) y susceptibilidad a la compactación (SC) a partir del test Proctor de Compactación (Stengel *et al.*, 1984).
- Para evaluar la biomasa de raíces se siguió el método propuesto por Frasier *et al.* (2016a), cada 20 cm hasta los 100 cm de profundidad.

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. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

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

Resultados y Discusión

Los contenidos de MO, y especialmente la fracción más lábiles fueron influenciados significativamente por el uso (Tabla 2). Distintos autores (Duval *et al.*, 2013; Fernández, *et al.*, 2016) señalan 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 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 /manejos, aunque sí se observaron mayores contenidos en 6-12 cm de profundidad, con respecto a 12-18 cm.

En relación a la MOJ, los usos LL y A+A tuvieron similar contenido y además fueron los que presentaron los mayores valores con respecto a F+A y Ag, diferenciándose estadísticamente en el estrato más superficial. En cambio y tal cual lo ocurrido con MO, los valores encontrados en 6-12 y 12-18 cm de profundidad fueron similares entre los usos de suelo y no se encontraron diferencias significativas.

Con respecto a la MOV el mayor valor en 0-6 cm se halló en LL pero no se diferenció estadísticamente con los demás usos. A mayor profundidad, los contenidos fueron similares y tampoco se hallaron diferencias estadísticas significativas.

Los contenidos de MOV en Ag representaron un 64 % de la MO, mientras que para los demás usos el valor hallado fue menor, (51, 51 y 55% para F+A, A+A y LL, respectivamente). En cuanto a la MOJ, ésta representó un 45, 49, 49 y 36% con respecto a la MO, para LL, F+A, A+A y Ag, respectivamente. Esta menor proporción de MOJ con respecto a la MO indicaría procesos de degradación bajo el uso Ag. Ha sido ampliamente demostrado que la degradación asociada al uso agrícola reduce la fracción lábil/jóven de la MO en primera instancia (Elliott, 1986; 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; Fernández *et al.*, 2016;). Por consiguiente cuando un suelo pierde calidad se observa un predominio de las fracciones más estables asociadas a la fracción mineral (Casanovas *et al.*, 1995; Riestra, 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).

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), en las diferentes profundidades estudiadas.

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
	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
	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 indican diferencias estadísticas significativas, entre usos en la misma profundidad.

Con respecto a la densidad aparente, en 0-6 cm de profundidad, se hallaron diferencias estadísticas significativas entre el suelo Ag que presentó el mayor valor (1,27 g cm⁻³), con respecto a los demás usos de suelo. Los resultados para F+A, A+A y LL fueron un 12, 14 y 22 % menor, respectivamente, con respecto al uso Ag (Figura 1, a).

Similar a lo encontrado en 0-6 cm, para 6-12 cm de profundidad también se hallaron diferencias estadísticas significativas entre el suelo Ag que presentó el mayor valor, con respecto a los demás usos de suelo (Figura 1, b). En cambio en los 12-18 cm todos los usos tuvieron similar

valor de DA y no se obtuvieron diferencias significativas (Figura 1, c). La DA de F+A en 0-6 y 6-12 cm de profundidad fue similar estadísticamente a todos los usos evaluados, en cambio el valor de DA en la pastura A+A fue estadísticamente similar al suelo bajo LL.

La bibliografía plantea que el uso agrícola del suelo aumenta la DA (Galizzi *et al.* 2012; Quiroga *et al.*, 2016) En nuestro estudio el valor de DA bajo el uso Ag no superó $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ y, por ende, en suelos de textura franca no reflejaría limitaciones en el sistema poroso (USDA NRCS, 2014). No obstante, Fernández *et al.* (2016) encontraron que a un valor de DA considerado bajo ($1,17 \text{ g cm}^{-3}$) para suelos agrícolas de textura franca, las raíces no podrían aprovechar el agua físicamente disponible comprendida entre CC y PMP. En este sentido la bibliografía plantea que la densidad aparente no sería un indicador que refleje la calidad del suelo (Logsdon & Karlen, 2004; Dexter *et al.*, 2007; Asgarzadeh *et al.*, 2010), ya que por si sola no logra explicar cambios en las propiedades hidráulicas del suelo en los diferentes manejos. Debido a ello, resulta necesario abordar otros indicadores tales como, distribución del tamaño de poros, estabilidad del sistema poroso y, fundamentalmente, continuidad del sistema poroso (Soracco, 2003).

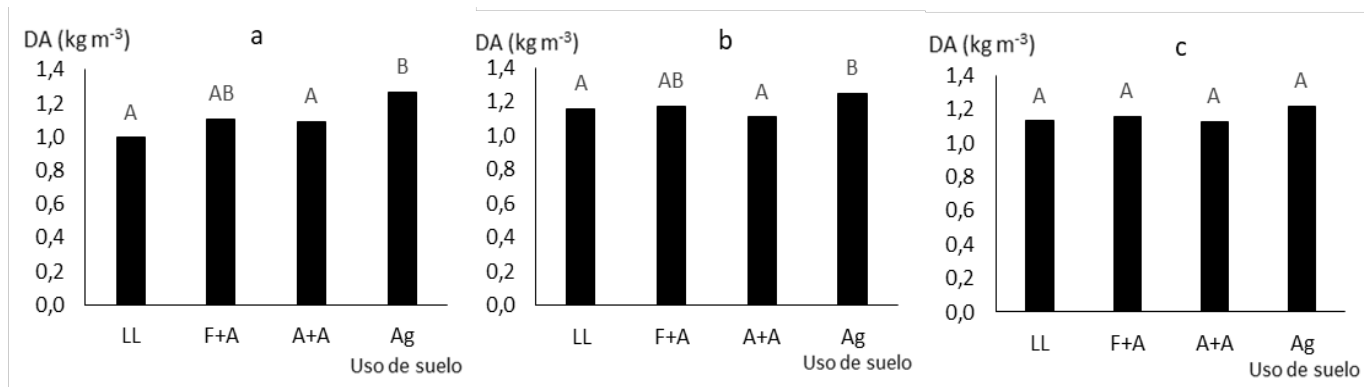


Figura 1: Densidad aparente (DA) en llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), alfalfa+agropiro (A+A) y agrícola (Ag), a (0-6 cm), b (6-12 cm) y c (12-18 cm) de profundidad. Letras distintas indican diferencias significativas.

La PT varió entre los suelos bajo distintos usos tal como se muestra en la Figura 2. En los primeros 0-6 cm de profundidad la PT medida se encontró entre 42,4 y 54,7 % con diferencias significativas entre los suelos, donde LL presentó el mayor valor (54,7 %) F+A y A+A valores intermedios (47,2; 48,4%, respectivamente) y el uso Ag el menor valor (42,4 %) (Figura 2, a). Para la profundidad 6-12 cm, el mayor valor de PT fue para A+A (46,9%) y el menor fue para el suelo Ag (38,5%) con diferencias estadísticas significativas (Figura 2, b). Similar fue lo encontrado para la profundidad 12-18 cm, donde también el mayor valor de PT fue para A+A (46,8%) y el menor fue para el uso Ag (39,8%) con diferencias estadísticas significativas (Figura 2, c).

Con respecto a la macroporosidad, para los primeros 0-6 cm de profundidad, el patrón fue similar a lo obtenido con relación a PT donde los suelos se ordenaron LL > A+A > F+A y el menor valor fue para el manejo 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 encontrado en cuanto a PT.

La compactación altera la PT del suelo y la distribución del tamaño de los poros, de tal manera que se produce una disminución de los macroporos y un aumento de los microporos, lo cual debería manifestarse en los valores de DA (Kay *et al.*, 1997; Andriulo & Rosell, 1998; Hamza & Anderson, 2005). Se pudo comprobar una importante disminución en la porosidad total de los suelos bajo uso Ag, la cual tendría lugar a expensas de pérdidas de la macroporosidad. Si bien es ampliamente conocido que los macroporos presentes en el suelo resultan esenciales para el crecimiento de la raíz, el transporte del agua y el intercambio de gases (Moret & Arrue, 2007), son escasos los estudios que brinden mayor detalle en cuanto a la caracterización de los poros mayores de 10 μm de diámetro (Rasa *et al.*, 2012). Greenland (1981) propone un valor umbral

de macroporosidad del 10 % con respecto a la porosidad total, en el cual no existirían limitantes para el funcionamiento físico-hídrico de los suelos. Sin embargo nuestros resultados demuestran que si bien la macroporosidad en Ag fue mayor al valor umbral, ha disminuido significativamente después de 13 años de uso agrícola con respecto al uso bajo LL.

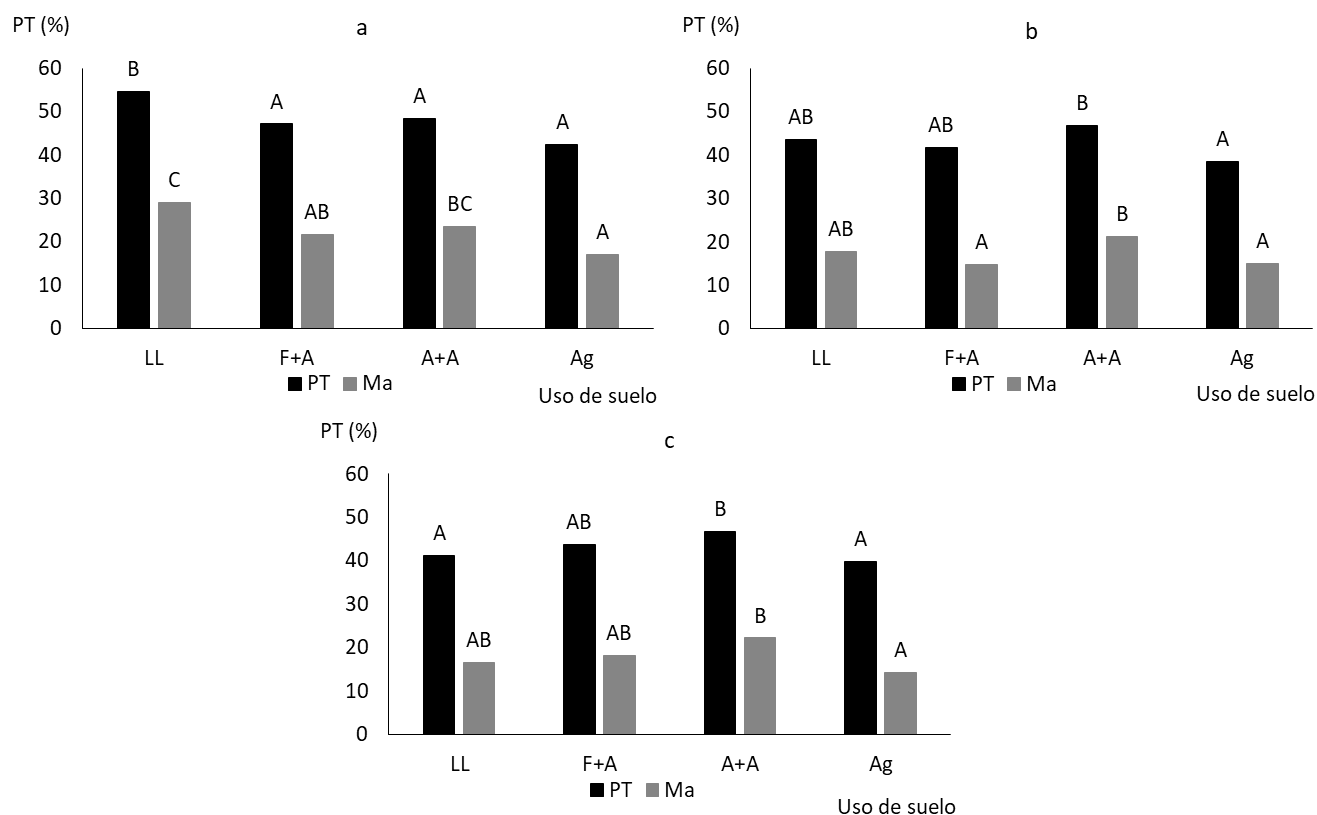


Figura 2: Porosidad total (PT) y Macroporosidad (Ma) en llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), alfalfa+agropiro (A+A) y agrícola (Ag), a (0-6), b (6-12) y c (12-18) cm de profundidad. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas

Los resultados obtenidos en los indicadores que reflejan la compactación del suelo se muestran en la Tabla 3. Para las condiciones bajo estudio, en las tres profundidades se encontró que si

bien los valores de la 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), 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 estadísticamente bajo el uso Ag con respecto a los demás usos. En este sentido se encontraron valores de 13, 14 y 20 % menos para los usos A+A, F+A y LL, respectivamente. En cambio, en las profundidades 6-12 y 12-18 la CR fue similar entre los usos de suelo y no se hallaron diferencias significativas. Los valores de CR entre 75-87% se corresponden con los valores de rendimientos máximos para varios cultivos, mientras que se ha documentado un valor umbral del 90 % por encima del cual se han registrado menores rendimientos de cultivo de trigo (Carter, 1990; Beutler *et al.*, 2005).

En este sentido bajo el uso Ag en 0-6 cm de profundidad la CR superó el 90 %, lo cual reflejaría condiciones no óptimas para el normal desarrollo de los cultivos, en cambio F+A, A+A y LL tuvieron valores inferiores al dicho umbral. Este mayor valor de la CR bajo uso Ag puede ser debido principalmente a menores contenidos de MO y MOJ como también al peso de la maquinaria y cantidad de pasadas de las máquinas, situación que se agudiza cuando los contenidos de humedad no son apropiados para dicha práctica.

Tabla 3: 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).

Manejo	CR (%)					
	0-6		6-12		12-18	
	LL	77,0	A	81,5	A	83,1
F+A	81,7	A	84,4	A	84,8	A
A+A	82,5	A	85,6	A	80,2	A
Ag	95,9	B	87,3	A	84,0	A
	DAM (g/cm ³)					
	0-6		6-12		12-18	
	LL	1,29	A	1,39	A	1,37
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 indican diferencias estadísticas significativas, entre usos de suelo en la misma profundidad.

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 3). Si bien ambas pasturas (A+A y F+A) presentaron valores intermedios entre LL y Ag, resultó interesante el suelo bajo A+A ya que fue el uso que tuvo los mayores valores de I Ac. En cuanto al suelo Ag se puede inferir que el manejo ha deteriorado el sistema poroso, por lo cual la infiltración fue considerablemente menor. La cantidad de agua que infiltró en los 90 min bajo en Ag fue 124 mm, mientras que en los demás usos, esa infiltración se registró a los 42, 30 y 22 min en F+A, A+A y LL, respectivamente. Esto pone de manifiesto que el suelo Ag ha sufrido cambios en el comportamiento hidráulico y que posiblemente podrían ser causados por la disminución de la PT y la macroporosidad tal como se planteó anteriormente.

La IB fue obtenida a los 15 min del comienzo de la medición en todos los usos de suelo. La misma se encontró entre $1,21 \text{ mm min}^{-1}$ para el suelo bajo Ag y $3,23 \text{ mm min}^{-1}$ para el uso LL, mientras que A+A ($2,51 \text{ mm min}^{-1}$) y F+A ($2,32 \text{ mm min}^{-1}$) tuvieron valores intermedios (Figura 4).

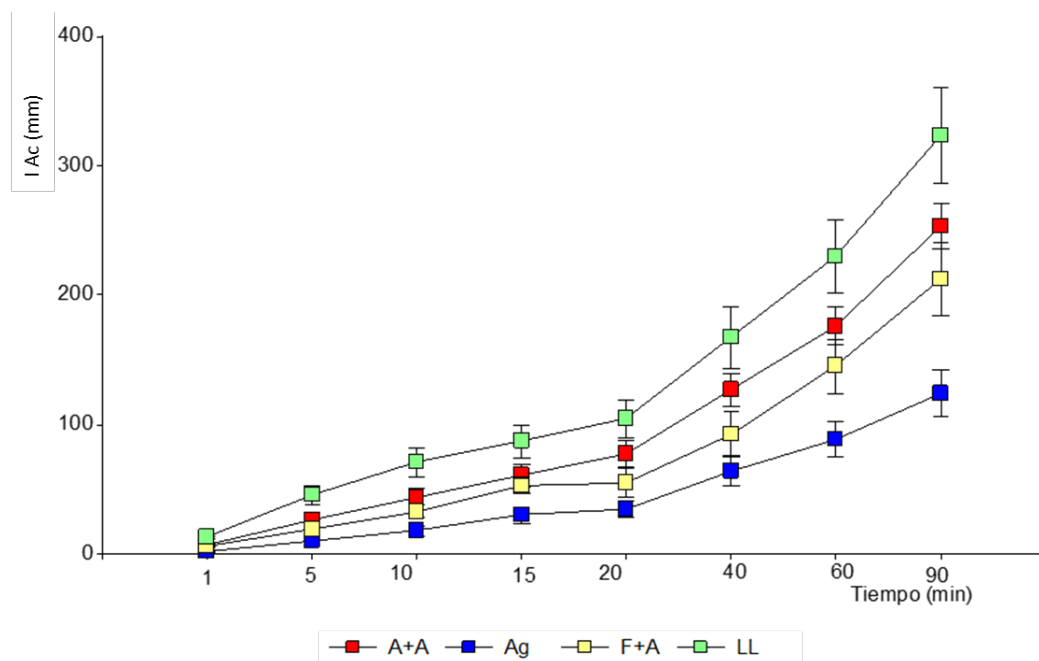


Figura 3: Infiltración acumulada (I Ac) en llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), alfalfa+agropiro (A+A) y agrícola (Ag).

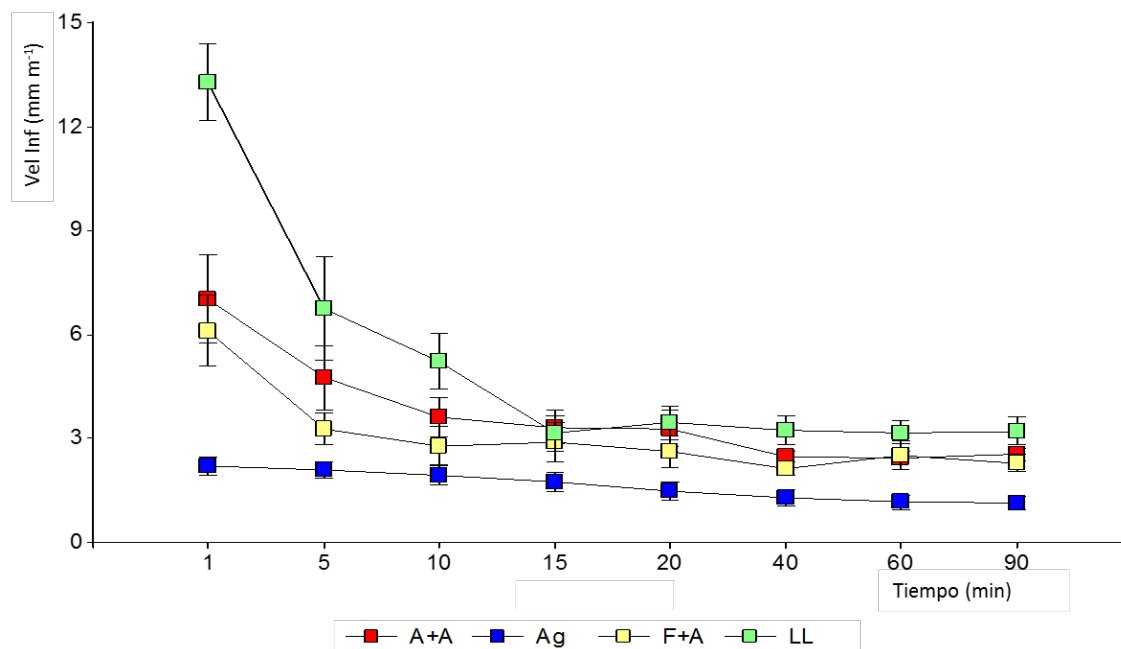


Figura 4: Velocidad de Infiltración (Vel Inf) en relación al tiempo transcurrido, para los distintos usos de suelo. Llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), y alfalfa+agropiro (A+A) y agrícola (Ag).

Los resultados obtenidos de resistencia a la penetración de los distintos usos de suelos se pueden observar en las Figuras 5, 6, 7 y 8. El suelo bajo LL no presentó variación de la RP con la variación del contenido de agua en el suelo en ninguna de las profundidades evaluadas (Figura 5 a, b, c, d). Los valores promedios para 0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm fueron 0,5, 0,5, 0,3 y 0,3 MPa, dentro del rango de contenido de agua del 8 al 28 %. Las valores de RP en función de los contenidos hídricos en los suelos de pasturas A+A y F+A presentaron pendientes de las curvas mayores que el uso LL. Los valores más altos de RP se encontraron en la profundidad de 10-20 cm que alcanzaron 1,9 MPa para A+A y 1,6 MPa para F+A (Figura 6 y 7).

Por el contrario, el suelo Ag tuvo mayor amplitud de los valores de RP con relación al contenido de agua, principalmente en 0-10 y 10-20 cm de suelo (Figura 8). En 0-10 cm de profundidad, se encontró como valor mínimo 0,3 MPa por encima del contenido de agua a CC y como valor

máximo de 2,8 MPa por debajo del contenido de agua a PMP, entre estas dos constantes hídricas los valores de RP se encontraron entre 0,5 y 1,5 MPa (Figura 8 a). Para 10-20 cm de profundidad se encontró como valor mínimo 0,5 MPa por encima del contenido de agua a CC y como valor máximo de 2,4 MPa por debajo del contenido de agua a PMP, entre estas dos constantes hídricas los valores de RP se encontraron entre 0,5 y 1,2 MPa (Figura 8 b). En las demás profundidades los valores de RP fueron menores (Figura 8 c y d).

La falta de relación entre la RP con el contenido de agua en suelo LL principalmente y en menor medida en F+A y A+A, podría estar relacionada al contenido de MO de los suelos, que le confiere mejor estabilidad del sistema poroso. Los valores de RP hallados bajo el uso Ag resultarían perjudiciales, debido a que superaron los valores críticos que causan disminución en el crecimiento radical (entre 1 a 1,7 MPa), y valores entre 3 a 4 MPa causarían una reducción del 90 % en el crecimiento de la raíz (Ehlers *et al.*, 1983; Hamblin, 1985).

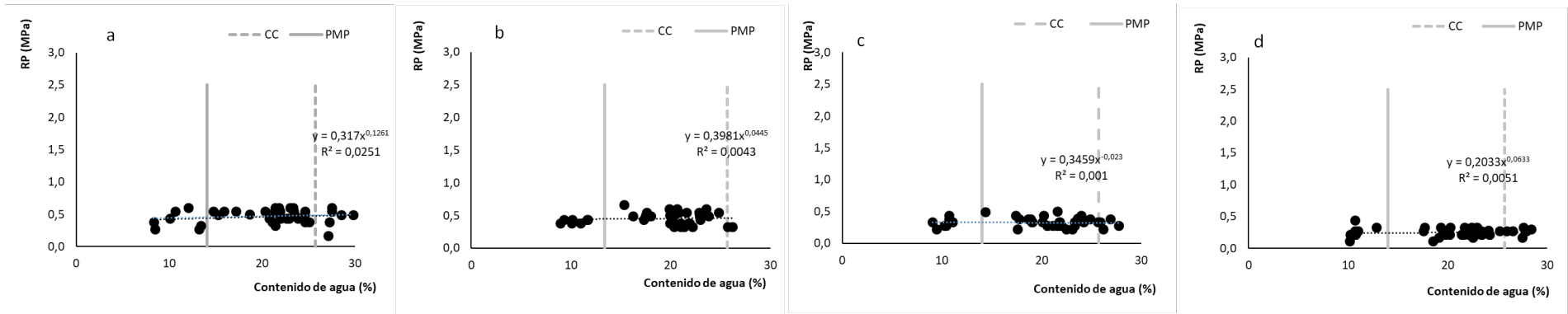


Figura 5: Resistencia a la Penetración (RP) en función al contenido de agua en Llorón, a) 0-10, b) 10-20, c) 20-30, d) 30-40 cm de profundidad. Constantes hídricas, Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP).

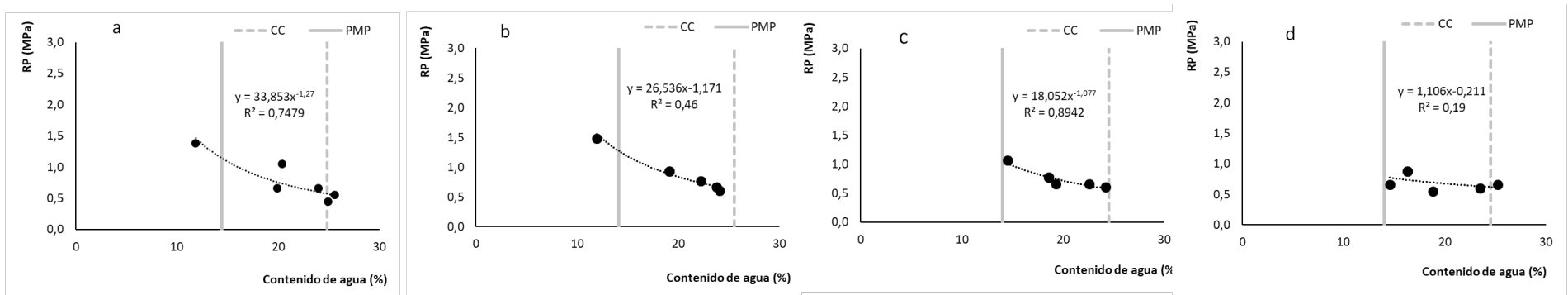


Figura 6: Resistencia a la Penetración (RP) en función al contenido de agua bajo el uso Festuca+Agropiro, a) 0-10, b) 10-20, c) 20-30, d) 30-40 cm de profundidad. Constantes hídricas, Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP).

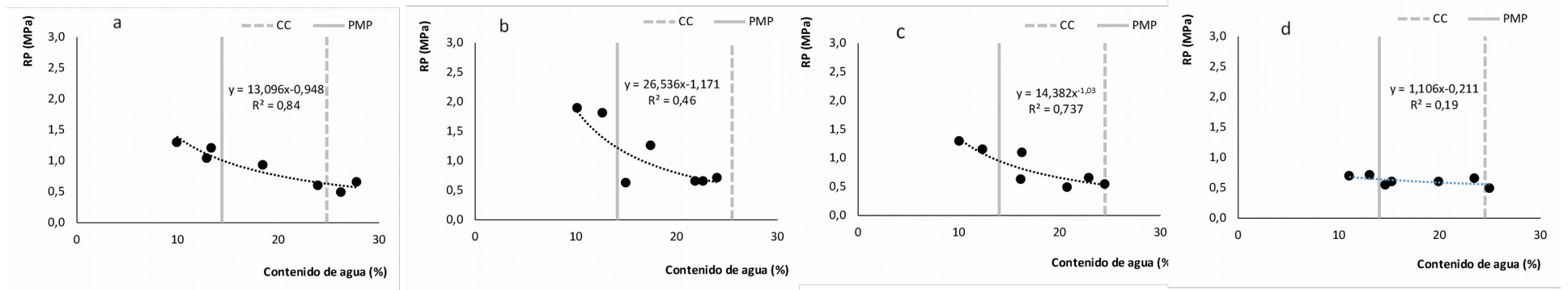


Figura 7: Resistencia a la Penetración (RP) en función al contenido de agua bajo el uso Agropiro+Alfalfa, a) 0-10, b) 10-20, c) 20-30, d) 30-40 cm de profundidad. Constantes hídricas, Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP).

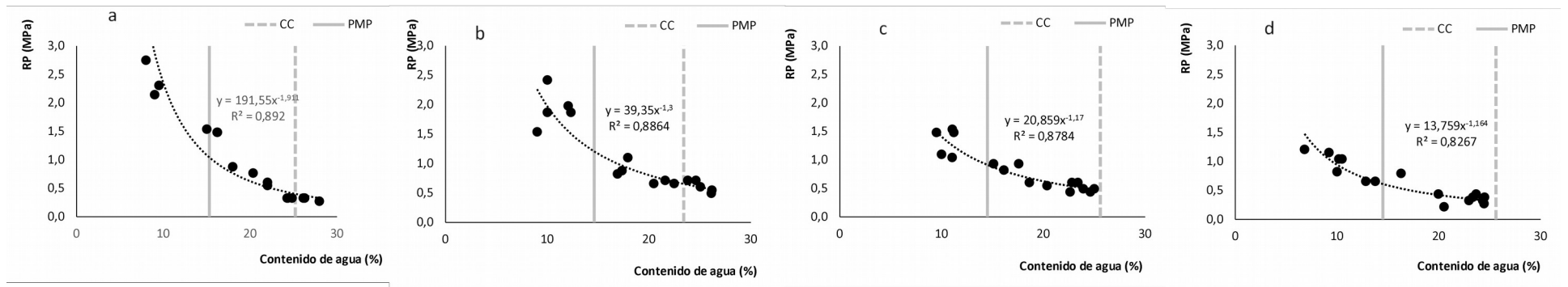


Figura 8: Resistencia a la Penetración (RP) en función al contenido de agua bajo el uso Agrícola, a) 0-10, b) 10-20, c) 20-30, d) 30-40 cm de profundidad. Constantes hídricas, Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP).

La biomasa de raíces de los diferentes usos de suelos se presenta en la Figura 9. En los primeros 20 cm de profundidad, el rango de raíces cuantificados se encontró entre 3500 a 13311 kg ha⁻¹, los usos bajo LL, F+A y A+A tuvieron mayor biomasa de raíces con respecto a Ag con diferencias estadísticas significativas. Desde los 40 hasta los 100 cm de profundidad la mayor cantidad de raíces fue hallada en A+A con diferencias significativas con respecto a los demás usos, no obstante estas diferencias resultaron menores a mayor profundidad. Con respecto a la distribución de las mismas hasta el metro de profundidad, la mayor proporción se encontraron en los primeros 20 cm (78, 70, 53, y 53 % para LL, F+A, A+A y Ag, respectivamente). Frasier *et al.*, (2019) encontró que entre el 47 y 82% de las raíces se estratificaron en los primeros 20 cm de profundidad.

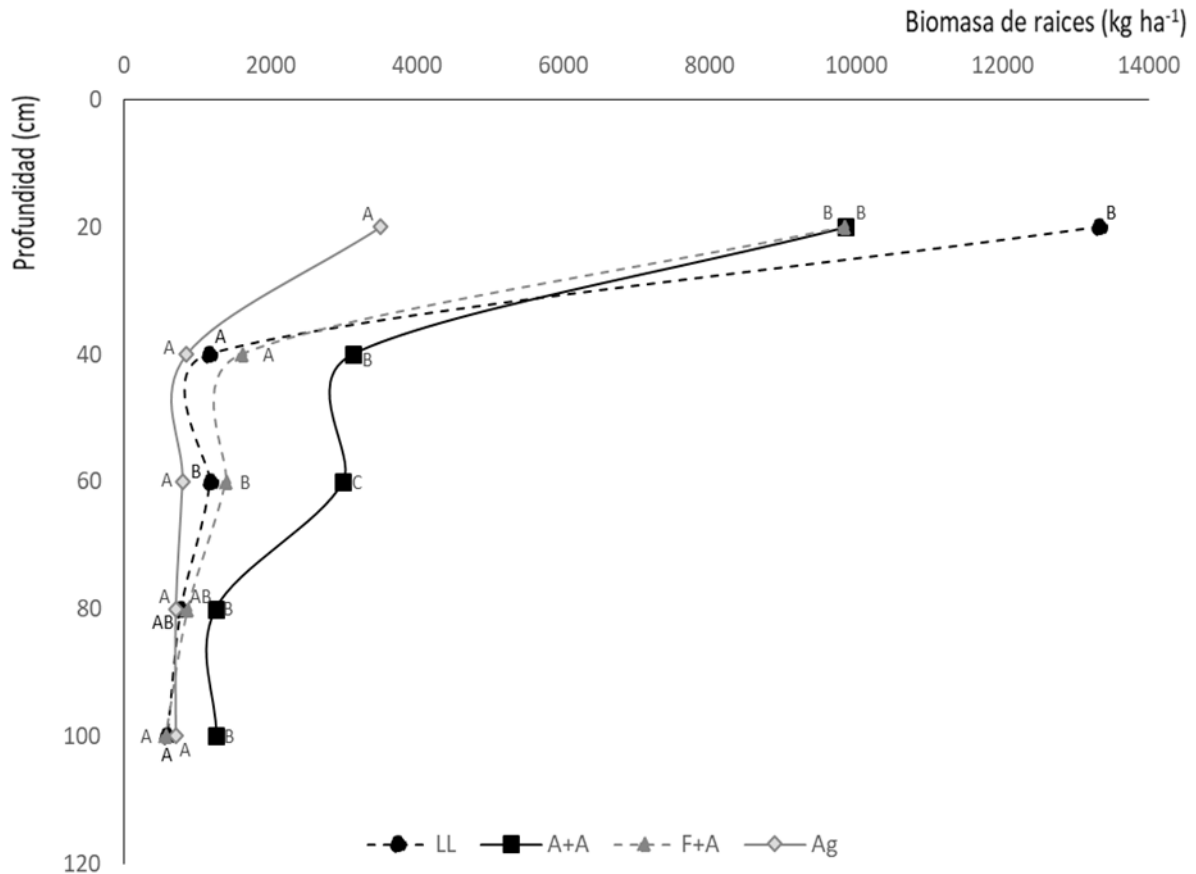


Figura 9: Distribución de biomasa de raíces en Pasto Llorón (LL), Agropiro+Alfalfa (A+A), Festuca+Agropiro (F+A) y Agrícola (Ag) hasta 100 cm de profundidad. Letras diferentes indican diferencias significativas entre usos de suelo en cada profundidad.

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, 1988). Los resultados de esta relación indicaron que F+A presentó mayor valor con respecto a A+A. Las relaciones obtenidas indicarían que por cada kilogramo de biomasa aérea, existe por debajo de la superficie del suelo entre 3 y 4 veces más del peso en raíces (Tabla 4). Estudios realizados en el Caldenal de la Región Semiárida Pampeana, sobre pastizales

naturales de *Stipa tenuis* y *Piptochaetium napostaense*, reportaron 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 concluyen 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, ésta relación responde a la disponibilidad de nutrientes, aumentando cuando existe una limitante en el suelo (Andrews *et al.*, 1999; Fageria & Moreira, 2011). Siguiendo con este concepto, la mayor relación encontrada en F+A podría ser atribuida a la limitación del nitrógeno edáfico, en cambio, en A+A 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, 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 se han reportado relaciones bajo usos de suelo con vegetación perenne/permanente que son significativamente mayores a los cultivos anuales, 5,1; 1,9; 4,2 y 1 para vegetación natural, pastura perenne y pastura permanente y agrícola (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, 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 los residuos sobre la superficie del suelo.

Tabla 4: Relación entre la biomasa de raíces hasta los 100 cm de profundidad (kg ha^{-1}) y biomasa aérea (kg ha^{-1}), en Llorón (LL), Festuca+Agropiro (F+A), y Agropiro+Alfalfa (A+A) y agrícola (Ag).

Relación Biomasa Raíz-Biomasa Aérea			
LL	F+A	A+A	Ag
4	4,1	2,9	0,35

La Figura 10 muestra la distribución de los sitios evaluados en el plano de las dos primeras componentes principales, comprobándose que todas 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 %, resultando en un total de 91,7% de la variabilidad total de los datos.

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, lo cual se podría inferir que presentarían características similares con respecto a las variables que definen los ejes (Raíces, Ma, PT, IB). Por otro lado, F+A y Ag se ubicaron en dos cuadrantes distintos y opuestos a A+A y LL, y entre ellos se diferenciaron con respecto a la componente principal

2. El suelo Ag se asoció positivamente a CR, DA, DAM y negativamente a IB, PT, Ma y raíces. Mientras que el suelo F+A se asoció positivamente con MOV, N y CC.

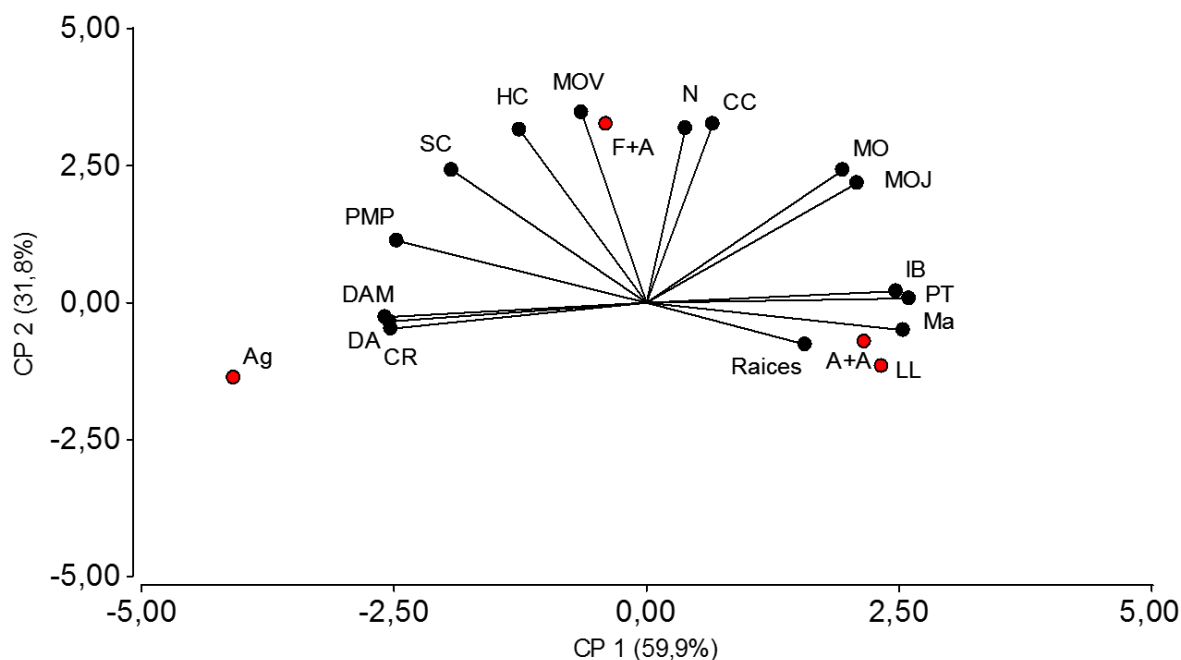


Figura 10: Análisis bi-plot de componentes principales (CP) en suelos bajo uso llorón (LL), festuca+agropiro (F+A), agropiro+alfalfa (A+A) y agrícola (Ag). Materia orgánica (MO), nitrógeno (N), materia orgánica joven (MOJ), materia orgánica vieja (MOV), porosidad total (PT), densidad aparente (DA), densidad aparente máxima (DAM), infiltración básica (IB), capacidad de campo (CC), macroporos (Ma), punto de marchitez permanente (PMP), densidad aparente máxima (DAM), humedad crítica (HC), susceptibilidad a la compactación (SC), compactación relativa (CR).

Con el objetivo de establecer relaciones entre indicadores físico-hídricos, en la Tabla 4 se presenta la matriz de correlación entre los mismos. Se pudo comprobar que la MO se correlaciona positivamente con la MOJ ($r=1$), PT ($r=0,75$), IB ($r=0,73$), CC ($r=0,78$), Ma ($r=0,63$) y en menor medida con raíces. La disminución en la PT a causa del uso implicó un aumento en la DA ($r=-0,93$), DAM ($r=-1$), SC ($-0,70$). Sin embargo, los poros más

susceptibles a los 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 estructural 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, principalmente en la conectividad de los poros, dando como resultado relaciones positivas entre raíces con PT ($r= 0,69$), y aun mejores relaciones con los Ma ($r=0,76$). Se ha reportado que las raíces tienen un crecimiento disminuido en suelos densificados/compactados (Clark *et al.*, 2003) debido a la dificultad de penetrar y desplazar el suelo a fin de generar nuevos poros. Lo expuesto se puede ver reflejado en las correlaciones negativas encontradas entre la biomasa de raíces con indicadores de compactación de suelo, como DAM ($r=-0,70$) y SC ($r=-0,52$).

Las rotaciones de cultivos son 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 la profundidad de suelo, se pueden crear poros estables, que al descomponerse las raíces formen bioporos abiertos, los cuales pueden ser empleados por las raíces de cultivos posteriores. Esta perforación biológica (Gregory *et al.*, 2006) se encuentra dependiente de los cultivos que integran la rotación. Algunos reportes indican que la formación de bioporos es menor en rotaciones de oleaginosas y

leguminosas anuales con respecto a cultivos perennes como la alfalfa (Torres-Guerrero et al., 2013; Rasse & Smucker, 1998), 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) remarcan 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. El suelo bajo uso LL es considerado condición de referencia, debido a que representa un suelo en un óptimo estado de conservación (Fernández, 2018). Debido a ello, se propuso considerar a los valores promedios de los indicadores como una aproximación a los valores de línea de base de indicadores físico-hídricos para los suelos francos de la Región Semiárida Pampeana y se consideró el valor de cada indicador como valor relativo al uso LL (100%). Los valores relativos de todos los indicadores evaluados de las dos pasturas perennes (F+A y A+A), se encontraron más próximos a los valores de LL que al uso Ag. En este sentido se pudo afirmar que los indicadores físico-hídricos se aproximaron al planteo mixto de rotación, pero particularmente la pastura A+A fue la que más próxima se encontró a la situación de referencia. La cantidad de raíces superó en el primer metro de profundidad a la encontrada en LL, y los contenidos de MOJ después de 5 años de producción fueron similares en ambos usos.

Estos resultados indicarían que sistemas mixtos de rotaciones con pasturas perennes, y más aún si incluyen especies leguminosas, podrían mantener condiciones muy favorables de fertilidad física y biológica del suelo. Esto podría el resultado del constante aporte de material a lo largo del tiempo y de la acción física directa de los sistemas radicales generalmente densos de las pasturas, generan condiciones adecuadas para la acumulación de carbono en el suelo (Studdert, 2017).

El uso Ag se encontró muy alejado de la situación de la línea de base (LL), principalmente en la cantidad de raíces, MO, MOJ, Ma e infiltración. Resulta preocupante la información generada, ya que reflejaría la pérdida en captación del agua de lluvia para ser usada por los cultivos. Además se agrava aún esta problemática debido a que el suelo en estudio se encuentra en la región semiárida, donde las precipitaciones no logran cubrir normalmente el uso consuntivo de los cultivos, constituyendo la principal limitante de los sistemas de producción.

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).

	MO	MOJ	DA	PT	Ma	CR	DAM	I Ac	I B	Raice
										s
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 (I B).

La inclusión de pasturas en la rotación y el uso agrícola-ganadero de los suelos es una práctica que puede ser recomendada como forma de recomponer los atributos de la calidad del suelo y compatibilizar la producción con la calidad ambiental (Lemaire *et al.*, 2014). A fin de evaluar el efecto de las pasturas en la rotación mixta sobre los contenidos de materia orgánica a través del tiempo y poder comparar con los demás usos, se presentan los contenidos de la misma entre el año 2012 y 2015 (Figura 11 y 12). Los resultados reflejaron que el uso del suelo condicionó los contenidos de MO y MOJ en 0-10 cm de profundidad (Figura 11 a).

Al momento de la siembra de las pasturas (2012), el contenido de MO se encontró en 2,45 %, luego de 5 años de producción el contenido de MO 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 para la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios.

Resultados diferentes se encontraron para el suelo bajo el uso Ag, ya que mantuvo los contenidos de MO en 2,57 % luego de los cinco años (2012-2018). El uso bajo LL también mantuvo los contenidos de MO durante el periodo estudiado en 3 %. 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 almacenamiento y el uso del agua por parte de 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.

Resultados similares se obtuvieron luego de los 5 años con respecto a la MOJ. Los usos Ag y LL mantuvieron el nivel en 0,82 y 1,35 % respectivamente. Mientras que las pasturas consociadas, al cabo de 5 años, aumentaron los contenidos de MOJ los cuales fueron similares al uso LL.

Para los 10-20 cm de profundidad tanto la MO como MOJ se mantuvieron relativamente estables en los cuatro usos dentro del periodo evaluado (Figura 12 a y b).

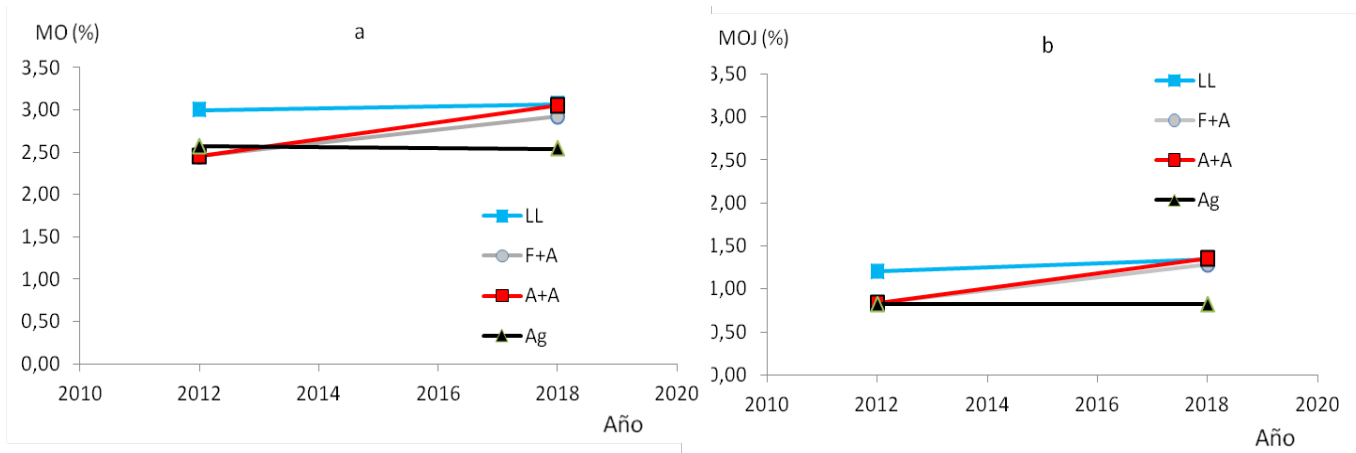


Figura 11: a) Materia orgánica total (MO) y b) Materia orgánica joven (MOJ) desde el año 2012 hasta el 2018 para los distintos usos de suelo: Llorón (LL), Festuca+Agropiro (F+A), Agropiro+Alfalfa (A+A) y Agrícola (Ag) en 0-10 cm de profundidad.

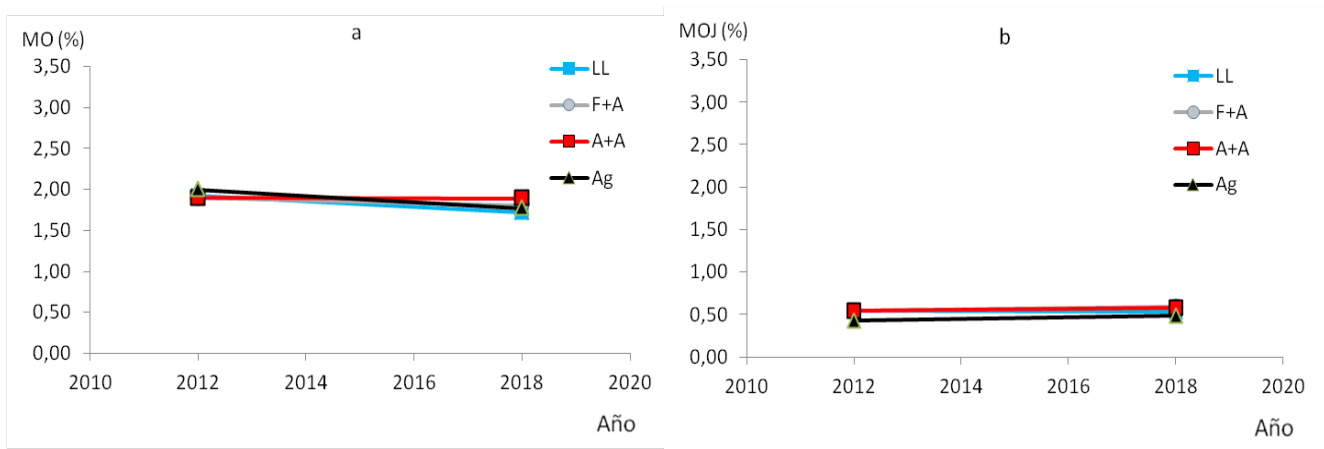


Figura 12: a) Materia orgánica total (MO) y b) Materia orgánica joven (MOJ) desde el año 2012 hasta el 2018 para los distintos usos de suelo: Llorón (LL), Festuca+Agropiro (F+A), Agropiro+Alfalfa (A+A) y Agrícola (Ag) en 10-20 cm de profundidad.

Conclusiones

El trabajo confirma el efecto benéfico de incluir pasturas perennes en la rotación sobre indicadores físico-hídricos y sobre los contenidos de materia orgánica y sus fracciones.

Los valores de los indicadores en pasturas perennes se aproximaron al suelo considerado como línea de base o de referencia (LL), aunque la pastura compuesta por leguminosa y gramínea (A+A) fue la que más se aproximó a la situación de referencia. No obstante se encontró una estratificación importante en los primeros 6 cm de profundidad con respecto a mayores profundidades donde el valor de los indicadores se encuentra más próximos entre los diferentes usos de suelo.

Asociado con la disminución en los contenidos de materia orgánica se estarían produciendo cambios a nivel de macroporosidad, el suelo Ag tuvo menor macroporosidad con respecto a los suelos LL, F+A y A+A. Los cultivos anuales no son suficientemente efectivos en mantener y o formar macroporos comparados con los usos en pasturas perennes y permanentes. Uno de los indicadores más afectado fue la infiltración de agua en el suelo, que se redujo ampliamente luego de tan solo 13 años de agricultura.

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.
- Asgarzadeh, H; M Mosaddeghi; A Mahboubi; A Nosrati & A Dexter. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil* 335: 229–244.
- Beutler, A; J Centurion & A Silva. 2005. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48, 863–871.
- Blake, G & K Hartge. 1986. Bulk density. En: *Methods of Soil Analysis-Physical and Mineralogical Methods* 2ne ed. (Ed. Klute, A) Am. Soc. Agron. Madison, USA. 363-375.
- Blanco-Canqui H & Ruis S.J. 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326, 164–200.
- Bono, A; R Alvarez; D Buschiazzi & R Cantet. 2008. Tillage Effects on Soil Carbon Balance in a Semiarid Agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J* 72: 1140–1149.
- Brown S & A Lugo. 1990. Effects of forest clearing and succession of the carbon and nitrogen content of soils in Puerto Rico and US Virgin Islands. *Plant Soil* 124: 53-64.

- 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 C.A & 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, L. J, W. R. Whalley, and P. B. 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 Czyż & O Gaę. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Till. Res.* 93: 412-419.
- Di Rienzo J.A, 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 M.E, J.A Galantini, J.M Martínez & J.O Iglesias. 2016. Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico 34: 197-209.
- 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
- Elliott, E. 1986. Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627-633.
- Fageria, N & A Moreira. 2011. The Role of Mineral Nutrition on Root Growth of Crop Plants. In: DL Sparks (ed.). *Advances in Agronomy*. Vol. 110. 1er ed. Pp. 251-331. Academic Press
- Fernández P, J Luque & J Paoloni. 1 971. Análisis de la Infiltración y su aplicación para diseño de riego en el valle inferior del Río Colorado. Publicación Nº 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 TillRes.* 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.
- Franzluebber 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.
- Galizzi, F; C González; M Elías Tissera; M Sánchez; H Cáceres Romero; A Azar & F Cosci. 2018. Cambios en propiedades edáficas por el uso del suelo en el sudeste de Santiago del Estero. *Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo 2018, C1P25*, Pág. 95. Tucumán.
- 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.
- Hamblin, A. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95-158.
- Hamza, M & W Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121–145.
- Hollinger S.E, C.J Bernacchi & Meyers T.P., 2005. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States. *Agric. For. Meteorol.* 130: 59–69. .
- 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.
- Imhoff, S; A Pires; P Ghiberto & C Tormena. 2016. Physical Quality Indicators and Mechanical Behavior of Agricultural Soils of Argentina 1–21. doi:10.1371/journal.pone.0153827.
- 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.
- Kay, B; A Da Silva & J Baldock. 1997. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Can. J. Soil Sci.* 77: 655-667.
- 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., Gastal, F., Franzluebbers, A., Chabbi, A., 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. & Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116, 107–136.
- Logsdon, S & D Karlen. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil Till. Res.* 78: 143–149.
- 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.

- Moran C, A Koppi, B Murphy & A McBratney. 1988. Comparison of the macropore structure of a sandy loam surface soil horizon subjected to two tillage treatments. *Soil Use Manage.* 4: 96–102.
- 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.
- 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 Influence of Use of Soil on Physical Indicators Compaction 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 ed. 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.
- Rasse, D. P. and A. J. M. 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. *Ensayos de Larga Duración en Argentina: Un aporte al logro de Sistemas Agrícolas sustentables.* Ed Salvagiotti F, Kruger H y G Studdert. 235:266.
- 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 Semiarid Savanna Soils of La Pampa, Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1541–1546.