

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ESTADO ESTRUCTURAL DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS
PASTORILES**

por

Álvaro Gastón De LEÓN PEREIRA

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
opción Suelos y Aguas

MONTEVIDEO
URUGUAY
(Julio 2018)

Tesis aprobada por el tribunal integrado por la Ing. Agr. (PhD) María Carolina Sasal, Ing. Agr. Oswaldo Ernst e Ing. Agr. (PhD) José Terra, el 26 de julio del año 2018. Autor: Ing. Agr. Álvaro Gastón de León Pereira. Director Ing. Agr. (PhD) Mario Pérez Bidegain.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

Mario Pérez Bidegain por orientar mi maestría y ser guía constante en este proceso.

A Carolina Sasal, por su disponibilidad, enseñanzas y aportes a este trabajo.

A Oswaldo Ernst y José Terra por sus aportes a la construcción del proyecto de tesis, por la disponibilidad para el uso de las rotaciones y por la corrección de este manuscrito.

A Alfredo Silva y a Fernando García por las enseñanzas brindadas en tantos años de docencia en el Centro Universitario Región Este.

Al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria y a la Estación Experimental Mario A. Cassinoni por brindarme las instalaciones necesarias por el desarrollo del proyecto de tesis.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA Paraná) por brindarme las instalaciones necesarias para el desarrollo de prácticas de laboratorio.

A los compañeros del Centro Universitario Región Este.

A mi familia, en especial a Pedro y Amparo

A los amigos de siempre, especialmente al bunker por la ayuda brindaba.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
<u>1 INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>1</u>
1.1 EVOLUCIÓN DE LA AGRICULTURA EN URUGUAY.....	1
1.2 EFECTOS DE LA SIEMBRA DIRECTA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO.....	1
1.3 CALIDAD FÍSICA DEL SUELO Y EL AGROECOSISTEMA.....	2
1.4 INDICADORES DE LA CALIDAD FÍSICA DEL SUELO.....	3
1.4.1 <u>el método del Perfil Cultural</u>	3
1.4.1.1 características de las estructuras.....	4
1.4.1.2 evolución de las estructuras.....	5
1.4.2 <u>análisis radicular</u>	6
1.4.3 <u>resistencia al Corte</u>	6
1.4.4 <u>sistema poroso</u>	7
1.5 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	7
<u>2 ESTADO ESTRUCTURAL DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS PASTORILES.....</u>	<u>8</u>
2.1 RESUMEN.....	8
2.2 SUMMARY.....	9
2.3 INTRODUCCIÓN.....	10
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
2.4.1 <u>descripción del sitio y tratamientos</u>	12
2.4.2 <u>características del área de muestreo</u>	14
2.4.3 <u>muestreo y análisis</u>	14
2.4.3.1 sistema radicular.....	14
2.4.3.2 perfil cultural.....	15
2.4.3.3 resistencia al corte.....	16

2.4.3.4 sistema poroso.....	16
2.4.4 <u>análisis estadístico</u>	17
2.5 RESULTADOS.....	18
2.5.1 <u>sistema radicular</u>	18
2.5.1.1 proporción de raíces en el perfil.....	18
2.5.1.2 distribución espacial de las raíces.....	19
2.5.2 <u>descripción de la estructuras a través del perfil cultural</u>	20
2.5.3 <u>resistencia al corte</u>	23
2.5.3.1 resistencia al corte por tratamiento.....	23
2.5.3.2 resistencia al corte por estructura.....	24
2.5.4 <u>sistema poroso</u>	25
2.5.4.1 densidad Aparente.....	25
2.5.4.2 componentes de la porosidad total.....	26
2.6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	27
2.7 BIBLIOGRAFÍA.....	31
3 <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	36
3.1 SISTEMA RADICULAR.....	36
3.2 PERFIL CULTURAL.....	37
3.3 RESISTENCIA AL CORTE.....	38
3.4 SISTEMA POROSO.....	39
4 <u>CONCLUSIONES</u>	40
5 <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	41

RESUMEN

Se evaluó la estructura del suelo en sistemas de rotación agrícolas-pastoriles para un Argiudol Abrúptico y en un sistema agrícola para un Argiudol Típico. Aplicando la metodología del Perfil Cultural (PC) se determinó la proporción de estructuras en el perfil del suelo asociadas al uso y manejo. El objetivo fue determinar el estado estructural del suelo en distintos sistemas de rotación. Se determinó la resistencia al corte (RC) y la proporción de raíces (R). Se caracterizó el sistema poroso a través de la Densidad aparente (Dap), y las Porosidades: total (P_{tot}), estructural (P_{est.}) y textural (P_{text.}). Las estructuras también se clasificaron según el origen principal de los macroporos: por expansión-contracción como principal fuente de macroporosidad visible (b₁) y por actividad biológica como principal origen de macroporos (b₂). La metodología del PC sirvió para caracterizar distintas estructuras que presentaron diferencias en el estado interno de los agregados (porosidad) así como su arreglo espacial en el perfil del suelo. Esto permitió identificar áreas de mayor cohesión a nivel superficial y subsuperficial. En los sistemas que prevalecieron los cultivos por sobre las pasturas, el origen de la macroporosidad fue básicamente por el efecto expansión-contracción. En los sistemas donde hubo pasturas el origen principal de la macroporosidad estuvo mayormente asociado a la actividad biológica. Las estructuras de mayor cohesión y menor porosidad (Δ), se presentaron en todos los tratamientos y siempre asociadas al tráfico, sin embargo, la generación de porosidad por la actividad biológica en dichas estructuras fue mayor en los sistemas con pasturas. La estructura tipo Φ , caracterizada por el desarrollo de porosidad por expansión y contracción del suelo, se evidenció en mayor proporción en todos los tratamientos. En sistemas de agricultura continua en suelos franco arcillosos se verificó la aparición de estructuras de tipo laminar (P). La RC mostró diferencias significativas en las estructuras, siendo las Δ más resistentes al esfuerzo cortante. El sistema radicular mostró una mayor proporción de raíces en los sistemas pastoriles y asociado a una mayor actividad biológica. El sistema de cultivo continuo presentó valores mayores de Dap que los sistemas con pasturas. Se determinó la P_{est.} para todos los tratamientos no encontrándose diferencias. La P_{text.} fue constante en el suelo. La metodología del PC sirvió para clasificar estructuras con distintos grados de compactación.

Palabras clave: Perfil cultural, raíces, compactación, resistencia al corte, porosidad.

SUMMARY

The soil structure was evaluated in agricultural-pastoral rotation systems for an Abruptic Argiudol and in an agricultural system for a Typical Argiudol. Our objective was to determine the structural state of the soil in different crop-pasture systems. We measured shear strength (SS) and the proportion of roots (R). The porous system was characterized through the apparent density (D_{ap}), and the Porosities: total (P_{tot}), structural ($P_{est.}$) and textural ($P_{text.}$). Soil structures were also classified according to the main origin of the macropores: expansion- contraction (b1) or biological activity (b2). The CP methodology allowed us to characterize structures that presented differences in the internal state of the aggregates (porosity), as well as their spatial arrangement in the soil profile. Furthermore, we were able to identify areas of larger cohesion at the surface and subsurface levels. In those systems where crops prevailed over pastures, macroporosity was originated by the expansion-contraction effect. In contrast, when pastures prevailed the macroporosity was mostly associated to biological activity. The structures of greater cohesion and lower porosity (Δ), were present in all treatments and associated with traffic. However, the generation of porosity by biological activity in these structures was greater in systems with pastures. The Φ structure, characterized by the development of porosity by expansion and contraction of the soil, was evidenced in greater proportion in all treatments. In systems of continuous agriculture in loamy clay soils, the presence of structures of laminar type (P) was verified. The SS showed significant differences in the structures, the Δ being more resistant to the shear stress of a manual test. The root system showed a higher proportion of roots in pasture systems and associated with a higher biological activity. The continuous crop system had higher D_{ap} values than systems with pastures. No difference was found between systems in $P_{est.}$ The $P_{text.}$ was constant on the ground. The CP methodology allowed us to classify structures of different degrees of compaction.

Key words: Cultural profile, roots, compaction, cut resistance, porosity.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 EVOLUCIÓN DE LA AGRICULTURA EN URUGUAY

En los últimos 25 años el principal cambio tecnológico en la agricultura uruguaya fue la introducción de la siembra directa. Con el ingreso de dicha tecnología y la incorporación de nuevos materiales genéticos, la agricultura uruguaya incrementó su superficie de 350.000 ha a más de 1 millón de ha en 10 años (Ernst y Siri-Prieto 2013). En particular, el aumento del área se dio a partir del cultivo de soja el cual alcanzó el 61% de los cultivos agrícolas (DIEA 2015). La incorporación de la siembra directa minimizó notoriamente las tasas de erosión de los suelos agrícolas (García 2004, Terra y García 2001) mitigando así un problema ambiental de larga data en la agricultura uruguaya. Sin embargo, existe la percepción de que la calidad física del suelo se ha deteriorado por un aumento en la compactación de los primeros centímetros del suelo que afectan al sistema radicular de los cultivos y al ingreso de agua al perfil del suelo por infiltración. Los procesos de compactación, y otros efectos de la siembra directa, son procesos relativamente lentos que se acumulan en el tiempo, por lo cual la detección y el manejo de los mismos es fundamental para el uso sostenible del recurso suelo.

1.2 EFECTOS DE LA SIEMBRA DIRECTA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO.

La evolución de la estructura del suelo está asociada a factores naturales y antrópicos. Estos últimos están vinculados principalmente al manejo de los cultivos y los animales. El tipo e intensidad de laboreo, las especies cultivadas y el contenido hídrico son las variables determinantes en los cambios y en el desarrollo de distintas estructuras en el perfil del suelo (Hamza y Anderson, 2003). El manejo de dichas variables modifica el estado estructural del suelo a mediano y largo plazo. Tanto en sistemas de labranza convencional (Roger-Estrade et al. 2004, Boizard et al. 2002) como en sistemas de siembra directa (Boizard et al. 2017, 2013) los cambios a nivel estructural pueden ser evidenciados a través de análisis visuales o a través de la cuantificación de distintos parámetros físicos. Sin embargo, la siembra directa no siempre modifica la estructura del suelo en magnitudes que puedan ser detectadas por los indicadores de calidad física de suelos (De Moraes et al. 2016, Moreira et al. 2016).

Tanto a nivel internacional (Boizard et al 2017, 2013, Peigné 2013) como regional (Sasal et al. 2017a, 2017b, 2010, 2006, Alvarez et al. 2014, Sasal 2003, Taboada et al. 1998) se ha evidenciado a través de metodologías de apreciación visual que los efectos acumulativos de la siembra directa tienden a disminuir la calidad física del suelo. La compactación a nivel superficial y subsuperficial se ha descrito como estructuras en el perfil del suelo, donde la cohesión entre las partículas y la escasa porosidad son evidentes a simple vista. Al mismo tiempo, a dichas estructuras se les ha aplicado una serie de indicadores físicos que complementan la información y ayudan a detectar los cambios en tiempo de las estructuras.

La compactación es el proceso por el cual los constituyentes del suelo son reorganizados disminuyendo así el espacio poroso y aumentando la densidad aparente (Soil Science Society of America, 1996). La magnitud de la compactación está afectada por el tipo de suelo, las condiciones climáticas, y el manejo (Hamza y Anderson, 2003). La compactación superficial y subsuperficial junto a la aparición de estructuras laminares han sido reportadas por diversos autores a nivel regional (Sasal et al. 2017a, 2017b, 2010, 2006, Sasal 2003).

1.3 CALIDAD FÍSICA DEL SUELO Y EL AGROECOSISTEMA

La calidad física del suelo es determinante del buen funcionamiento del agroecosistema. El sistema poroso y la estructura son variables que influyen directamente en la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el perfil del suelo. El rol de la materia orgánica es de suma importancia para ambas variables (Brady y Weill, 2008). Por lo tanto, la simplificación de los sistemas radiculares, basados en monocultivos y la alta presión de la maquinaria sobre la superficie del suelo generan a mediano y largo plazo estructuras desfavorables para el crecimiento vegetal (Draghi et al. 2015). Los efectos acumulativos de la compactación sobre el suelo en sistemas con siembra directa pueden generar disminución en los rendimientos de los cultivos e impactar negativamente en el ambiente al modificar el ciclo hidrológico por una mayor escorrentía, provocada por una menor infiltración por la compactación sub-superficial (Sasal et al, 2017a). Metodologías basadas en la apreciación visual del perfil del suelo (Sasal et al. 2010, 2006) han evidenciado que las modificaciones en la estructura del suelo en los sistemas de cultivos en siembra directa pueden generar

cambios en el ciclo hidrológico, en relación a las pasturas, que afectan negativamente a la infiltración aumentando de esta manera el escurrimiento, disminuyendo la disponibilidad de agua para los cultivos. Un mayor escurrimiento superficial también implica mayor riesgo de erosión y mayor cantidad de sedimentos trasladados hacia las zonas bajas del paisaje agravado aún más por el efecto del transporte de nutrientes.

1.4. INDICADORES DE LA CALIDAD FÍSICA DEL SUELO.

1.4.1 El método del Perfil Cultural

Existen distintas metodologías semicuantitativas para el estudio de la calidad física del suelo. Dichas metodologías se basan en la clasificación de las estructuras que se forman a nivel superficial y subsuperficial en el perfil del suelo y que están asociadas directamente al clima y a los factores antrópicos. Una de estas metodologías es la llamada perfil cultural (PC), la misma fue desarrollada por Gautronneau y Manichon (1987) en base a los conceptos de Henin et al. (1969) y ha sido base de numerosos estudios sobre calidad física de suelos. La metodología del PC parte del reconocimiento de distintas estructuras que son formadas tanto por factores naturales como por el uso y manejo del suelo, diferenciándose así de las metodologías de clasificación de suelos por características genéticas. Al mismo tiempo profundiza en los conceptos de la evolución de las estructuras del suelo, especialmente en las de origen antrópico y es una herramienta válida para prever cómo se comportará el suelo con determinado manejo o secuencia de cultivos.

El método original identifica distintos tipos de estructuras en el suelo asociadas al laboreo convencional y al efecto del clima sobre el mismo. Sin embargo, los cambios en las herramientas tecnológicas, principalmente la incorporación de la siembra directa en los sistemas agrícolas provocaron ajustes en la metodología original. Estos van desde la teorización del origen de las estructuras, hasta la creación de nuevas estructuras asociadas específicamente a los sistemas de siembra directa que permitan evaluar los cambios en el tiempo (Boizard et al. 2017, 2013, 2012 Sasal et al. 2017a, 2017b, Sasal 2003). Por las características de la metodología, la misma puede ser aplicada con fines experimentales en situaciones controladas de uso y manejo, pero también es suficientemente robusta para ser utilizada como herramienta de diagnóstico de calidad de suelo a nivel predial.

1.4.1.1 Características de las estructuras

Las estructuras se clasifican de acuerdo al estado interno de los agregados y a la forma en que los mismos se ensamblan en el perfil del suelo (Roger-Estrade et al, 2004). En la primera clasificación se distinguen tres estados principales: 1) Las estructuras tipo Γ (gamma) son estructuras con porosidad visible entre agregados constitutivos y representa la situación menos compacta y más favorables desde el punto de vista de los cultivos. 2) La estructura tipo Δ (delta) se caracteriza por presentar agregados compactos, con estructura masiva, ausencia de porosidad visible, elevada cohesión y con caras de ruptura lisas. En sistemas de siembra directa también se ha evidenciado macroporosidad asociada a la actividad biológica en las estructuras tipo Δ (Boizard et al, 2017). Esta estructura representa la situación más compacta y por lo tanto menos favorable para el desarrollo de los cultivos. 3) La estructura tipo Φ (phi) se caracteriza por formarse a partir de agregados tipo Δ por la generación de macroporosidad por factores abióticos (expansión contracción). En trabajos más recientes se ha definido un tipo especial de estructura llamada "Platy" (P) la cual tiene la característica particular de presentar la porosidad dispuesta horizontalmente (Boizard et al. 2013, Sasal et al. 2006). La estructura tipo P se ha observado en extensas regiones del norte de la pampa húmeda (Sasal et al. 2017a). En ese sentido y teniendo en cuenta la similitud de los sistemas agrícolas de la región, surge la importancia sobre la posible aparición de la estructura tipo P en los sistemas agrícolas uruguayos.

En cuanto a la forma en que se ensamblan los agregados también se distinguen tres situaciones. La estructura tipo "o" se caracteriza por ser altamente fragmentada, con pequeños agregados y dominio de fracciones finas. Los agregados tipo "b" son mayores a 10cm, con porosidad visible, y menor dominio de fracciones finas (asociado a la labranza convencional) y por el último los agregados tipo "c" donde no se distinguen agregados claramente y el suelo posee características masivas (asociado a la siembra directa).

La caracterización de la macroporosidad según origen, se basa en la fuente principal de creación de macroporos que se aprecian a simple vista. Cuando la mayor proporción de poros está asociado a la expansión-contracción del suelo y a los macroporos tubulares generados por las raíces se le denomina b1. Cuando la principal proporción de macroporos se relacionan con la actividad biológica de la fauna del suelo, como ser las cámaras, canalículos y desechos en general a la estructura se la denomina b2.

1.4.1.2 Evolución de las estructuras

La figura 1 muestra un esquema teórico descrito por Boizard et al. (2017) en que se visualizan las posibles vías de formación de distintos tipos de estructuras.

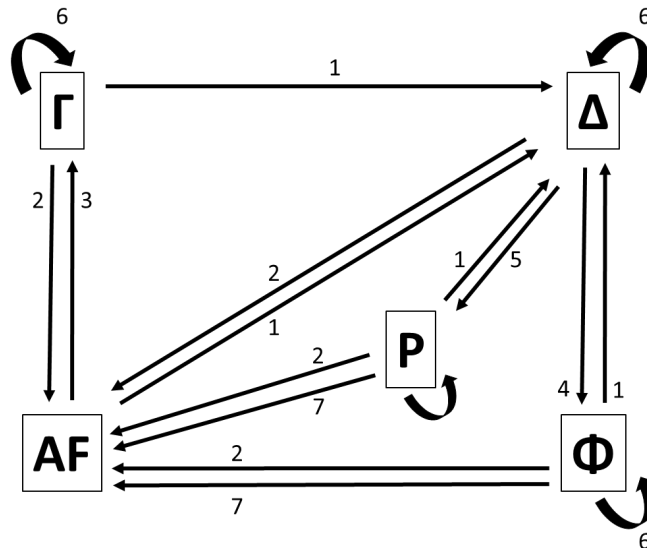


Figura N° 1. Modelo teórico de los cambios de porosidad a través del tiempo (Adaptado de Boizard et al. 2017). 1 – Compactación severa. 2 – Fragmentación por Laboreo. 3 – Aglomeración por actividad biológica y materia orgánica. 4 – Transformación por fracturas por condiciones climáticas (expansión-contracción). 5 – Transformación por fracturas horizontales en la superficie del suelo compactada. 6 – Fluctuaciones por las condiciones climáticas y el efecto de la actividad biológica. 7 – Transformación por efecto de las condiciones climáticas y la actividad biológica.

En el esquema teórico, la compactación severa (1) conlleva a la formación de estructuras tipo Δ las cuales por definición son compactas. Dicha estructura cuando es modificada tanto por factores bióticos como abióticos cambia su estado interno. Cuando la modificación es por fragmentación por laboreo (2) el suelo pierde toda estructura y el resultado son agregados finos (AF). Cuando el origen de la porosidad es la expansión y contracción de suelo se pueden generar 2 tipos básicos de estructuras. La estructura tipo P se caracteriza por presentar la porosidad en sentido horizontal (5) y la estructuras tipo Φ , la

cual no presenta una disposición espacial específica en la porosidad por el efecto de expansión contracción (4). De los AF se puede llegar a formar la estructura tipo Γ a través de la aglomeración por, clima, actividad biológica y materia orgánica (3). Las fluctuaciones por las condiciones climáticas y el efecto de la actividad biológica pueden modificar internamente las estructuras sin llegar a cambiar la clasificación de las mismas.

1.4.2 Análisis radicular

El análisis radicular permite determinar la proporción de raíces en el perfil, la profundidad de arraigamiento y la distribución espacial de las raíces de los cultivos y las pasturas. La profundidad máxima a la cual las raíces pueden acceder depende principalmente de la calidad estructural, el sistema poroso y la aparición o no de un horizonte argilúvico en el perfil del suelo. La exploración radicular de las pasturas es mayor que la de los cultivos anuales al igual que la biomasa aportada al sistema. La exploración radicular de las raíces están muy asociadas a las mejoras en la calidad física del suelo por ser fuente de porosidad (Reichert et al 2009, Bhattacharyya et al. 2006) y por la incorporación de materia orgánica (Brady y Weill, 2008). Sin embargo, distintos estudios han mostrado que la acumulación de Corg en el perfil del suelo está más asociada al sistema de labranza, siendo mayor la acumulación en sistemas de siembra directa que en el laboreo convencional (Salvo et al. 2014, 2010, Ernst y Siri-Prieto, 2009).

1.4.3 Resistencia al Corte

La resistencia al corte (RC) hace referencia a la tensión máxima al corte sobre un plano dado en el momento de la ruptura del suelo (Horn y Baumgartl, 2002). El indicador puede ser evaluado de distintas formas en laboratorio. A campo, la medición se hace a través de una herramienta de mano. La RC se mide en unidades de presión (KPa). La aplicación del test a campo llevado a cabo con una herramienta de mano ("Pocket vane tester") permite diferenciar zonas o áreas del perfil del suelo con distinta susceptibilidad a ser fracturados lo cual está ligado a la cohesión de los agregados del suelo. Zonas compactas tendrán mayores valores de RC y zonas menos compactas y con mayor porosidad serán menores (Boizard et al. 2013, Sasal 2003,).

1.4.4 Sistema poroso

La densidad aparente (Dap) junto con la porosidad total (Ptot) son los dos indicadores de calidad física de suelo más extendidos en la cuantificación de la porosidad del suelo (Ernst y Siri-Prieto 2009, Martino 2001, García 1992). En Uruguay existen diversos trabajos que explican cómo se modifica este indicador con el tipo de cultivo y el laboreo (Terra y García, 2001). Suelos con pasturas disminuyen la Dap aumentando así la Ptot y suelos con cultivos aumentan la Dap disminuyendo la Ptot. Otra metodología para determinar la calidad del sistema poroso es a través de la determinación de la Porosidad estructural (Pest.) y la porosidad textural (Ptext) (Sasal, 2003). La Ptext está determinada por la textura del suelo y la misma es constante en un mismo suelo dado que está determinada por el tamaño de las partículas minerales y de la materia orgánica. La Pest. está determinada por el uso y manejo del suelo y varía de acuerdo a los mismos según el arreglo espacial de los constituyentes del suelo. La Ptot del suelo se calcula como la sumatoria de la Pest. y la Ptext. por lo tanto, teniendo en cuenta que la Ptext es constante en un mismo suelo, es la Pest. quien define la Ptot. por lo cual, cualquier manejo que genere un aumento en la Pest. está afectando directamente al aumento en la Ptot y por ende la disminución de la Dap.

1.5 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo de este trabajo fue describir el estado estructural del suelo en sistemas agrícolas pastoriles en experimentos de largo plazo. Basándose en la metodología del perfil cultural y a través de la descripción del sistema radicular y el sistema poroso se describieron distintas estructuras a nivel subsuperficial. La principal hipótesis es que la siembra directa, tanto en los cultivos, como en las pasturas, favorecen la formación de distintas estructuras en el suelo por efecto acumulativo de los manejos a largo plazo. En ese sentido los cultivos continuos favorecen el desarrollo de estructuras compactas por simplificación del sistema, principalmente menor cantidad de raíces y mayor tránsito. Por lo tanto, la generación de macroporosidad en sistemas agrícolas pastoriles está directamente asociados al momento de la rotación con las pasturas. De esta manera se logra aumentar la macroporosidad por crecimiento del sistema radicular y el aumento de poros asociados a la actividad biológica, disminuyendo así la densidad aparente y la resistencia al esfuerzo cortante.

2. ESTADO ESTRUCTURAL DEL SUELO EN SISTEMAS AGRÍCOLA PASTORILES¹

2.1 RESUMEN

Se evaluó la estructura del suelo en sistemas de rotación agrícolas-pastoriles para un Argiudol Abrúptico y en un sistema agrícola para un Argiudol Típico. Aplicando la metodología del Perfil Cultural (PC) se determinó la proporción de estructuras en el perfil del suelo asociadas al uso y manejo. Se determinó la resistencia al corte (RC) y la proporción de raíces (R). Se caracterizó el sistema poroso a través de la Densidad aparente (Dap), y las Porosidades total (Ptot), estructural (Pest.) y textural (Ptext.). Las estructuras se clasificaron según el origen principal de los macroporos: por actividad radicular (b1) y por actividad biológica (b2). La metodología del PC sirvió para caracterizar diferentes estructuras que presentaron características similares. En los sistemas que prevalecieron los cultivos sobre las pasturas, el origen de la macroporosidad fue básicamente por el efecto expansión-contracción. En los sistemas con pasturas el origen de la macroporosidad estuvo asociado a la actividad biológica. Estructuras de mayor cohesión y menor porosidad, se presentaron en todos los tratamientos y siempre asociadas al tráfico. La generación de porosidad por la actividad biológica en dichas estructuras fue mayor en los sistemas con pasturas. Zonas compactas con fracturas por expansión-contracción se evidenciaron en mayor proporción en los tratamientos. En sistemas de agricultura continua en suelos franco arcillosos se describió una estructura laminar. La RC mostró diferencias significativas entre las estructuras y los tratamientos. El sistema radicular mostró una mayor proporción de raíces en los sistemas pastoriles. El sistema de cultivo continuo presentó valores mayores de Dap que los sistemas con pasturas. La Ptext fue constante en el suelo.

Palabras clave: Perfil cultural, raíces, compactación, porosidad

¹ Este artículo se presenta de acuerdo a las instrucciones de Agrociencia Uruguay. La numeración de cuadros y figuras es independiente de la del resto de la tesis.

SOIL STRUCTURAL STATE IN CROP-PASTURE SYSTEMS

2.2 SUMMARY

The soil structure was evaluated in agricultural-pastoral rotation systems for an Abruptic Argiudol and in an agricultural system for a Typical Argiudol. Applying the Cultural Profile (PC) methodology, the proportion of structures in the soil profile associated with the use and management was determined. The soil strength (SS) and the root frequency (RF) were determined. The porous system was characterized through the soil bulk density (BD), and the soil total porosity (TP), soil structural porosity (SP), and soil textural porosity (TexP). The structures were classified according to the main origin of the macropores: by radicular activity (b1) and by biological activity (b2). The PC methodology served to characterize different structures that presented similar characteristics. In the systems that prevailed the crops on the pastures, the origin of the macroporosity was basically by the expansion-contraction effect. In the systems with pastures, the origin of the macroporosity was associated to the biological activity. Structures with greater cohesion and less porosity, were present in all treatments and always associated with traffic. The generation of porosity due to the biological activity in these structures was greater in the systems with pastures. Compact areas with expansion-contraction fractures were more evident in the treatments. In continuous cropping systems in clay loam soils, a laminar structure was described. SS showed significant differences between structures and treatments. The root system showed a higher proportion of roots in pastoral systems. The continuous culture system had higher Dap values than systems with pastures. The Ptext was constant on the ground

Key words: Cultural profile, roots, compaction, porosity

2.3 INTRODUCCIÓN

La evolución de la estructura del suelo está asociada a factores naturales y antrópicos. Estos últimos están vinculados principalmente al manejo de los cultivos y los animales. El tipo e intensidad de laboreo, las especies cultivadas y el contenido hídrico son las variables determinantes en los cambios y en el desarrollo de distintas estructuras en el perfil del suelo (Hamza y Anderson, 2003). El manejo de dichas variables modifica el estado estructural del suelo a mediano y largo plazo. Tanto en sistemas de labranza convencional (Roger-Estrade et al. 2004, Boizard et al. 2002) como en sistemas de siembra directa (Boizard et al. 2017, 2013, 2012) los cambios a nivel estructural pueden ser evidenciados a través de análisis visuales o a través de la cuantificación de distintos parámetros físicos. Sin embargo, la siembra directa no siempre modifica la estructura del suelo (De Moraes et al. 2016, Moreira et al. 2016). Los efectos acumulativos pueden implicar disminución en los rendimientos de los cultivos e impactar negativamente en el ambiente al modificar el ciclo hidrológico en favor de la escorrentía asociado a la menor infiltración por compactación subsuperficial especialmente en sistemas de siembra directa (Sasal et al 2017a)

Tanto a nivel internacional (Boizard et al 2017, 2013, Peigné 2013) como regional (Sasal et al 2017a, 2017b, 2010, 2006, Alvarez et al. 2014, Sasal, 2003. Taboada et al. 1998) se ha evidenciado a través de metodologías de apreciación visual que los efectos acumulativos de la siembra directa pueden disminuir la calidad física del suelo. La compactación a nivel superficial y subsuperficial se ha descrito como estructuras en el perfil del suelo, donde la cohesión entre las partículas y la escasa porosidad son evidentes a simple vista. Al mismo tiempo, a dichas estructuras se les ha aplicado una serie de indicadores físicos que complementan la información y ayudan a detectar los cambios en tiempo de las estructuras.

La compactación se refiere al proceso por el cual los constituyentes del suelo son reorganizados disminuyendo así el espacio poroso, aumentando de esta manera la densidad aparente (Soil Science Society of America, 1996). La magnitud de la compactación está afectada por el tipo de suelo, las condiciones climáticas, y el manejo (Hamza y Anderson, 2003). La compactación superficial y subsuperficial junto a la aparición de estructuras laminares han sido reportadas por diversos autores a nivel regional (Sasal et al. 2017a, 2017b, 2010, 2006, Sasal, 2003) por metodologías de apreciación visual.

Dichas metodologías son de carácter semi-cuantitativas y han sido evaluadas principalmente en sistemas de cultivo continuo y en suelos limosos. Una de las metodologías propuestas para evaluar el proceso de compactación es a través de la detección visual y la clasificación de estructuras de acuerdo al grado de cohesión y a la presencia o no de macroporosidad. Esta metodología, denominada “Perfil Cultural”, fue desarrollada por Gautronneau y Manichon (1987) en Francia. La fortaleza de este método es que permite evaluar detalladamente la estructura del perfil del suelo al mismo tiempo que tiene en cuenta la variabilidad espacial aportada por los cultivos y las prácticas de manejo (Gautronneau y Manichon, 1987; Roger-Estrade et al. 2004). En ese sentido la metodología ha sido revisada y actualizada por la necesidad de entender el tipo de estructuras se generan en los sistemas de labranza cero (Boizard et al. 2017) y cuáles son las factores y los procesos que lo gobiernan.

En la región distintos autores (Boizard et al. 2017, Sasal et al. 2017a, Alvarez et al 2014, Sasal 2003, Taboada et al. 1998) han reportado cambios en la estructura del suelo asociado a la siembra directa y a los cultivos continuos en experimentos de largo plazo en suelos de tipo Argiudoles en Argentina y Oxisoles en Brasil. Dichos efectos se verifican en la mayor compactación del horizonte superficial y la aparición de estructuras de tipo laminar en los primeros centímetros del suelo en grados muy avanzados de compactación.

En Uruguay el principal cambio tecnológico en la agricultura de los últimos 25 años fue la introducción de la siembra directa lo cual disminuyó notoriamente la erosión (García 2004) mitigando así una problemática ambiental de larga data en el país. Al mismo tiempo con el ingreso de dicha tecnología y la incorporación de nuevos materiales genéticos, la agricultura uruguaya amplió su superficie de 350.000 ha a más de 1 millón de ha en 10 años (Ernst y Siri-Prieto, 2013). En particular, el aumento del área está explicado por el cultivo de soja que representa el 61% de los cultivos agrícolas (DIEA 2015)

Sin embargo, a nivel productivo se tiene la percepción de que la estructura del suelo se ha deteriorado por la formación de estructuras compactas a nivel superficial y subsuperficial que limitan el crecimiento radicular. Dichas estructuras pueden manifestarse como un área de límites claros donde la compactación es mayor y que puede estar o no asociado al tráfico, o como una estructura de carácter laminar dispuesta horizontalmente en los primeros centímetros del suelo. Al mismo tiempo, se puede inferir a través de la

distribución radicular de los cultivos el grado de compactación del suelo. Si bien a nivel nacional existen estudios de los efectos de la siembra directa, los sistemas de rotación de cultivos, y los contenidos de carbono orgánico (Salvo et al. 2014, 2010, Ernst y Siri-Prieto 2009, García 2004, Terra y García 2001) asociados a la calidad del suelo en experimentos de largo plazo, no es claro aún el efecto de la siembra directa en la formación de estructuras de origen antrópico que pueden estar limitando el desarrollo de los cultivos.

Si bien la principal característica de los sistemas agrícolas en Uruguay es que incorporan pasturas alternadas con cultivos anuales, las mismas han ido en detrimento por la incorporación de la siembra directa que permite prescindir la fase de pasturas aumentando así el número de cultivos. Sin embargo, las pasturas tienen efectos positivos tanto en la incorporación de materia orgánica en profundidad como en la mejora de la estructura del suelo (Peigné et al. 2013, Place et al. 2008, Vocanson et al. 2006, Bertol et al. 1998, Unger y Kaspar 1994).

El objetivo de este trabajo fue describir el estado estructural del suelo en sistemas agrícolas y agrícolas pastoriles en experimentos de largo plazo. Basándose en la metodología del perfil cultural y a través de la descripción del sistema radicular y el sistema poroso se describieron distintas estructuras a nivel subsuperficial. La principal hipótesis es que la siembra directa, tanto en los cultivos, como en las pasturas, promueven la formación de distintas estructuras en el suelo a largo plazo por efecto acumulativo. En ese sentido los cultivos continuos favorecen el desarrollo de estructuras compactas por simplificación del sistema, principalmente menor cantidad de raíces y mayor tránsito. Por lo tanto, la generación de macroporosidad en sistemas agrícolas pastoriles está directamente asociados al momento de la rotación con las pasturas. De esta manera se logra aumentar la macroporosidad por crecimiento del sistema radicular y el aumento de poros asociados a la actividad biológica, disminuyendo así la densidad aparente y la resistencia al esfuerzo cortante.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4 1. Descripción del sitio y tratamientos

El estudio se localizó en 2 sitios. El primer experimento se ubicó en la Unidad Experimental Palo a Pique del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (33°15' S;

54°29'O). Dicho experimento fue instalado en 1995 en un Argiudol Abrúptico con relieve ondulado suave a aplanado y pendientes entre 2 y 3%. Se trataron de suelos profundos, de color pardo oscuro, textura franca, imperfectamente drenados y de fertilidad media. El contenido de arcilla fue de 163 g kg⁻¹, limo 373 g kg⁻¹ y arena 464 g kg⁻¹ (MAP/DSF, 1976). La precipitación media anual histórica (1980 – 2009) fue de 1400 mm y la temperatura media anual del aire de 17 °C (Castaña et al. 2011).

El segundo experimento se localizó en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) (32°23' S; 58° 3' O). El mismo fue instalado en 1993 sobre un Argiudol Típico con relieve suavemente ondulado y pendientes de 1 a 2% de color pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados. El contenido de arcilla fue de 289 g kg⁻¹, limo 437 g kg⁻¹ y arena 274 g kg⁻¹ (MAP/DSF, 1976). La precipitación media histórica (1980 – 2009) fue de 1300 mm y la temperatura media anual del aire de 18°C (Castaña et al. 2011).

En el Argiudol Abrúptico se evaluaron distintas intensidades de uso bajo siembra directa. Los tratamientos fueron: Pastura mejorada Permanente (PP) renovadas cada 4-5 años que consistió en un mejoramiento sobre campo natural con festuca (*Festuca arundinacea*), trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y lotus (*Lotus corniculatus* L.); Cultivo Continuo (CC), en una rotación de Trigo (*Triticum spp*), Avena (*Avena sativa*) de cobertura Sorgo (*Sorghum spp.*) y Soja (*Glycine max*). Por último, un sistema de rotación cultivo-pasturas que consistió en Avena (*Avena sativa*), sorgo (*Sorghum spp.*), soja (*Glycine max*) y trigo (*Triticum spp*) y una pastura plurianual de trébol blanco, lotus y una gramínea perenne (*Festuca arundinacea*). Este último tratamiento se evaluó en dos momentos contrastantes; luego de los 2 años de cultivo (R2C) y luego de los 4 años de pasturas (R4P). Tanto para PP como para R4P al momento del muestreo la pastura se encontraba en pleno crecimiento y con pastoreo rotativo (Noviembre 2014). En el tratamiento CC se muestreó sobre el barbecho previo a la siembra (Octubre 2014) y en el caso de R2C luego de la cosecha del cultivo de verano (Mayo 2015).

En el Argiudol Típico, los tratamientos fueron cultivo continuo con siembra directa de soja (*Glycine max*) (CC3) y Sorgo (*Sorghum spp.*) (CC4) con cultivo de cobertura de invierno.

Ambas fueron evaluadas luego de la cosecha y previo a la implantación del cultivo de cobertura (Mayo 2015).

2.4.2 Características del área de muestreo

En cada tratamiento se identificaron zonas homogéneas del terreno representativas del área total y de la topografía. En el caso de las pasturas se seleccionó además por el estado fenológico. En dichas áreas se realizaron 2 calicatas de 3 m de largo, 1.5 m de ancho y 1 m de profundidad. Las mismas fueron dispuestas perpendicularmente al sentido del tránsito dejando centradas las huellas más recientes. El suelo removido fue dispuesto hacia la cara donde no se realizó ningún tipo de diagnóstico. Cada calicata fue dividida en dos a modo de repetición para el mapeo de raíces.

2.4.3 Muestreo y análisis

En cada calicata se realizaron determinaciones a campo de presencia de raíces, se identificaron estructuras en el suelo a través del método del perfil cultural y se midió la resistencia al corte en las mismas. Se extrajeron muestras para el análisis de laboratorio de densidad aparente, densidad aparente textural y contenido de agua en el suelo.

2.4.3.1 Sistema radicular

La determinación del área ocupada por raíces fue hecha por el método de la cuadrícula descrito por Böhm (1976) a través de la cual se identificaron áreas con presencia de raíces en una matriz de 0.02m x 0.02m en un área total de 0.6m² en 1 m lineal paralelo a la superficie. La cuadrícula se apoyó sobre la cara de la calicata y se verificó la presencia o ausencia de raíces. Las raíces fueron identificadas con elementos visible y se les fotografió para la construcción de una matriz integrada por ceros (0: ausencia de raíces) y unos (1: presencia de raíces) de acuerdo a si estaba presente o no la raíz en el área de $4,0 \times 10^{-4}$ m². Dicha matriz fue la base para el análisis estadístico y para generar imágenes de distribución de raíces.

2.4.3.2 Perfil Cultural

Las estructuras del suelo se describieron a través de la metodología del perfil cultural (PC) descrita por Gautronneau y Manichon (1987) adaptada para sistemas en sistema directa o laboreo reducido (Boizard et al. 2017). La descripción del perfil se realizó en un largo total de 2 m en la calicata y la profundidad fue determinada hasta la aparición del horizonte argilúvico. En dicha área se identificaron estructuras de acuerdo a 3 características principales. El tamaño y la forma en que se ensamblan los agregados y el estado interno de los mismos, a través de la cohesión y la porosidad visible. También se evaluó el tipo y origen de los macroporos por apreciación visual. Definidas las áreas, las mismas se delimitaron con un elemento visible (hilo blanco) y se fotografió el perfil.

Para clasificar las áreas previamente delimitadas se utilizaron 3 niveles de clasificación. El primer nivel hace énfasis en la forma en que se ordenan los agregados y se definen 3 tipos: Tipo "O" cuando el suelo está altamente fragmentado, con pequeños agregados y dominio de fracciones finas. El tipo "B" cuando presenta agregados mayores a 10cm, con porosidad visible, y menor dominio de fracciones finas y por último el Tipo "C" donde no se distinguen agregados, y el suelo presenta características masivas.

El segundo nivel de clasificación define 3 estructuras básicas; la gamma (Γ) la cual es una estructura con porosidad visible a simple vista tanto dentro del agregado como entre ellos de fácil desagregación y con baja cohesión entre las partículas constituyentes. La delta (Δ) se refiere a las zonas compactadas con estructuras masivas que se identifican por su elevada cohesión, reducida porosidad y presencia de caras de ruptura lisas. Por último la estructura tipo phi (Φ) es formada a partir de agregados tipo Δ principalmente por el factor clima a través de la generación de fisuras por el efecto de expansión y contracción lo cual está directamente relacionado con el clima.

La estructura tipo "Platy" o "laminar" (P) fue incorporada a la metodología del perfil cultural debido a su aparición en sistemas de siembra directa después de sucesivos años de cultivo continuo (Boizard et al. 2017, Sasal et al. 2017a, 2017b, Sasal, 2003). Dicha estructura se presenta con porosidad orientada paralelamente a la superficie del suelo en los primeros centímetros del horizonte superficial. La principal característica de esta estructura es la

disposición horizontal de la porosidad que puede incidir en la dinámica del agua en el suelo al mismo tiempo que se desfavorece las condiciones para el arraigamiento.

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

Delimitadas las áreas con un elemento visible se fotografió el perfil a intervalos horizontales de 0,5m desde una distancia de 1m y las imágenes se ensamblaron con programas de edición de imágenes (PanaVue Image Assambler™). La proporción de las estructuras se realizó a partir de una imagen única ensambla a través de un software de diseño (ImageJ™).

2.4.3.3 Resistencia al corte

La resistencia al corte (RC) del suelo se midió aplicando un test de resistencia con una herramienta de mano ("Pocket vane tester" Eijkelkamp, Giesbeek, Holanda) en cada una de las áreas que fueron delimitadas previamente por el PC. El test a campo midió la resistencia máxima que tuvo el suelo a ser fracturado a partir de la torsión aplicada con dicha herramienta. Se aplicó 5 y 10 veces en estructuras menores a 0.1 m² y mayores a 0.1 m², respectivamente. El valor de RC del tratamiento fue ponderado de acuerdo a la proporción de las estructuras descritas.

2.4.3.4 Sistema poroso

La caracterización del sistema poroso se realizó a través de la descripción de la densidad aparente (Dap), y la Porosidad total (Ptot), junto a sus 2 componentes, la Porosidad textural (Ptext) y Porosidad estructural (Pest). El sistema poroso también se caracterizó cualitativamente según el origen (biológico o climático). Las muestras para Dap, y para Dap textural se tomaron en las estructuras previamente definidas por el PC y se analizaron en laboratorio. Los valores de Dap, Pest, Ptext y Ptot de los tratamientos fueron ponderados de acuerdo a la proporción de las estructuras descritas.

La Dap se determinó mediante el método del cilindro descrito por Burke et al. (1986). Las muestras fueron tomadas en las distintas estructuras identificadas por la metodología del PC entre los 0.05 y 0.15m de profundidad. Se determinó la Ptot a partir de la ecuación:

$$P_{tot} = [1 - (D_{ap}/D_{real})] \times 100$$

Siendo: Ptot: Porosidad total (%). Dap: Densidad aparente (gr.cm⁻³). Dreal: Densidad real (2,65gr.cm⁻³).

La Dap textural se determinó por inmersión en kerosene de agregados de 2 a 3 mm (Stengel, 1979) descrita por Sasal (2003). La Ptext es una expresión de la fracción mineral y orgánica. La determinación de la Ptext. se diferencia de la Ptot porque la primera no incluye la porosidad generada por factores climáticos, biológicos y de origen antrópico. Estos factores principales son determinantes de la Pest. La Pest se determinó como:

$$P_{es} = [1 - (D_{ap}/D_{text})] \times 100$$

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

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

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

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

A partir de la determinación de la densidad aparente textural por el método de la inmersión en keroseno se calculó la Pest y por diferencia con la Ptot se determinó la Ptext.

2.4.4 Análisis estadístico

Para evaluar si los tratamientos afectaron la proporción de estructuras del perfil se hicieron análisis de tablas de contingencia para cada sitio. En primera instancia se utilizó la

prueba de Chi-cuadrado de Pearson ($\alpha=0,05$) considerando los cuatro tratamientos sobre el Argiudol Abrúptico y los 2 tratamientos para el Argiudol Típico. En los tratamientos donde el valor de dicho estadístico fue significativo se realizó una comparación post hoc de a pares de tratamientos con la prueba exacta de Fisher ($\alpha=0,05$). Dentro de los tratamientos, se compararon los valores de RC, Dap, Ptot, Ptext y Pest de las estructuras (Δ , Φ , Γ) utilizando ANOVA de una vía ($\alpha = 0,05$). Entre los tratamientos, se compararon los valores de RC, Dap, Ptot, Ptext y Pest. Dichos valores fueron ponderados según la proporción de la estructura. Para dichos análisis se utilizó el software Infostat (Di Rienzo et al. 2014).

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Sistema radicular

2.5.1.1 Proporción de raíces en el perfil

La figura N°1 muestra la proporción de raíces en profundidad en el Argiudol Abrúptico (Figura 1a), y en el Argiudol Típico (Figura 1b) para todos los tratamientos evaluados.

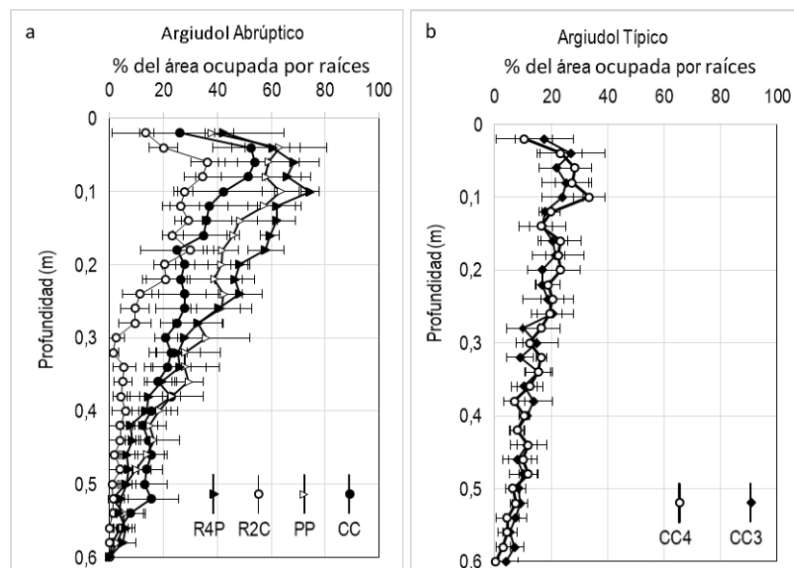


Figura N°1: Proporción de raíces según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación luego de 2 años de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo.

En el suelo Argiudol Abrúptico los dos tratamientos con pasturas en crecimiento presentaron mayor proporción de raíces entre 0 y 0.6m de profundidad ocupando en PP 30,3 % y en R4P un 31,7 % del área total. En CC el porcentaje de raíces fue de 23,8% y en R2C 11,8 % de 0 a 0,6m. Por otra parte en el Argiudol Típico el porcentaje de raíces fue de 14,3% y 14,9% para CC3 y CC4, respectivamente.

2.5.1.2. Distribución espacial de las raíces

La figura 2 muestra la distribución espacial en profundidad de las raíces según el tipo de suelo: Argiudol Abrúptico (figuras 2a y 2b) y Argiudol Típico (figura 2c) para los tratamientos R2C, R4P y CC3, respectivamente.

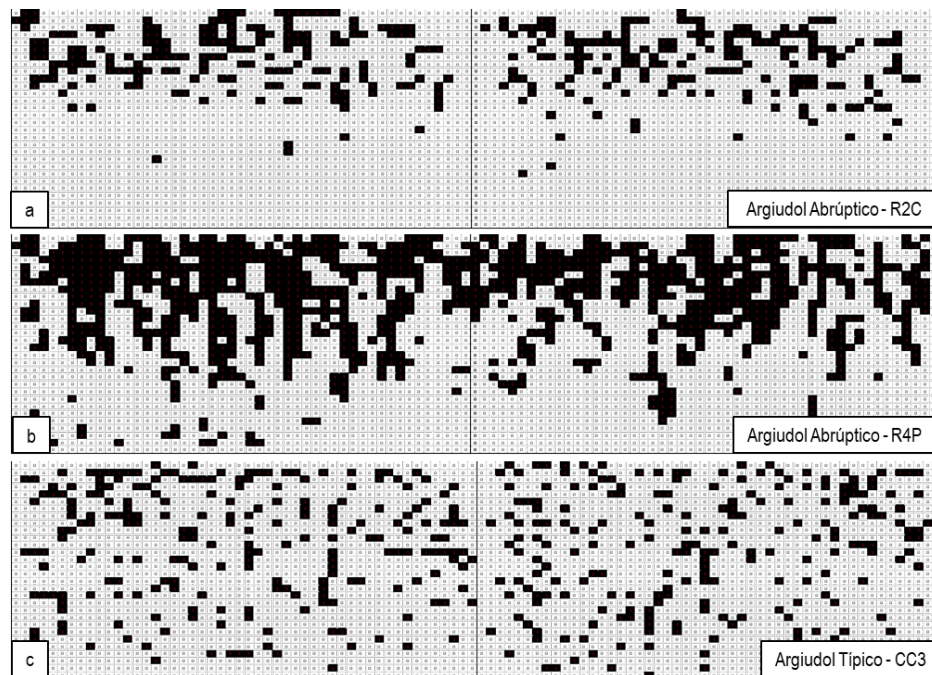


Figura N°2: Distribución espacial de las raíces según tipo de suelo y tratamiento. R2C: Rotación en 2do año de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, CC3: Cultivo continuo soja.

De acuerdo a la distribución espacial de las raíces se verificó que el 50% de las mismas se acumulan en los primeros centímetros del suelo. Dicho límite se alcanzó a los 0,13m, 0,15m, 0,16m y 0,17m de profundidad para R2C, R4P, PP y CC, respectivamente. En los tratamientos CC3 y CC4 los límites se dieron a los 0,2m y 0,19m de profundidad

respectivamente. El 80 % acumulado de la concentración de raíces muestra la misma tendencia en los tratamientos siendo la profundidad límite para R2C: 0,24m, R4P: 0,26m, PP: 0,3m y CC: 0,35m para el suelo Argiudol Abruptico. Para el Argiudol Típico se verificó una profundidad límite para el 80% de las raíces de 0,37m y 0,34m para CC3 y CC4, respectivamente.

2.5.2 Descripción de la estructuras a través del perfil cultural

La figura N° 3 muestra los perfiles culturales para cada tratamiento con la nomenclatura correspondiente.

En el primer nivel de clasificación la estructura tipo “C” estuvo en el 100% del perfil descrito en los tratamientos con pasturas R4P y PP en el suelo Argiudol Abruptico. En tanto en los tratamientos CC y R2C el porcentaje de la estructura tipo C fue de 85,3% y 84,3%, respectivamente. En estos últimos se describió en los primeros centímetros del perfil la estructura tipo O en un 14,7% y 15,7% para CC y R2C, respectivamente. En los dos tratamientos ubicados en el Argiudol Típico se identificó la estructura tipo C en el 100% del perfil descrito. La estructura tipo C se caracterizó por presentar un carácter masivo cuando estuvo asociado a la estructura de tipo Φ donde no se visualizaron claramente los agregados. Sin embargo, donde se identificaron agregados tipo Γ y Δ los mismos no superaron los 10cm de diámetro. En el segundo nivel de clasificación, en el Argiudol Abruptico la proporción de estructuras de tipo Φ fue 60,4%, 59,7%, 75% y 73,3% en CC, R2C, PP, R4P, respectivamente. Esta estructura tuvo la característica de presentar macroporosidad visible asociada a las fracturas sufridas por el efecto de expansión – contracción por alternancia en el contenido hídrico y en menor medida por la actividad biológica (Figura N° 8).

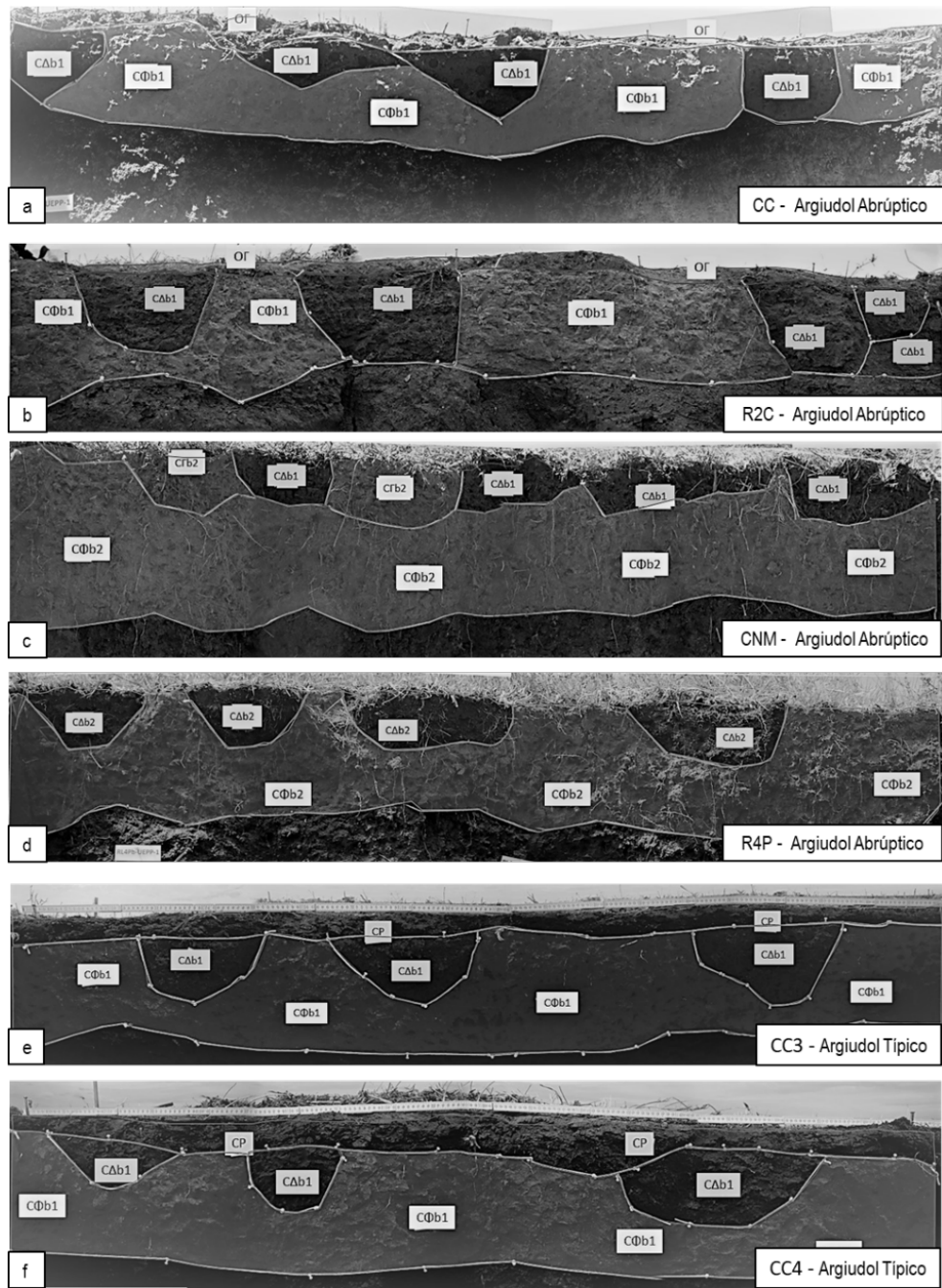


Figura N°3: Perfil cultural según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2do año de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente , CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo

En el Argiudol Típico la estructura predominante también fue la tipo Φ con 62% y 62,8% del área total para CC3 y CC4, respectivamente. La estructura tipo Δ se describió en ambos sitios y en todos los tratamientos. Para el Argiudol Abruptico en los sistemas más intensivos la proporción fue 25 % para CC y 24,7 % para R2C. En PP y R4P la proporción fue 20,2 % y 26,8 % respectivamente. Para el Argiudol Típico la proporción de la estructura tipo Δ fue 22,7 y 15,6 % en CC3 y CC4, respectivamente. Dicha estructura siempre presentó macroporosidad visible aunque el origen pudo diferir siendo la expansión-contracción y la penetración radicular el principal factor de generación de macroporos. La estructura tipo “platy” (P) fue descrita en el suelo Argiudol Típico en ambos tratamientos ocupando 15,3% y 17,8% en CC3 y CC4 respectivamente (Figura N° 10). La estructura se identificó a campo por la clara disposición de los macroporos en el eje horizontal y siempre estuvo asociada a los primeros centímetros del suelo. La estructura tipo Γ se presentó en muy baja proporción, en PP la proporción de dicha estructura fue de 4,8% y en CC4 3,9 % (Figura 4).

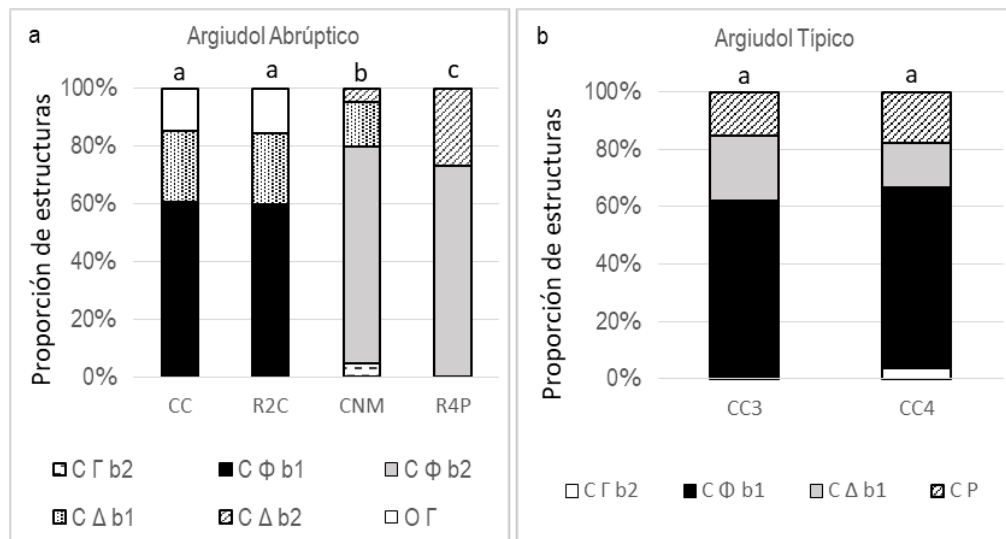


Figura N°4: Proporción de estructuras según tipo de suelo y tratamiento. CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2do año de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente , CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo.

Por último, en el tercer nivel de clasificación se realizó una descripción de la macroporosidad en las estructuras tipo Γ , Δ y Φ de acuerdo al origen y la calidad de los macroporos a partir del análisis fotográfico de los perfiles. En el Argiudol Abruptico en los

tratamientos PP y R4P la actividad de la fauna del suelo clasificada como b2 estuvo presente en 84,7% y 100% del perfil respectivamente. En CC y R2C la actividad tipo b1 fue 100% en ambos tratamientos. En el suelo Argiudol Típico la clasificación tipo b1 representó el 84,7% y 78,3% de CC3 y CC4, respectivamente.

2.5.3 Resistencia al corte

2.5.3.1 Resistencia al corte por tratamiento

El cuadro N° 1 muestra la resistencia al corte y el contenido de agua al momento del muestro según tipo de suelo y tratamiento.

Cuadro N°1 Resistencia al corte según tipo de suelo y tratamiento

Sitio	Tratamiento	RC Kpa	Cont. H20 (g.100gr suelo)
	CC	88 ± 2,32a	0,2
Argiudol	R2C	72 ± 4,51c	0,16
Abrúptico	R4P	82 ± 2,59b	0,27
	PP	82 ± 4,35b	0,23
Argiudol	CC3	120 ± 6,2a	0,21
Típico	CC4	149 ± 6,2b	0,22

CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2do año de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente , CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo. Letras diferentes significan diferencias significativas Test: LSD Fisher (P<0,05).

En el suelo Argiudol Abruptico la mayor resistencia al corte fue en CC (88 KPa), en tanto no difirieron PP (82 KPa) y R4P (82 KPa). El tratamiento R2C presentó el menor valor de RC (72 Kg.m⁻²). Los tratamientos con pasturas presentaron mayor contenido hídrico siendo R4P 27% y PP 23%. Los tratamientos CC y R2C tuvieron un 20% y 16%, respectivamente. En el suelo Argiudol Típico el tratamiento CC4 presentó mayor RC (149KPa) que CC3 (120 KPa). El contenido hídrico fue de 21% y 23% para CC3 y CC4, respectivamente (Cuadro N°1).

2.5.3.2 Resistencia al corte por estructura

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

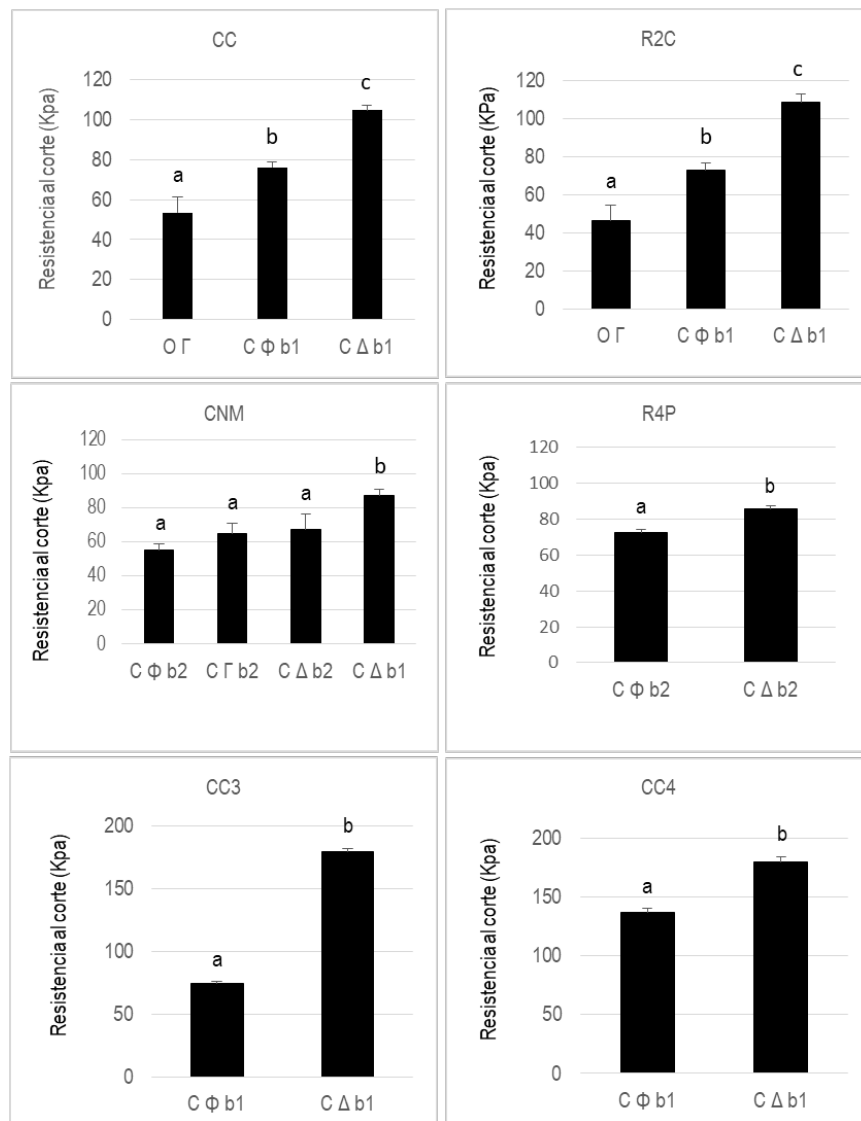


Figura N° 5: Resistencia al corte según tratamientos y estructuras para un suelo Argiudol Abrúptico (a, b, c, d) y un Argiudol Típico (e, f). CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2do año de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo. Letras diferentes significan diferencias significativas Test: LSD Fisher ($P < 0,05$).

Para el Argiudol Abrúptico los sistemas con cultivos CC y R2C presentaron valores de RC para las estructuras tipo C Δ b1 de 105 KPa y 109 KPa respectivamente. Las estructuras tipo C Φ b1 tuvieron valores de 76 KPa y 73 KPa para CC y R2C. La estructura tipo O Γ mostro valores de 54 KPa y 46 KPa para CC y R2C respectivamente (figuras 5a y 5b). Para PP los valores de RC fueron: C Φ b2: 55 KPa, C Γ b2: 65 KPa, C Δ b2: 67 KPa y C Δ b1 87 KPa (figura 5c). En R4P los valores de RC fueron: C Φ b2: 73 KPa y C Δ b2: 86 KPa (figura 5d). En el suelo Argiudol Típico los valores de RC para la estructura tipo C Δ b1 fue de 179 KPa para CC3 y CC4. Para la estructura tipo C Φ b1 los valores de RC fueron de 74 KPa y 137 Kpa para CC3 y CC4 respectivamente.

2.5.4 Sistema poroso

2.5.4.1 Densidad aparente

El cuadro N° 2 muestra la densidad aparente y el contenido de agua al momento del muestro según tipo de suelo y tratamiento.

Cuadro N°2 Densidad aparente y contenido de agua por tratamiento.

Suelo	Tratamiento	Dap. (Mg.m ⁻³)	Cont. agua (g.100g H2O)
Argiudol Abrúptico	CC	1,46±0,01c	0,2
	R2C	1,38±0,02a	0,16
	R4P	1,43±0,02bc	0,27
	PP	1,41±0,02ab	0,23
Argiudol Típico	CC3	1,36±0,02a	0,21
	CC4	1,41±0,02a	0,22

CC: Cultivo Continuo, R2C: Rotación en 2do año de cultivo. R4P: Rotación en 4to año de pastura, PP: Pastura mejorada Permanente, CC3: Cultivo continuo soja, CC4: Cultivo continuo sorgo. Letras diferentes significan diferencias significativas Test: LSD Fisher (P<0,05).

En el Argiudol Abrúptico la Dap fue de 1,46 Mg.m⁻³ en CC, 1,38 Mg.m⁻³ en R2C, 1,41 Mg.m⁻³ en PP y 1,43 Mg.m⁻³ en R4P. Para el suelo Argiudol típico la Dap fue de 1,36 Mg.m⁻³ para CC3 y 1,41 Mg.m⁻³ para CC4.

2.5.4.2 Componentes de la porosidad total

La figura N°6 muestra los dos componentes de la porosidad total: Porosidad textural y Porosidad estructural. En el suelo Argiduol Abrúptico la P_{tot} en CC fue 44,7%, en R2C 48%, en PP 46,65% y en R4P 46,15%. En el suelo Argiduol Típico la P_{tot} fue 49% y 47% para CC3 y CC4, respectivamente.

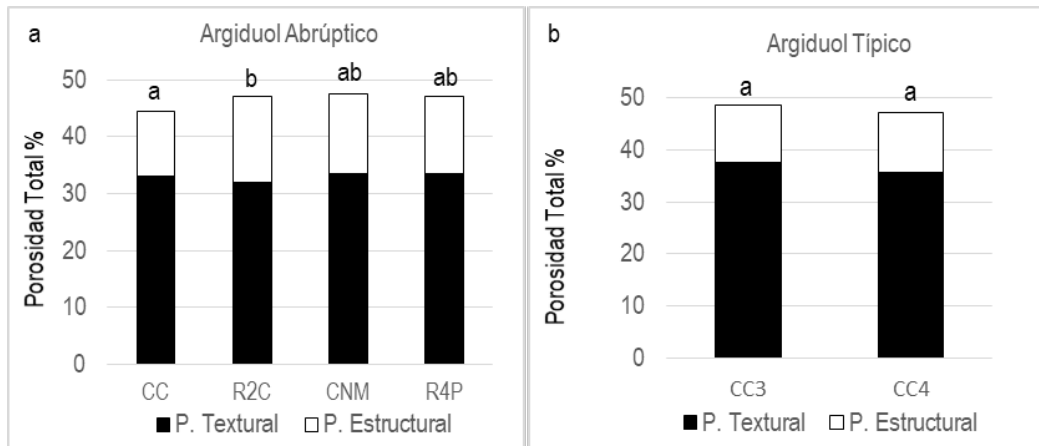


Figura N° 6: Porosidad total, estructural y textural según tratamiento. CC Cultivo Continuo, R2C Rotación en 2do año de cultivo. R4P Rotación en 4to año de pastura, PP Pastura mejorada Permanente, CC3 Cultivo continuo cultivo soja, CC4 Cultivo continuo sorgo. Letras diferentes significan diferencias significativas Test: LSD Fisher ($P < 0,05$).

La porosidad estructural fue 11,51%, 15,66% 13,96% y 13,34% para CC, R2C, PP y R4P respectivamente. En el Argiduol Típico la P_{est} fue 10,9% y 11,55% para CC3 y CC4 respectivamente. La porosidad textural en el Argiduol Abrúptico fue 33,19%, 32,34%, 32,69%, 32,81% para CC, R2C, PP y R4P respectivamente. Para el Argiduol Típico la porosidad textural fue 38,1% y 35,45% para CC3 y CC4 respectivamente.

La figura N° 7 muestra la relación entre la porosidad total y la porosidad estructural para el Argiudol Abrúptico (figura 7a) y para el suelo Argiudol Típico (figura 7b).

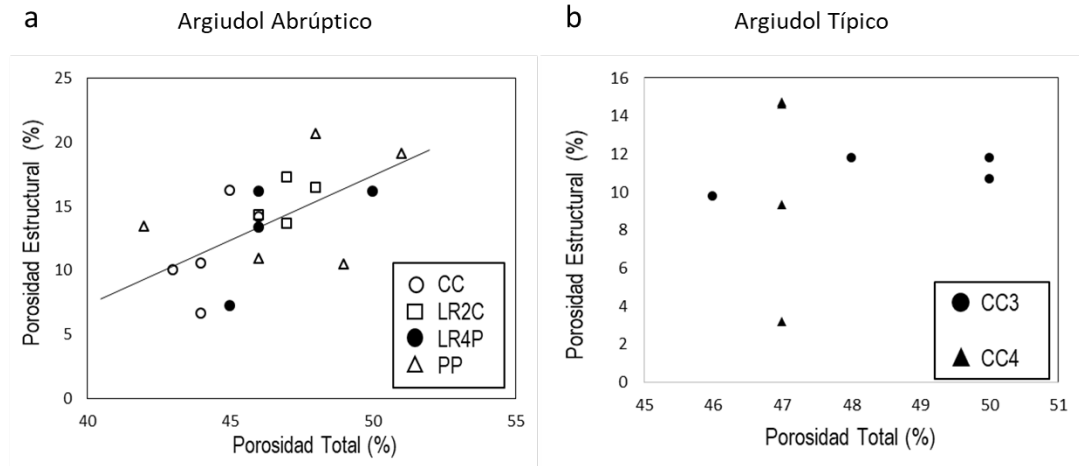


Figura N° 7: Relación entre la Ptot y la Pest. para dos suelos: Argiudol Abrúptico y Argiudol Típico. CC Cultivo Continuo, R2C Rotación en 2do año de cultivo, R4P Rotación en 4to año de cultivo, PP Pastura mejorada Permanente , CC3 Cultivo continuo cultivo soja, CC4 Cultivo continuo sorgo.

La relación entre Pestr y Ptot para el suelo Argiudol abráptico fue:

$$PEstr. = -29.04 + 0.92Ptot. R^2 0.32$$

Para el suelo Argiudol típico no se encontró una relación directa.

2.6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A través de la metodología del perfil cultural se logró clasificar estructuras por propiedades físicas y actividad biológica que fueron detectadas a nivel visual y con ayuda de herramientas de mano. La metodología adaptada para los sistemas con siembra directa propuesta por Boizard et al. (2017) permitió incluir en la clasificación 2 categorías (b1 y b2) que permitieron explicar el origen principal de los macroporos asociados a la actividad biológica que resultó ser de gran importancia para la subclasificación de las estructuras básicas (Γ , Δ , Φ) descritas por Gautronneau y Manichon (1987) y Roger-Estrade et al. (2004).

En particular, las estructuras tipo Δ siempre presentaron algún tipo de porosidad de origen biológico lo cual está asociado a los sistemas de siembra directa. El desarrollo de los macroporos en las estructuras tipo Δ se relacionó a la presencia de cultivos o pasturas. En los cultivos (CC, R2C, CC3 y CC4) el principal origen biológico de la porosidad fue la exploración radicular y en las pasturas (PP y R4P) el origen de la macroporosidad de origen biológico estuvo asociado a la actividad de la fauna del suelo siendo las madrigueras y los bioporos los principales (figura 9). En las estructuras tipo Φ el efecto de las pasturas fue similar. En el Argiudol Abrúptico los 2 tratamientos con cultivos (CC y R2C) presentaron un perfil muy similar en cuanto a proporción de estructuras, sin embargo el porcentaje de raíces fue mayor en CC. A pesar de la diferencia en el origen y el volumen de las raíces, las estructuras se clasificaron como b1 de acuerdo a su actividad biológica dado que la macroporosidad visible estuvo asociada al crecimiento de las raíces y en menor medida por otras actividades biológicas. En ambos tratamientos la generación de macroporosidad estuvo mayormente ligado a la expansión y contracción por efecto del clima (Figura 8) que a la creación de poros por la actividad biológica.

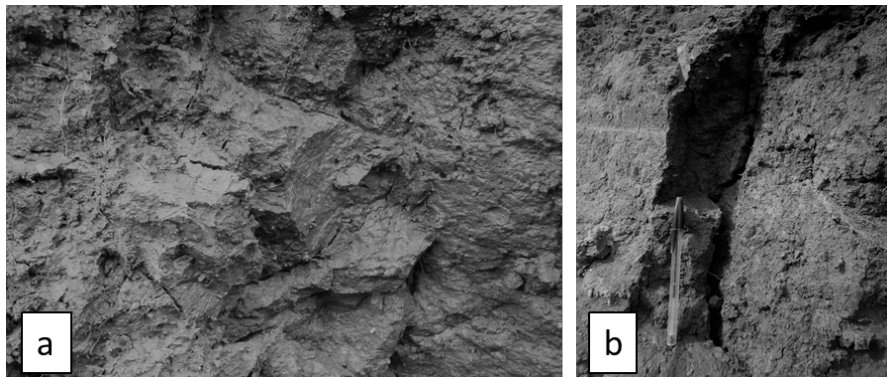


Figura N° 8. Generación de porosidad en Cultivo continuo (a) y rotación en 2do año de cultivo (b) asociado a la expansión-contracción de minerales arcillosos y en menor medida por la actividad biológica de las raíces (b1).

En los tratamientos con pasturas (PP y R4P) la presencia de actividad biológica se evidenció en un mayor número de galerías y madrigueras de lombrices (Fig 9 a). También se evidenció la mayor proporción de raíces en el perfil en ambos tratamientos. En cuanto a las estructuras identificadas como Δ se pudo verificar que a pesar de ser estructuras compactas, de alta cohesión, y que obtuvieron valores elevados de RC mantuvieron la porosidad

principalmente de origen biológico pero también climático (Fig 9 b). Dichas estructuras se asociaron principalmente al tránsito de maquinaria y se manifestaron como un característico bulbo de compactación por tráfico. El comportamiento de las estructuras clasificadas como Φ fue similares a las de tipo Δ en lo referente a cantidad de raíces y actividad biológica, sin embargo el grado de cohesión fue menor y los agregados presentaron menor resistencia al corte. La estructura tipo Γ se describió en los tratamientos con cultivos (CC y R2C) y estuvo asociado a los primeros centímetros del suelo.

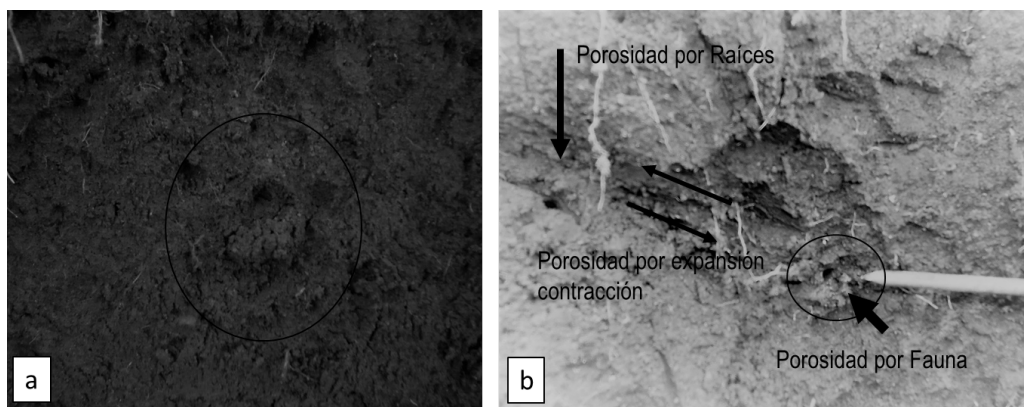


Figura N° 9: a) Desechos de lombrices y macroporosidad asociada a la misma. b) Distintos orígenes de porosidad ejemplificados en raíces (tipo b1), fauna (tipo b2) y el factor expansión-contracción.

En el Argiudol Típico los tipos de cultivos no modificaron la presencia y distribución de las distintas estructuras siendo ambos perfiles similares en cuanto a disposición espacial y área total de cada una de ellas. En CC3 y CC4 se observó la aparición de una estructura de tipo laminar entre los 0,05 y 0,1m de profundidad en sentido horizontal a la cual se denominó estructura tipo “platy” (P). Si bien en la estructura no se visualizaba claramente la disponibilidad de los macroporos con la ayuda de herramientas de mano se pudo verificar dicha condición dado su dificultad para apreciarla visualmente (Fig10). Al mismo tiempo, los límites inferiores de la estructura P no fueron claros por lo cual la detección visual y la delimitación de la misma fue compleja. Dicha estructura ha sido verificada en sistemas de siembra directa sobre suelos limosos (Sasal et al. 2017a, 2017b, Sasal 2003) en sistemas de cultivo continuo. La estructura tipo P estuvo asociada a los primeros centímetros del suelo y se diferenció de la estructura tipo Γ por la disposición horizontal de los poros y mayor

cohesión. La aparición de la estructura tipo Γ en CC4 estuvo directamente relacionada en una madriguera de animal que confirió al área la característica de ser una estructura de baja cohesión y fácil desagregación por lo cual no es considerado un efecto del sistema de cultivo.

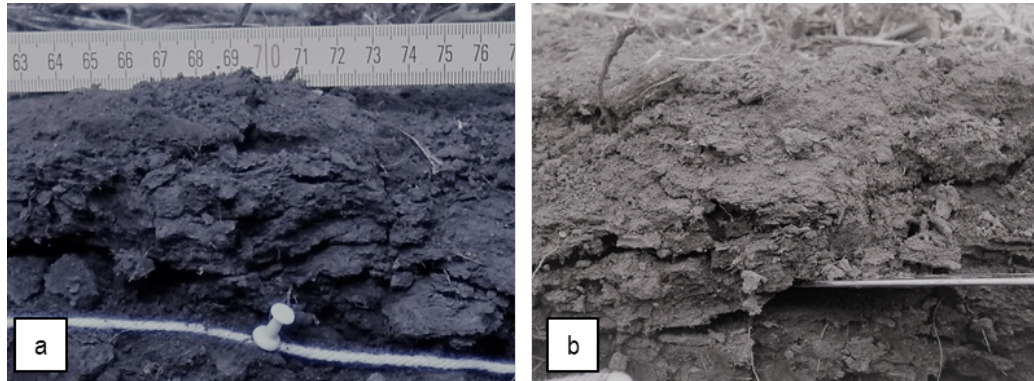


Figura N° 10: Estructura laminar tipo “Platy” en cultivo continuo CC3 (a) y CC4 (b).

En cuanto al sistema radicular, la distribución del mismo estuvo asociado al manejo y al momento de la determinación. La evaluación de raíces para los dos tratamientos con cultivos (CC y R2C) en el Argiudol Abrúptico fue realizada en distintos momentos. Para CC la evaluación fue previo a la siembra del cultivo de soja por lo cual el sistema radicular estuvo mayormente asociado a la cobertura de invierno (pastura anual). En R2C la evaluación fue realizada luego de la cosecha del cultivo de verano (soja) por lo cual el sistema radicular estuvo asociado a este último. En ese sentido, la figura N°1 a) muestra una mayor cantidad de raíces en profundidad en el tratamiento CC con respecto a R2C lo cual estaría explicado por el tipo de vegetación presente en ese momento. También se pudo observar una disminución en la proporción de raíces en CC a profundidades mayores de 0.2m lo cual puede estar asociado al horizonte argilúvico característico de este suelo. Los tratamientos con pasturas (PP y R4P) tuvieron un comportamiento similar, sin embargo R4P tuvo un sistema radicular de mayor desarrollo. Esto último asociado a la buena calidad de la pastura en comparación con el PP el cual presentó un grado mayor de degradación en la misma (figura 1a). En el Argiudol típico los cultivos tuvieron una distribución similar en profundidad aunque el tratamiento con cultivo de soja (CC3) presentó un sistema radicular menos desarrollado (figura 1b).

La RC resultó ser un indicador lo suficientemente sensible para detectar diferencias significativas en las estructuras descritas por el PC. Si bien los valores promedio fueron superiores a los encontrados por otros autores (Boizard 2012, Sasal 2003) las diferencias encontradas están en concordancia con lo esperado para dichas estructuras. En ese sentido las estructuras tipo Δ presentaron mayores valores de RC en comparación con las estructuras tipo Φ . En los sistemas con cultivo CC y R2C la estructura tipo Γ presentó valores menores de RC. La RC en los tratamientos estuvo asociado al contenido hídrico lo que queda en evidencia en el tratamiento R2C el cual presentó una baja RC lo que puede haber estado influenciado por el bajo contenido de agua que presentaba el suelo en el momento de la evaluación.

Para el suelo Argiudol Abrúptico el aumento de la Pest. mostró una relación directa con el aumento en la Ptot. Al mismo tiempo, la Ptext. fue constante para dicho suelo lo cual es esperable dado que la composición mineralógica fue constante en los tratamientos. Para el suelo Argiudol Típico no se encontró relación entre la Pest. y la Ptot. La importancia en la determinación de la Pest. y la Ptext. es que las mismas permiten establecer que proporción de la Ptot está asociada al manejo (Pest) y cual es la proporción de la porosidad que está relacionada a la composición mineralógica y orgánica del suelo. Si bien no se encontró una relación directa entre las estructuras y la Pest. la metodología permitió determinar la Ptext. para ambos suelos.

2.7. BIBLIOGRAFÍA

Alvarez C, Taboada M, Perelman S, Morrás H. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Research*. 52 (6):533.

Bertol I, Gomes K, Nicoloso R, Zago L, Maraschin G, 1998. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastura natural. *Pesq. Agropec. Bras., Brasília*. V. 33, n° 5, 779-786.

Böhm W.1976. In situ estimation of root length at natural soil profiles. *The Journal of Agricultural Science*, 87, 365-368.

- Boizard H, Peigné J, Sasal MC, Guimaraes M, Piron D, Tomis V, Vian JF, Cadoux S, Ralisch R, Tavares J, Heddadj D, De Battista J, Duparque A, Franchini JC, Roger-Estrade J. 2017 Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till, In Soil and Tillage Research, Volume 173, 92-103, ISSN 0167-1987
- Boizard H, Sung Won Yoon, Leonard J, Lheureux S, Cousin I, Roger-Estrade J, Richard G. 2013. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage, Soil and Tillage Research, Volume 127, March, 34-44.
- Boizard H, Richard G, Roger-Estrade J, Dürr C, Boiffin J, 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France, In Soil and Tillage Research, Volume 64, Issues 1-2, 149-164, ISSN 0167-1987.
- Boizard H, Peigné J, Capowiez Y, Roger Estrade J. 2012. Ability of the “Profile Cultural” Method to assess the soil structure of untilled layers. In Agrocienca Volumen 16 N° 3 221 – 226.
- Burke W, Gabriels D, Bouma J. 1986. Soil structure assessment. 92 p. Rotterdam, A.A. Balkema.
- Castaña J, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Serie técnica N°193. INIA. ISBN: 978-9974-38-330-2
- De Moraes MT, Debiasi H, Carlesso R, Franchini JC, Rodrigues da Silva V, Bonini da Luz F. 2016 Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil, In Soil and Tillage Research, Volume 155, Pages 351-362, ISSN 0167-1987
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2015. Anuario Estadístico Agropecuario. [En línea]. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). Consultado

Nov. 2017. Disponible en: <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2015,O,es,0>,

Di Rienzo J A, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2014. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

Ernst O, Siri-Prieto G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil Tillage Res.* 260-268.

Ernst O, Siri-Prieto G. 2013. Pérdida de calidad del suelo como factor limitante del rendimiento en el largo plazo. III Simposio Nacional de Agricultura.

García F, Ernst O, Siri-Prieto G, Terra J. 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay, *Soil and Tillage Research*, Volume 77, Issue 1, Pages 1-13, ISSN 0167-1987

Gautronneau Y, Manichon H. 1987. Guide méthodique du profil cultural. CEREF/ISARA, Lyon, France.

Hamza MA, Anderson WK, 2003. Responses of soil properties and grain yields to Deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a Sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 54, 273–282.

MAP/DSF. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1000000. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.

Moreira WH, Tormena CA, Karlen D, Pires da Silva A, Keller T, Betioli E. 2016. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage, In *Soil and Tillage Research*, Volume 160, Pages 53-64, ISSN 0167-1987.

Peigné J, Vian J, Cannavacciuolo M, Lefevre V, Gautronneau Y, Boizard H. 2013. Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profil cultural method, *Soil and Tillage Research*, Volume 127, Pages 13-25, ISSN 0167-1987

- Place G, Bowman D, Burton M, Ruffy T. 2008. Root penetration through a high bulk density soil layer: Differential response of a crop and weed species. *Plant and Soil*. 307. 179-190.
- Roger-Estrade J, Richard G, Caneill J, Boizard H, Coquet Y, Défossez P, Manichon H. 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil Till. Res.*, 79: 33–49.
- Salvo L, Hernández J, Ernst O. 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems, *Soil and Tillage Research*, Volume 109, Issue 2, Pages 116-122, ISSN 0167-1987.
- Salvo L, Hernández J, Ernst O. 2014. Soil organic carbon dynamics under different tillage systems in rotations with perennial pastures, *Soil and Tillage Research*, Volume 135, Pages 41-48, ISSN 0167-1987.
- Sasal MC, Andriulo AE, Taboada MA, 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Tillage Res.* 87, 9–18.
- Sasal MC. 2003 Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires.
- Sasal MC, Boizard H, Andriulo A, Wilson M, Léonard J. 2017. a) Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and tillage Research* Volume 173, Pages 33-41, ISSN 0167-1987.
- Sasal MC, Castiglioni MG, Wilson MG. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage, *Soil and Tillage Research*, Volume 108, Issues 1-2, Pages 24-29, ISSN 0167-1987.

- Sasal MC, Léonard J, Andriulo A, Boizard H. 2017. b) A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. *Soil and tillage Research*. Volume 173, Pages 42-48, ISSN 0167-1987.
- Soil Science Society of America, 1996. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison, WI, USA.
- Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30: 27-51.
- Taboada M, Micucci F, Cosentino D, Lavado R. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina, *Soil and Tillage Research*, Volume 49, Pages 57-63, ISSN 0167-1987
- Terra, J A, García Préchac, F. 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del este: Síntesis 1995 – 2000. Montevideo, INIA. Serie técnica no.125. 100 p.
- Unger P, Kaspar T. 1994. Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agron. J.* 86:759-766.
- Vocanson A, Roger-Estrade J, Boizard H, Jeuffroy M. 2006. Effects of Soil Structure on Pea (*Pisum sativum* L.) Root Development According to Sowing Date and Cultivar Plant
Soil pp: 281: 121

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La utilización de distintos indicadores para determinar la calidad física del suelo es imprescindible para lograr manejos sustentables de dicho recurso. Sin embargo, lograr que los indicadores sean suficientemente sensibles para detectar los cambios en las propiedades de los suelos por el uso y manejo del mismo requiere de distintas y numerosas evaluaciones a campo. En esta tesis se abordaron distintas herramientas y metodologías con el objetivo principal de determinar cuáles son y qué factores están afectando el desarrollo de distintas estructuras a nivel superficial y subsuperficial que pueden estar limitando la exploración radicular. En este capítulo se discutirán los principales resultados, sus implicancias prácticas así como también las dificultades encontradas en dicho proceso.

3.1 SISTEMA RADICULAR.

La distribución del sistema radicular estuvo asociado al manejo y al momento de la determinación. La evaluación de raíces para los dos tratamientos con cultivos (CC y R2C) en el suelo Argiudol Abrúptico fue realizada en distintos momentos. Para CC la evaluación fue previo a la siembra del cultivo de soja por lo cual el sistema radicular estuvo mayormente asociado a la cobertura de invierno (pastura anual). En R2C la evaluación fue realizada luego de la cosecha del cultivo de verano (soja) por lo cual el sistema radicular estuvo asociado a este último. En ese sentido, la figura N°1 a) muestra una mayor cantidad de raíces en profundidad en el tratamiento CC con respecto a R2C lo cual estaría explicado por el tipo de vegetación presente en ese momento. También se pudo observar una disminución en la proporción de raíces en CC a profundidades mayores de 0.2m lo cual puede estar asociado al horizonte argilúvico característico de este suelo. Los tratamientos con pasturas (PP y R4P) tuvieron un comportamiento similar, sin embargo R4P tuvo un sistema radicular de mayor desarrollo. Esto último asociado a la buena calidad de la pastura en comparación con el PP el cual presentó un grado mayor de degradación en la misma (figura 1a). En el Argiudol típico los cultivos tuvieron una distribución similar en profundidad aunque el tratamiento con cultivo de soja (CC3) presentó un sistema radicular menos desarrollado (figura 1b). La importancia en la exploración radicular está dada por los efectos que la misma produce al expandirse a través de la fracción mineral del suelo. Aparte de la incorporación en profundidad de materia

orgánica, las raíces generan macroporos y liberan exudados que favorecen la formación de agregados. La magnitud de tales efectos depende de la capacidad exploradora de la raíz y la expansión total de las mismas. El indicador proporción de raíces brindó información sobre la cantidad de raíces presentes en el perfil y la distribución espacial, mostró las diferencias entre las especies cultivadas en un área total de 1.2m² (2m x 0.6m). La técnica para el conteo de raíces resultó ser efectiva para la determinación de ambas variables.

3.2 PERFIL CULTURAL

A través de la metodología del perfil cultural se logró clasificar estructuras por sus propiedades físicas y biológicas detectadas a nivel visual y con ayuda de herramientas de mano. La metodología adaptada para los sistemas con siembra directa propuesta por Boizard et al (2017) permitió incluir en la clasificación la variable “actividad biológica” que resultó ser de gran importancia para la subclasificación de las estructuras básicas (Γ , Δ , Φ) descritas por Gautronneau y Manichon (1987). En el suelo Argiudol Abrúptico los 2 tratamientos con cultivos (CC y R2C) presentaron un perfil muy similar en cuanto a proporción de estructuras, sin embargo, el porcentaje de raíces fue mayor en CC. A pesar de la diferencia en el origen y el volumen de las raíces, las estructuras se clasificaron como b1 de acuerdo a su actividad biológica dado que la macroporosidad visible estuvo asociada al crecimiento de las raíces y en menor medida por otras actividades biológicas. En ambos tratamientos la generación de macroporosidad estuvo mayormente asociado a la expansión y contracción por el efecto del clima (Figura 8).

En los tratamientos con pasturas PP y R4P la presencia de actividad biológica se evidenció en un mayor número de galerías y madrigueras de lombrices (Fig 9 a). También se evidenció la mayor proporción de raíces en el perfil en ambos tratamientos. En cuanto a las estructuras identificadas como Δ se pudo verificar que a pesar de ser estructuras compactas, de alta cohesión, y que obtuvieron valores elevados de RC mantuvieron la porosidad principalmente de origen biológico pero también climático (Fig 9 b). Dichas estructuras se asociaron principalmente al tránsito de maquinaria y se manifestaron como un característico bulbo de compactación por tráfico de maquinaria. El comportamiento de las estructuras clasificadas como Φ fue similar a las de tipo Δ en lo referente a cantidad de raíces y actividad

biológica, sin embargo el grado de cohesión fue menor y los agregados presentaron menor resistencia al corte. La estructura tipo Γ se describió en los tratamientos con cultivos (CC y R2C) y estuvo asociado a los primeros centímetros del suelo.

En el suelo Argiudol Típico los cultivos no modificaron la presencia y distribución de las distintas estructuras siendo ambos perfiles similares en cuanto a disposición espacial y área total de cada una de ellas. En los tratamientos CC3 y CC4 se observó la aparición de una estructura de tipo laminar entre los 0.5 y 0.1m de profundidad en sentido horizontal a la cual se denominó estructura tipo “platy” (P). Si bien en la estructura no se visualizaba claramente la disponibilidad de los macroporos a simple vista, con la ayuda de herramientas de mano se pudo verificar dicha condición de acuerdo al sentido de las fisuras (Fig10). Dicha estructura ha sido verificada en sistemas de siembra directa sobre suelos limosos (Sasal et al. 2017a, 2017b, Sasal 2003) en sistemas de cultivo continuo. La estructura tipo P estuvo asociada a los primeros centímetros del suelo y se diferenció de la estructura tipo Γ por la disposición horizontal de los poros y mayor cohesión. La aparición de la estructura tipo Γ en CC4 estuvo directamente relacionada en una madriguera de animal que confirió al área la característica de ser una estructura de baja cohesión y fácil desagregación por lo cual no es considerado un efecto del sistema de cultivo.

La aplicación de la metodología implica que el operario deba tener práctica en la técnica. La determinación a campo de las distintas estructuras está basada en límites no siempre claros. La correcta clasificación de las estructuras es fundamental para entender los procesos por los cuales evolucionan en el tiempo de acuerdo a los usos y manejos del suelo. La metodología del Perfil Cultural aplicada en experimentos de largo plazo mostró suficiente capacidad de descripción. La utilización de dicha metodología puede ser complementada con distintos indicadores de calidad física como complementan la información.

3.3 RESISTENCIA AL CORTE

La RC resultó ser un indicador lo suficientemente sensible para detectar diferencias significativas en las estructuras descriptas por el PC. Si bien los valores promedio fueron superiores a los encontrados por otros autores (Sasal et al. 2017b) las diferencias encontradas están en concordancia con lo esperado para las distintas estructuras descriptas.

En ese sentido las estructuras tipo Δ presentaron mayores valores de RC en comparación con las estructuras tipo Φ . En los sistemas con cultivo CC y R2C la estructura tipo Γ presentó valores menores de RC. La RC en los tratamientos estuvo asociado al contenido hídrico. En el tratamiento R2C la RC mostró valores menores a los esperados lo que puede haber estado influenciado por el bajo contenido de agua que presentaba el suelo en el momento de la evaluación. La RC fue un indicador de fácil aplicación, que permitió un gran número de repeticiones y fue suficientemente sensible para detectar diferencias entre las estructuras.

3.4 SISTEMA POROSO

Para el suelo Argiudol Abrúptico el aumento de la Pest. mostró una relación directa con el aumento en la Ptot (Fig. N° 7a). Al mismo tiempo, la Ptext. fue constante dentro de cada suelo, lo cual era esperable dado que la composición mineralógica fue constante en los tratamientos. Para el suelo Argiudol Típico no se encontró relación entre la Pest. y la Ptot. La determinación de la Pest. Resultó ser compleja. La utilización de kerosene para la impregnación de los agregados resulta inconveniente tanto por ser un elemento inflamable como por los vapores que el mismo produce. La impregnación y el secado de los agregados para ser pesados en una inmersión de kerosene presentó cierta dificultad que solo la práctica puede superarla.

4. CONCLUSIONES

La utilización de la metodología del perfil cultural brindó información sobre cuál es el estado estructural del suelo en un momento determinado. La aplicación de dicha técnica en distintos sistemas de cultivo permitió la identificación de estructuras que se diferenciaron en cuanto a su grado de compactación y su resistencia al corte dentro de los tratamientos pero también entre los tratamientos. Las aplicaciones futuras de dicha metodología están condicionadas a un mayor número de repeticiones en distintos suelos y sobre distintos usos. La importancia de la identificación de los distintos tipos de estructuras que se forman en el suelo por el efecto de los cultivo en siembra directa es de vital importancia para la gestión sustentable del recuso suelo. En las rotaciones, las pasturas siempre presentaron mayor actividad biológica y mejor calidad de macroporos. En ese sentido, determinar qué tipo de pasturas se adaptan mejor a los distintos grados de compactación que el suelo presenta, mejoraría la eficiencia de las mismas en cuanto a exploración radicular y generación de macroporos lo que influye directamente sobre la calidad del suelo. En cuanto al aporte de Corg de las raíces es importante tener en cuenta que las condiciones de transformación de la materia orgánica son muy distintas a las que se presentan en la labranza convencional. En siembra directa el ambiente del suelo reductor favorece la lenta descomposición de la materia orgánica mejorando así la formación de humus en profundidad. Se verificó que las medidas de campo a través de herramientas de mano puede resultar prácticas a la hora de identificar estructuras, sin embargo, se debe tener prudencia en el uso de los valores estimados dado que los mismos son muy variables de acuerdo al contenido hídrico del suelo al momento de la determinación. El uso de la densidad aparente sigue siendo una herramienta válida para la estimación de la porosidad total del suelo, sin embargo, dicho indicador puede ser complementado con la determinación de la densidad de la densidad real del suelo y la determinación de la porosidad estructural y textural del suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez C, Taboada M, Perelman S, Morrís H. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Research*. 52. 533. 10.1071/SR13281.
- Bhattacharyya, R., Praksh, V., Kundu, S., Gupta, H.S., 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil Tillage Res.* 86, 129–140.
- Brady N, Weill R. 2008. *The Nature and properties of soil* 14th ed. Columbus, Ohio. Editorial Pearson. 975pp
- Boizard H, Peigné J, Sasal MC, Guimaraes M, Piron D, Tomis V, Vian JF, Cadoux S, Ralisch R, Tavares J, Heddadj D, De Battista J, Duparque A, Franchini JC, Roger-Estrade J. 2017 Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till, In *Soil and Tillage Research*, Volume 173, 92-103, ISSN 0167-1987
- Boizard H, Sung WY, Leonard J, Lheureux S, Cousin I, Roger-Estrade J, Richard G. 2013. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage, *Soil and Tillage Research*, Volume 127, March, 34-44.
- Boizard H, Peigné J, Capowiez Y, Roger Estrade J. 2012. Ability of the “Profile Cultural” Method to assess the soil structure of untilled layers. In *Agrociencia Volumen 16 N° 3* 221 – 226.
- Boizard H, Richard G, Roger-Estrade J, Dürr C, Boiffin J, 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France, In *Soil and Tillage Research*, Volume 64, Issues 1-2, 149-164, ISSN 0167-1987.
- De Moraes MT, Debiasi H, Carlesso R, Franchini JC, Rodrigues da Silva V, Bonini da Luz F. 2016 Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the

subtropical region of Brazil, In Soil and Tillage Research, Volume 155, Pages 351-362, ISSN 0167-1987

DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2015. Anuario Estadístico Agropecuario. [En línea]. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). Consultado Nov. 2017. Disponible en: <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2015,O,es,0>,

Draghi L, Jorajuria C, Sarena D, Bailleres M, Melani E, Castillo JM, Cerisola C, Palancar T. 2015. Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia Uruguay* V. 19 2:59-67.

Ernst O, Siri-Prieto G. 2013. Pérdida de calidad del suelo como factor limitante del rendimiento en el largo plazo. En: III Simposio Nacional de Agricultura. Paysandú. Uruguay. 157-166.

Ernst O, Siri-Prieto G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil Tillage Res.* 260-268.

García F. 2004. Cultivo Continuo en Siembra Directa o Rotaciones de Cultivos y Pasturas en Suelos Pesados del Uruguay. *Rev. Científica Agropecuaria* 8 (1), Fac. de C. Agrop.-UNER, Argentina. Conferencia Invitada al XIX Cong. Argentino de la Ciencia del Suelo y 2do. Cong. Nac. sobre Suelos Vertisólicos. Paraná- Entre Ríos. 23-29.

García F. 1992. Propiedades físicas y erosión en rotaciones de cultivos y pasturas (Soil physical properties and erosion in crop-pastures rotations). *Revista INIA-Uruguay Inv. Agr.* 1, Tomo I, pp. 127-140.

Gautronneau Y, Manichon H. 1987. Guide méthodique du profil cultural. CEREF/ISARA, Lyon, France.

Hamza MA, Anderson WK, 2003. Responses of soil properties and grain yields to Deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a Sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 54, 273-282.

- Henin, S., Gras, R., Monnier, G., 1969. *Le Profil Cultural*, 2e ed. Masson Ed., Paris.
- Horn R y Baumgartl T, 2002. *Dynamic Properties of Soil*. En Warrick AW (Eds) *Soil physics companion*. USA. Ed. CRC Press. 49 - 84.
- Martino, D.L., 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa (Management of soil physical restrictions in no-till systems). In: D´íaz Roselló, R. (Ed.), *Siembra Directa en el Cono Sur*. PROCISUR (IICA-OEA), Montevideo, pp. 225–257.
- Moreira WH, Tormena CA, Karlen D, Pires da Silva A, Keller T, Betioli E. 2016. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage, In *Soil and Tillage Research*, Volume 160, Pages 53-64, ISSN 0167-1987.
- Peigné J, Vian J, Cannavacciuolo M, Lefevre V, Gautronneau Y, Boizard H. 2013. Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profil cultural method, *Soil and Tillage Research*, Volume 127, Pages 13-25, ISSN 0167-1987
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Hakansson, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.* 102, 242–254.
- Roger-Estrade J, Richard G, Caneill J, Boizard H, Coquet Y, Défossez P, Manichon H. 2004. Morphological characterization of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil Till. Res.*, 79: 33–49.
- Salvo L, Hernández J, Ernst O. 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems, *Soil and Tillage Research*, Volume 109, Issue 2, Pages 116-122, ISSN 0167-1987.

- Salvo L, Hernández J, Ernst O. 2014. Soil organic carbon dynamics under different tillage systems in rotations with perennial pastures, *Soil and Tillage Research*, Volume 135, Pages 41-48, ISSN 0167-1987.
- Sasal MC. 2003. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires. 130pp.
- Sasal MC, Andriulo AE, Taboada MA. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Tillage Res.* 87, 9–18.
- Sasal MC, Boizard H, Andriulo A, Wilson M, Léonard J. 2017a. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and tillage Research* Volume 173, Pages 33-41, ISSN 0167-1987.
- Sasal MC, Castiglioni MG, Wilson MG. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage, *Soil and Tillage Research*, Volume 108, Issues 1-2, Pages 24-29, ISSN 0167-1987.
- Sasal MC, Léonard J, Andriulo A, Boizard H. 2017b. A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. *Soil and tillage Research*. Volume 173, Pages 42-48, ISSN 0167-1987.
- Soil Science Society of America, 1996. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison, WI, USA.
- Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30: 27-51.
- Taboada M, Micucci F, Cosentino D, Lavado R. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina, *Soil and Tillage Research*, Volume 49, Pages 57-63, ISSN 0167-1987
- Terra, J A, García Préchac, F. 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del este: Síntesis 1995 – 2000. Montevideo, INIA. Serie técnica no.125. 100 p.