



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

**TESIS DE MAGISTER EN CIENCIAS AGRARIAS**

**“Modificaciones estructurales y funcionales de epipedones  
mólicos en suelos de la región pampeana semiárida  
bajo siembra directa continua”**

Ing. Agr. Erica Susana Schmidt

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

Marzo de 2015

## PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Magister en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Agronomía durante el período comprendido entre el 13 de Mayo de 2008 y el 19 de Agosto de 2014, bajo la dirección de la Doctora Nilda Mabel Amiotti, Profesora Asociada de la Cátedra de Génesis, Clasificación y Cartografía de Suelos.

Ing Agr. Erica S. Schmidt



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el ...../...../....., mereciendo la calificación de .....(.....).

### III

#### **DEDICATORIA**

A mi abuela Elvira, por ser esa mezcla perfecta de amiga, hermana, abuela y mamá. Nonita, gracias por elegir compartir tu vida conmigo y cuidarme todos estos años.

A mi esposo Adrián, por brindarme su amor, apoyo incondicional y estar conmigo siempre, aún cuando estoy malhumorada. Gracias mi cielo por llenar mi vida de alegría.

A mis papás, que están en mi corazón y me acompañan desde el cielo.

Los amo.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar gracias a una excelente persona, mi directora Dra. Nilda Amiotti, por guiarme en mi trabajo y brindarme sus valiosos conocimientos y experiencia profesional. Pero lo más importante, gracias por creer en mí, por escucharme y estar conmigo siempre, por sus inestimables consejos y su alegría contagiosa. Tanto ella como yo sabemos que desde lo más profundo de mi corazón le agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo su confianza, cariño y amistad incondicional. Espero continuar sus pasos.

A mi hermano José Miguel y al resto de mi gran familia, por darme siempre su cariño, contención y la fortaleza para seguir adelante. En especial, a Marta y Chiche, que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme cuando los necesité.

A mis compañeros de trabajo, MSc. María del Carmen Blanco, Dr. Oscar Bravo, Mag. Pablo Zalba, Lic. Silvana Díaz e Ing. Maximiliano Garay, con los que he compartido incontables horas de trabajo. Gracias por su colaboración, el ánimo en los malos momentos y el apoyo constante, los mates compartidos y las charlas en un ambiente cálido y ameno. Son el mejor grupo que se puede pedir.

Al Depto. de Agronomía - UNS y a su personal tanto docente como no docente, que dentro de los ámbitos que a cada uno le competen me han colaborado sin ponerme ningún impedimento, con amabilidad, disposición y buena voluntad.

A la Dra. María Bonita Villamil, por su valioso asesoramiento en el tratamiento estadístico de los datos.

A los Dres. M. Gómez, H. Kruger y A. Quiroga, miembros del Jurado de esta Tesis, por sus aportes y comentarios a la versión original del manuscrito, que sin duda contribuyeron a mejorar el presente trabajo.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

## RESUMEN

La agriculturización y la aplicación de labranzas agresivas impactaron negativamente sobre el suelo provocando una pérdida de su calidad. En la exploración de opciones para mitigar o revertir los procesos generados, surgen las prácticas de Agricultura de Conservación. En este contexto, la siembra directa (SD) adquiere una dimensión particular reemplazando a otros sistemas en la región pampeana, extendiéndose progresivamente a la zona semiárida con resultados no siempre consistentes respecto de los beneficios que reporta su adopción sobre las propiedades edáficas superficiales. En esta tesis se propuso cuantificar el impacto de la implementación de SD como sistema continuo en condiciones de aplicación no controladas, para lo cual se trabajó sobre 27 lotes en producción de la región pampeana semiárida sur. Los objetivos incluyeron: i) evaluar el comportamiento de propiedades bioquímicas y físicas en profundidades diferenciales de los epipedones de Paleustoles petrocálcicos con diferente textura superficial bajo SD continua y labranza reducida (LR), contemplando las secuencias de cultivos más comunes en la región y ii) identificar propiedades que resultan sensibles para señalar modificaciones en la calidad edáfica. Se tomaron muestras a 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm, y se determinó: pH, carbono orgánico total (COT) y particulado, nitrógeno total y particulado, fósforo disponible, actividad biológica, índice estructural (IE), densidad aparente (Dap), Dap crítica y Dap máxima, compactación relativa, estabilidad estructural (EE) a partir del cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP), porosidad total, distribución por tamaño de poros, contenidos de agua y resistencia a la penetración a campo. El diseño fue completamente aleatorizado y se empleó el procedimiento modelos lineales generales y mixtos (InfoStat). También se utilizaron análisis de componentes principales y discriminante canónico (AD). La mayoría de los parámetros evaluados resultaron sensibles para detectar cambios en la calidad del suelo bajo los distintos tratamientos comparados. El contraste con LR mostró que SD no contribuyó a incrementar el COT, observándose además un deterioro de la condición física manifestada por una marcada pérdida de EE y desarrollo de procesos de compactación asociados al tránsito. La aplicación de SD continua con secuencias de cultivos invernales y estivales, tuvo un efecto perjudicial más acentuado sobre los parámetros bioquímicos y físicos del epipedón respecto a secuencias de cultivos invernales. Los suelos de textura más fina presentaron mejores cualidades agrícolas, aunque los valores registrados para el IE señalan la existencia de riesgos de degradación física. Si bien el comportamiento del suelo bajo SD es altamente sitio dependiente, los resultados obtenidos permiten adelantar que los procesos de degradación descriptos son extendidos en la región. Los análisis multivariados, y en particular el AD, señalaron a las propiedades IE, CDMP y COT como indicadores de calidad del suelo adecuados para la

zona de estudio. Asimismo, el mayor deterioro registrado en 5-10 cm muestra a esa profundidad como la más apropiada para realizar seguimientos temporales de variables edáficas. Los procesos de degradación cuantificados indican la necesidad de replantear la forma de operar la SD si se persigue su viabilidad a largo plazo en el marco de un desarrollo agrícola sustentable.

**ABSTRACT**

Agriculturization and the application of aggressive plowing negatively impact on soils causing losses of their quality. Exploring options to mitigate or reverse the generated processes appear practices of Conservation Agriculture. In this context, no-till acquires a particular dimension replacing other systems in the pampean region being progressively extending to the semiarid region with results not always consistent respect the benefits on surface soil properties reported by its application. The quantification of impacts generated by applying no-till as a continuous system *on-farm* management practices was proposed in this thesis, as such the work was developed in 27 production plots in the southern pampean semiarid region. The objectives included: i) evaluate the behavior of biochemical and physical properties at different depths of epipedons of Petrocalcic Paleustolls having different surface texture under continuous no-till and reduced till, considering the most common crop sequences in the region, and ii) identify sensitive indicators to point changes on soil quality. Samples were collected at 0-5 cm, 5-10 cm and 10-18 cm to determine: pH, total organic carbon (TOC) and particulate organic carbon (POC), total and particulate nitrogen, available phosphorous, biological activity, structural index (SI), bulk density, critical bulk density and maximum soil bulk density, relative compaction, structural stability (SE) from the change in mean weight diameter (CMWD), total porosity, pore size distribution, water contents, penetration resistance at field conditions. The design was completely randomized, general and mixed linear models (InfoStat) were applied and principal components and canonical discriminant analysis (DA) were used. The majority of evaluated parameters were sensitive to detect changes on soil quality under the different compared treatments. Contrasting with reduced till showed that no-till have not contributed to increase TOC, showing also deterioration in physical conditions expressed by a marked loose of SE and compaction process associated to transit. Application of continuous no-till with winter and summer crop sequences had a more pronounced negative effect over biochemical and physical parameters of the epipedon respect to winter crop sequences. Soils with the finer texture had better cropping quality, although values obtained for SI indicated risks for physical degradation. Multivariate analysis and DA in particular, pointed the properties SI, CMWD and TOC as adequate soil quality indicators for the studied region. Moreover, the major deterioration observed at 5-10 cm proved this is the more convenient depth to monitoring soil variables over time. The quantified degradation processes indicated the need of modify the mode of operation of no-till if its long term viability is expected in the frame of sustainable agriculture development.

## INDICE TEMÁTICO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Antecedentes sobre los efectos de la aplicación de SD continua en nuestro país....	5
1.2. Incidencia de la secuencia de cultivos y la textura del horizonte superficial .....	8
1.3. Indicadores de calidad de suelos .....	11
<b>2. PLANTEO DEL PROBLEMA, OBJETIVOS GENERALES E HIPÓTESIS</b> .....	13
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	17
3.1. Caracterización del área de estudio .....	17
3.1.1. Ubicación .....	17
3.1.2. Aspectos climáticos y edafoclimáticos.....	18
3.1.3. Características de los suelos estudiados .....	19
3.1.4. Uso de la tierra y prácticas de manejo .....	20
3.2. Metodología de la investigación .....	21
3.2.1. Consideraciones generales.....	21
3.2.2. Tratamientos .....	22
3.2.3. Toma de muestras .....	26
3.2.4. Determinaciones de laboratorio.....	26
3.2.5. Determinaciones de campo.....	28
3.3. Análisis estadístico .....	29
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	32
4.1. Características de la superficie del suelo y morfología del epipedón.....	32
4.2. Parámetros bioquímicos .....	33
4.2.1. pH actual.....	33
4.2.2. Carbono orgánico total.....	35
4.2.3. Nitrógeno total y Relación C/N .....	38
4.2.4. Fósforo disponible.....	42
4.2.5. Carbono orgánico y Nitrógeno asociados a las fracciones de suelo >100 $\mu\text{m}$ y < 100 $\mu\text{m}$ .....	44
4.2.5.1. Carbono orgánico particulado y Relación COP/COT .....	44
4.2.5.2. Carbono orgánico recalcitrante .....	47
4.2.5.3. Nitrógeno particulado y Relación NP/NT .....	48
4.2.5.4. Nitrógeno recalcitrante .....	50
4.2.5.5. Relaciones COP/NP y COR/NR .....	52
4.2.6. Índice estructural.....	52
4.2.7. Actividad biológica .....	54
4.2.8. Índice de estratificación.....	56
4.3. Parámetros físicos .....	57

4.3.1. Densidad aparente.....	57
4.3.2. Densidad aparente máxima y Compactación relativa.....	61
4.3.3. Estabilidad estructural.....	67
4.3.4. Porosidad total y Distribución por tamaño del espacio de poros.....	73
4.3.5. Curvas de retención hídrica y Contenidos de agua útil.....	79
4.3.6. Resistencia a la penetración .....	82
4.4. Análisis multivariado .....	84
4.4.1. Análisis de componentes principales .....	84
4.4.2. Análisis discriminante.....	87
<b>5. SÍNTESIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>92</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores medios de pH actual para las distintas combinaciones evaluadas .....	34
Tabla 2. Valores medios de carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas.....	35
Tabla 3. Valores medios de carbono orgánico total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas.....	38
Tabla 4. Valores medios de nitrógeno total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas .....	39
Tabla 5. Valores medios de relación C/N para las distintas combinaciones evaluadas ....	41
Tabla 6. Valores medios de fósforo disponible ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas .....	43
Tabla 7. Valores medios de relación carbono orgánico particulado/carbono orgánico total para las distintas combinaciones evaluadas .....	46
Tabla 8. Valores medios de relación nitrógeno particulado/nitrógeno total para las distintas combinaciones evaluadas.....	50
Tabla 9. Valores medios de relación carbono orgánico recalcitrante/nitrógeno recalcitrante para las distintas combinaciones evaluadas .....	52
Tabla 10. Valores medios de índice estructural para las distintas combinaciones evaluadas .....	53
Tabla 11. Valores de densidad aparente crítica ( $D_{apc}$ ) y densidad aparente ( $D_{ap}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas .....	60
Tabla 12. Parámetros derivados de las curvas Proctor para el horizonte superficial de los suelos (0-18 cm) para las distintas combinaciones evaluadas .....	63
Tabla 13. Valores medios de densidad aparente máxima ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas.....	64
Tabla 14. Valores medios de compactación relativa (%) para las distintas combinaciones evaluadas .....	66
Tabla 15. Valores medios de diámetro medio ponderado en seco (DMPs, mm), diámetro medio ponderado en húmedo (DMPH, mm) y cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP, mm) para las distintas combinaciones evaluadas.....	71
Tabla 16. Contenidos medios de agua útil (%) para las distintas combinaciones evaluadas .....	81
Tabla 17. Valores de resistencia a la penetración (RP, Mpa) en el epipedón de los suelos para las distintas combinaciones evaluadas .....	83
Tabla 18. Autovalores del análisis de componentes principales.....	85
Tabla 19. Correlación entre las variables y las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) .....	85
Tabla 20. Matriz de correlación de las variables consideradas en el análisis de componentes principales .....	86
Tabla 21. Autovalores del análisis discriminante.....	88
Tabla 22. Coeficientes de las funciones discriminantes (datos estandarizados con las varianzas comunes).....	88

Tabla 23. Centroides de las distintas combinaciones en el espacio discriminante formado por los ejes canónicos 1 y 2.....	90
Tabla 24. Tabla de clasificación obtenida a partir del análisis discriminante .....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la superficie bajo siembra directa en Argentina, campañas 1977/78 a 2010/11 (Modificado de AAPRESID, 2012) .....	3
Figura 2. Evolución de la superficie bajo siembra directa medida como porcentaje del total de la superficie agrícola en Argentina, campañas 1977/78 a 2010/11 (Modificado de AAPRESID, 2012) .....	4
Figura 3. Ubicación del área de estudio.....	17
Figura 4. Aspecto de la superficie del suelo en las distintos tratamientos evaluados .....	25
Figura 5. Evidencias morfológicas de deterioro de la macroestructura bajo SD.....	33
Figura 6. Evolución de los contenidos de nitrógeno total (NT, Mg ha <sup>-1</sup> ) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa (p<0,10) .....	40
Figura 7. Contenidos de carbono orgánico particulado (COP, Mg ha <sup>-1</sup> ) en el epipedón de los suelos para las distintas combinaciones evaluadas. Letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones (p<0,10). Las barras indican el valor del error estándar de las medias .....	44
Figura 8. Contenidos de carbono orgánico particulado (COP, Mg ha <sup>-1</sup> ) y carbono orgánico recalcitrante (COR, Mg ha <sup>-1</sup> ) a las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm para las distintas combinaciones evaluadas. Para cada profundidad, letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones en el COR (p<0,10). Las barras indican el valor del error estándar de las medias .....	48
Figura 9. Contenidos de nitrógeno particulado (NP, Mg ha <sup>-1</sup> ) en el epipedón de los suelos para las distintas combinaciones evaluadas. Letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones (p<0,10). Las barras indican el valor del error estándar de las medias .....	49
Figura 10. Contenidos de nitrógeno particulado (NP, Mg ha <sup>-1</sup> ) y nitrógeno recalcitrante (NR, Mg ha <sup>-1</sup> ) a las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm para las distintas combinaciones evaluadas. Para cada profundidad, letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones en el NR (p<0,10). Las barras indican el valor del error estándar de las medias.....	51
Figura 11. Contenidos de materia orgánica (MO, g kg <sup>-1</sup> ) y relación MO/arcilla+limo para el epipedón de los suelos en las distintas combinaciones evaluadas .....	54
Figura 12. Evolución de la actividad biológica (AB, mg CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> ) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa (p<0,10) .....	55
Figura 13. Evolución de la densidad aparente (Dap, Mg m <sup>-3</sup> ) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa (p<0,10).....	58
Figura 14. Relación de la densidad aparente (Dap, Mg m <sup>-3</sup> ) con la humedad del suelo (%) (curvas Proctor) en las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm bajo a) LR15FG1, b) SD10FG1, c) SD15FG1, d) SD15FB1, e) SD15FF1 y f) SD15FG2.....	63
Figura 15. Relación entre la densidad aparente máxima (Dap máx., Mg m <sup>-3</sup> ) con a) el contenido de carbono orgánico total (COT, g kg <sup>-1</sup> ) y b) la humedad crítica (HC, %) para las distintas combinaciones evaluadas .....	65
Figura 16. Porcentaje de agregados luego del tamizado en seco para las distintas combinaciones evaluadas, a) 0-5 cm, b) 5-10 cm y c) 10-18 cm.....	70

### XIII

- Figura 17. Porcentaje de agregados luego del tamizado en húmedo para las distintas combinaciones evaluadas, a) 0-5 cm, b) 5-10 cm y c) 10-18 cm..... 70
- Figura 18. Evolución de la porosidad total (Pt, %) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa ( $p < 0,10$ ) ..... 73
- Figura 19. Distribución por tamaño de poros en las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm para a) LR15FG1, b) SD10FG1, c) SD15FG1, d) SD15FB1, e) SD15FF1 y f) SD15FG2..... 78
- Figura 20. Curvas hídricas para las profundidades de a) 0-5 cm, b) 5-10 cm y c) 10-18 cm para las distintas combinaciones evaluadas. CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, PS: punto de saturación..... 80
- Figura 21. Biplot en el plano de las dos primeras componentes principales. COT: carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ); COP: carbono orgánico particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); NP: nitrógeno particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); CR: compactación relativa (%); Dap: densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ); CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado (mm); MO/a+L: índice estructural ..... 87
- Figura 22. Variables en el plano conformado por los ejes canónicos 1 y 2. COT: carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ); COP: carbono orgánico particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); MO/a+L: índice estructural; CR: compactación relativa (%); CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado (mm) ..... 89
- Figura 23. Representación de las observaciones de las seis combinaciones en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2 del análisis discriminante. Contornos corresponden a elipses de confianza del 95% ..... 91

**ABREVIATURAS**

- ACP: análisis de componentes principales  
AD: análisis discriminante canónico  
AU: agua útil (%)  
C: carbono  
CC: capacidad de campo  
CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (mm)  
COP: carbono orgánico particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )  
COR: carbono orgánico recalcitrante ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )  
COT: carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$  o  $\text{Mg ha}^{-1}$ )  
CR: compactación relativa (%)  
Dap: densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ )  
Dapc: densidad aparente crítica ( $\text{Mg m}^{-3}$ )  
Dap máx.: densidad aparente máxima ( $\text{Mg m}^{-3}$ )  
DMPs: diámetro medio ponderado de los agregados en seco (mm)  
DMPs: diámetro medio ponderado de los agregados en húmedo (mm)  
EE: estabilidad estructural  
FA: textura franco arenosa  
F-Fa: textura franca a franco arcillosa  
HC: contenido de humedad crítico del suelo donde se alcanza la Dap máx. (%)  
IE: índice estructural (relación MO/arcilla+limo)  
LV: labranza vertical  
LR: labranza reducida  
MO: materia orgánica  
mP: mesoporos (poros de diámetro entre  $9-0,2 \mu\text{m}$ )  
MP: macroporos (poros de diámetro  $> 9 \mu\text{m}$ )  
N: nitrógeno  
NP: nitrógeno particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )  
NR: nitrógeno recalcitrante ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )  
NT: nitrógeno total ( $\text{g kg}^{-1}$  o  $\text{Mg ha}^{-1}$ )  
Pd: fósforo disponible ( $\text{mg kg}^{-1}$ )  
PMP: punto de marchitez permanente  
PS: punto de saturación  
Pt: porosidad total (%)  
RHS: régimen de humedad del suelo  
RP: resistencia a la penetración (MPa)  
RTS: régimen de temperatura del suelo

SD: siembra directa

$\mu$ P: microporos (poros de diámetro  $< 0,2 \mu\text{m}$ )

**Certifico que en el presente ejemplar fueron incluidos los cambios y correcciones sugeridas por los jurados.**

**Dra. Nilda Amiotti  
Directora de Tesis**

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las geoformas estabilizadas de la región pampeana sur argentina se caracterizan por presentar suelos aptos para la producción de alimentos cuyas propiedades originales resultan de una combinación de factores favorables tales como materiales parentales de reacción básica, con alta reserva de minerales meteorizables y, en condiciones prístinas, importante actividad biológica y elevada producción de biomasa.

El hombre altera la estructura y funcionamiento de los ecosistemas mediante la aplicación de paquetes tecnológicos y modelos de gestión con el fin de dirigir la energía fijada hacia la obtención de bienes con valor de mercado, en general a corto plazo. Las tensiones generadas por los distintos usos y manejos de la tierra pueden producir una declinación de su capacidad o habilidad para generar servicios ecosistémicos (Rydberg *et al.*, 2007). Cada ecosistema tiene una particular resiliencia y resistencia al cambio, y la magnitud del disturbio que el suelo puede absorber antes de que ocurran modificaciones en su integridad funcional y estructural, varía con el tipo particular de suelo y con la intensidad del estrés al que es sometido. Si el disturbio es drástico o si el sistema es frágil el daño ocasionado puede ser permanente o muy costoso de revertir (Amiotti *et al.*, 2007).

Los Molisoles, son en general suelos fértiles, estando su productividad fuertemente condicionada por las características del clima en el que evolucionan. Sin embargo, su capacidad para producir alimentos, asociada a sus cualidades iniciales, se ve seriamente afectada debido a los problemas de degradación relacionados con el deterioro de los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, con el consiguiente efecto de disminución sobre la productividad y la producción en general (Lal, 2000). Aceptar que todos los manejos agrícolas tienen potencial para degradar el recurso suelo y el ambiente es el punto de partida para buscar prácticas mitigantes.

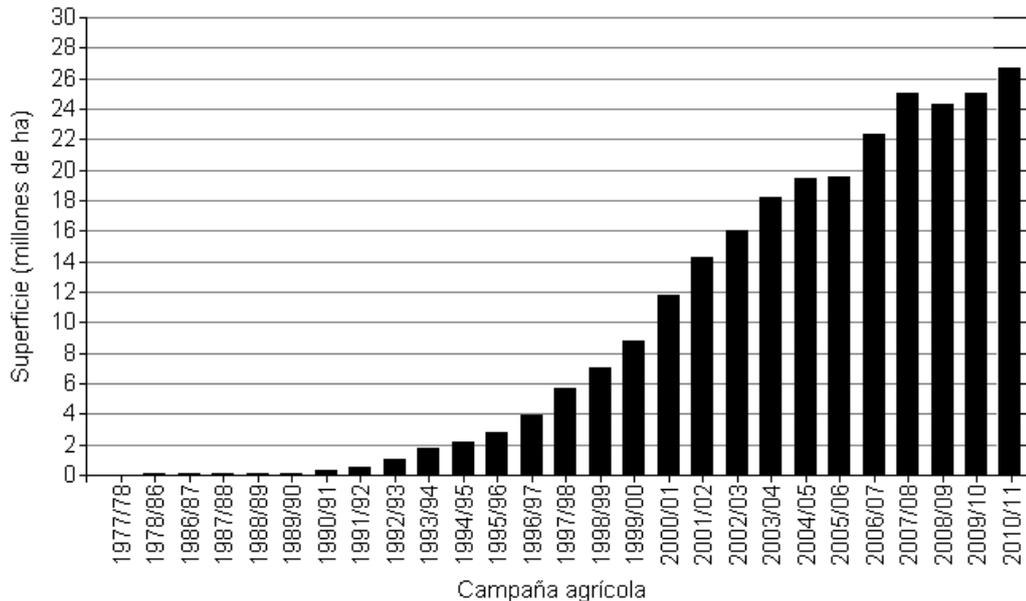
La agricultura en la Argentina es una práctica de gran magnitud tanto en términos económicos como en extensión de áreas cultivadas. La región pampeana (zona agrícola por excelencia) comprende la zona templada conocida como pampa húmeda y se extiende a la zona subhúmeda y semiárida, donde las precipitaciones son más escasas y la estacionalidad climática es más marcada. En las últimas dos décadas, el uso de la tierra en la región pampeana sufrió profundas transformaciones vinculadas al reemplazo de los planteos mixtos de producción por sistemas de agricultura continua. Estos cambios respondieron principalmente a cuestiones climáticas (aumento de las precipitaciones hacia el oeste de la región a partir de la década del 70) y a factores económicos que favorecieron a los planteos agrícolas sobre los ganaderos (Magrin *et al.*, 2005; Álvarez *et*

*al.*, 2008). A este avance de la agricultura por sobre otras producciones y ecosistemas naturales se lo conoce como agriculturización (Leguía *et al.*, 2008), la cual sumada al uso de labranzas agresivas ha tenido un fuerte impacto sobre el ambiente y el suelo, dando como resultado una pérdida de su calidad (Galantini & Rosell, 1997; Álvarez *et al.*, 2008; Viglizzo & Jobbágy, 2010). En la región semiárida pampeana, disminuciones en los niveles de carbono orgánico total (COT) del orden del 20-50 % (Hall *et al.*, 1992) y alteraciones físicas manifestadas por la pérdida de agregación, con formación de peds muy pequeños de baja estabilidad y por ende fácilmente erosionables, así como la génesis de densipanes, son procesos comunes (Díaz-Zorita & Grosso, 2000; Amiotti *et al.*, 2012).

Las consecuencias medioambientales y económicas del deterioro del recurso de base obligan a un serio replanteo de las asignaciones de uso y a la adopción de tecnología y prácticas tendientes a minimizar y/o revertir los procesos desencadenados por la aplicación de manejos inadecuados. En los últimos años se observa una creciente preocupación por parte de investigadores, técnicos y productores referida a la búsqueda de un adecuado planeamiento global de uso del suelo, lo que resulta esencial tanto para cubrir la demanda creciente de alimentos, como para preservar el ambiente. En la exploración de nuevas opciones, surgieron las prácticas agronómicas englobadas bajo el nombre de "Agricultura de Conservación", las que tienen como objetivo promover una alternativa sustentable para sustituir los usos tradicionales que incluyen las labranzas agresivas y conducen a la degradación del suelo (FAO, 2012). La agricultura de conservación se basa en tres principios agronómicos: la mínima perturbación del suelo, la retención de niveles racionales de rastrojos y el uso de rotaciones agrícolas adecuadas (Hobbs *et al.*, 2008). Los sistemas de labranza encuadrados en dicha definición son aquellos que presentan aproximadamente un 30% o más de cobertura en el suelo al momento de la siembra (FAO, 2012). Las ventajas en cuanto a la reducción de costos y al uso más eficiente del agua permitieron que estos sistemas fueran ampliamente adoptados desde hace más de treinta años en países con grandes superficies de agricultura de secano como Argentina, Australia, Brasil, Canadá y Uruguay (Derpsch, 2008).

En este contexto, la siembra directa (SD) como herramienta tecnológica que persigue la sustentabilidad de los sistemas productivos ha adquirido una dimensión particular, alcanzando en el mundo 100 millones de hectáreas, de las cuáles la mitad se ubican en América del Sur (Kassam *et al.*, 2009). En nuestro país esta tecnología se expande (Fig. 1), reemplazando a otros sistemas de laboreo conservacionistas (como labranzas reducidas y/o verticales) y a las labranzas convencionales.

Si bien los primeros trabajos de investigación con rigor científico en SD se iniciaron en el año 1974, su difusión fue prácticamente nula por al menos 15 años, cuando la confluencia de una generalización de los problemas de erosión de suelos, el aumento de los costos operativos y la aparición de herbicidas más económicos y eficaces para el control de malezas hicieron de este sistema una tecnología económicamente viable (AAPRESID, 2012).

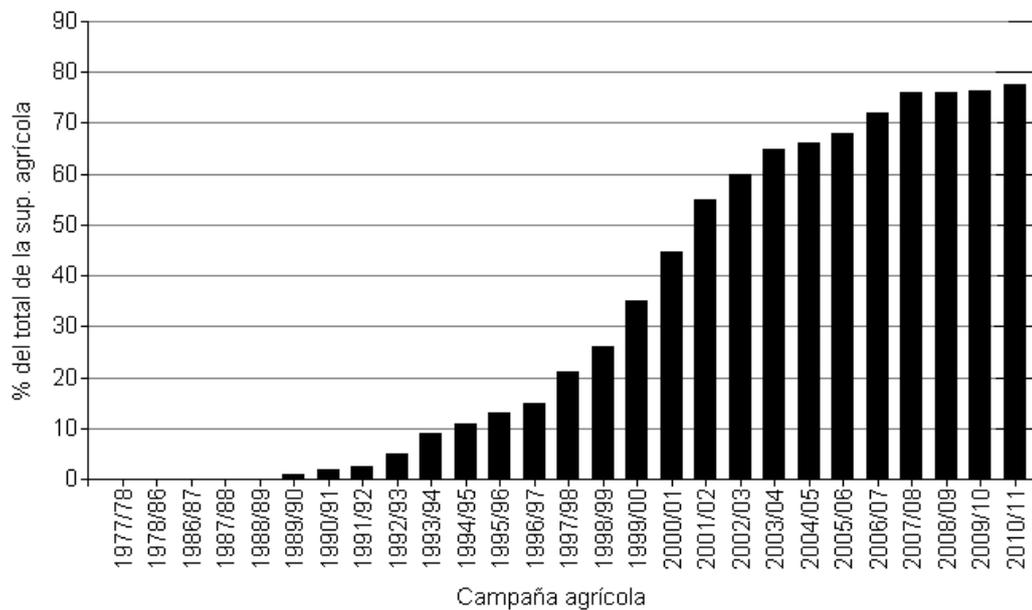


**Figura 1.** Evolución de la superficie bajo siembra directa en Argentina, campañas 1977/78 a 2010/11 (Modificado de AAPRESID, 2012).

En la campaña 1977/1978, la superficie total sembrada en el país fue de 20,5 millones de hectáreas, y sólo 5.000 de ellas se hicieron en SD. Luego su crecimiento fue exponencial, alcanzando en la campaña 2004/2005, un total de 19,5 millones de ha para un área total cultivada de 29,1 millones de ha. En 2010/2011, la superficie bajo este sistema fue de 27 millones de ha, lo que representa cerca del 78% del total del área agrícola del país (AAPRESID, 2012) (Fig. 2). Cabe aclarar que en la región semiárida bonaerense, a raíz de cuestiones culturales y económicas, la adopción de la SD aún es escasa (menor al 30%), observándose en los últimos años una tendencia clara de expansión del sistema (López *et al.*, 2014).

Los cultivos que bajo SD cubren una mayor superficie son la soja (*Glycine max*) con un porcentaje aproximado al 90%, seguido por el trigo (*Triticum aestivum*) y el maíz (*Zea mays*) con aproximadamente el 85% (AAPRESID, 2012). Al igual que en otras regiones templadas del mundo la difusión de esta tecnología en el país se vinculó a su simplicidad

operativa, a su eficiencia para minimizar los riesgos de erosión y acumular agua en el perfil, a la reducción en el uso de combustibles fósiles y al aumento en el secuestro de carbono (C) en el suelo, contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Lal *et al.*, 2007; Strudley *et al.*, 2008).



**Figura 2.** Evolución de la superficie bajo siembra directa medida como porcentaje del total de la superficie agrícola en Argentina, campañas 1977/78 a 2010/11 (Modificado de AAPRESID, 2012).

La SD se ha difundido entre los productores de los seis cultivos más importantes de EEUU abarcando aproximadamente el 35,5% de la superficie sembrada en el año 2009 (ERS Report Summary, 2009). Sin embargo, esta no se utiliza comúnmente como sistema de producción en forma continua (CTIC, 1998; Derpsch, 2009; Derpsch *et al.*, 2010) ya que su duración promedio es de 1,4 a 2,4 años, introduciendo luego labranzas convencionales y/o verticales (LV) (Hill, 2001). Las razones para realizar este tipo de manejo son tanto agronómicas como económicas. Dentro del primer grupo, se citan ventajas tales como la mineralización del nitrógeno (N) del suelo, la disminución de la densidad aparente (Dap) y la interrupción del ciclo de plagas y enfermedades. Por ejemplo, muchos productores del centro-oeste utilizan una rotación de maíz bajo labranza convencional seguido por soja bajo SD mientras que en el oeste, las labranzas periódicas se usan para el control del *Bromus tectorum* y otras malezas anuales invernales (Wicks, 1997; Kettler *et al.*, 2000). Entre las razones económicas para la disrupción de la SD se considera la reducción en los costos de producción asociados con el incremento en el uso de herbicidas (Yiridoe *et al.*, 2000; Martens, 2001).

En contraposición, en nuestro país la SD fue inicialmente promovida y adoptada como un sistema de producción continuo y es recién en los últimos años donde la percepción sobre la existencia de compactación de los primeros cm del epipedón en sistemas sin labranza, más el efecto de densificación subsuperficial heredado de años de agricultura efectuada con labranzas convencionales, han llevado a proponer la interrupción mecánica de capas compactadas con implementos de LV profunda (como “paratill” y “paraplow”). Sin embargo, los resultados de estos estudios no son concluyentes en cuanto a la mejora de las propiedades físicas del suelo y en consecuencia en el rendimiento de los cultivos, ni en la perdurabilidad de la práctica en el tiempo (Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2006).

### **1.1. Antecedentes sobre los efectos de la aplicación de SD continua en nuestro país**

La agricultura constituye una forma de intervención del hombre sobre los sistemas naturales. El fin del laboreo del suelo es proveer las condiciones necesarias para la correcta implantación y crecimiento de los cultivos, acción que altera su equilibrio natural. Si bien todas las labranzas afectan al ambiente edáfico, cada una lo hace con diferente intensidad y a distintas profundidades (Gregorich *et al.*, 1997). Debido a la acumulación de rastrojos sobre la superficie y a la no remoción del suelo, la aplicación del sistema de SD en forma continua conduce a condiciones edáficas que difieren marcadamente de las existentes bajo sistemas de labranza tradicionales, principalmente en los primeros centímetros del perfil. Los mayores beneficios derivados del mantenimiento de la cobertura, especialmente en regiones subhúmedas y semiáridas, provienen de la protección que ésta ejerce sobre la superficie del suelo contra la acción directa del viento y del agua. Numerosos autores (Taboada & Micucci, 2002a; Lal *et al.*, 2007; Strudley *et al.*, 2008) han demostrado que la presencia de residuos neutraliza la energía de la gota de lluvia, disminuyendo el desprendimiento de partículas y atenuando la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de erosión. Bajo condiciones de no laboreo se propician como procesos de agregación, la “cohesión” y mecanismos biológicos de “adhesión”, resultantes del aglutinamiento favorecido por los exudados rizosféricos, y el “entretejido” debido a la acción directa de las raíces e hifas de hongos (Degens, 1997), que unen microagregados en macroagregados (Bossuyt *et al.*, 2002). De este modo, la mayor actividad biológica bajo SD contribuiría a mejorar la estabilidad estructural (EE). También se citan mejoras en la acumulación de humedad en el suelo, debido a una mayor captación de agua (Taboada & Micucci, 2002a), menores pérdidas por evaporación y aumentos en la microporosidad del suelo (Ferrerías *et al.*, 1999). Sin embargo, reportes

más recientes contradicen esta tendencia favorable (Micucci & Taboada, 2006; Sasal *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008; Strudley *et al.*, 2008). Estos autores señalan que si bien la EE es generalmente mayor en la superficie de los suelos bajo SD, esto no necesariamente resulta en una mayor macroporosidad o infiltración de agua, debido a que se ha descrito la presencia de agregados de morfología laminar con predominio de huecos horizontales en la región pampeana húmeda (Morrás *et al.*, 2004; Bonel *et al.*, 2005, Sasal *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009; Soracco *et al.*, 2010). Dichos trabajos reportan, además, la existencia de compactación en el horizonte superficial resultado de la compresión vertical que genera el tránsito de la maquinaria y la no inversión de la gleba. El efecto adverso de la estructura laminar en superficie radica en que ésta restringe el ingreso de agua al suelo. Sasal *et al.* (2010) informan que un aumento de la proporción de este tipo de estructura desfavorable en el horizonte superficial de 20 a 50% puede duplicar las pérdidas de agua por escurrimiento.

La compactación del suelo está definida como el proceso por el cual las partículas sufren un reacomodamiento, agrupándose y disminuyendo el espacio poroso con el consecuente incremento de la Dap (Soil Science Society of America, 1996). Esta densificación puede tener dos orígenes bien diferenciados; uno correspondiente al fenómeno de inestabilidad de los elementos estructurales por pérdida de cohesión que conducen a la formación de una capa masiva, fundamentalmente en lotes de agricultura continuada sin rotación con praderas y otro asociado al efecto de compactación de las herramientas y rodados sobre el suelo (Pecorari *et al.*, 1990). En sistemas agrícolas este proceso afecta negativamente el crecimiento de las raíces y la productividad de los cultivos especialmente en años secos, aumenta los requerimientos de energía requeridos para las operaciones de labranzas, disminuye el movimiento de agua y la infiltración e incrementa los procesos de erosión, entre otros efectos (Passioura, 2002). En la actualidad, este fenómeno de carácter acumulativo se ha transformado en un problema de importancia mundial debido a: i) el uso de tractores e implementos de labranza, cultivo y cosecha cada vez de mayor tamaño y/o un mayor número de pasadas, ii) aumento en la intensidad de uso del suelo y iii) en algunas regiones la puesta bajo cultivo de áreas marginales de menor aptitud agrícola (Hamza & Anderson, 2005). Las investigaciones realizadas por Soane & van Ouwerkerk (1994) y Radford *et al.* (2000) han permitido demostrar que más del 60% de la superficie del suelo es anualmente afectada por el tránsito bajo sistemas de labranza reducida (LR), mientras que bajo SD este porcentaje se eleva al 80-90%. La literatura señala un incremento de la compactación superficial bajo SD, con disminuciones de la porosidad total (Quiroga *et al.*, 1998a; Van der Bygaart *et al.*, 1999; Vidal & Costa, 2000), aumentos en la Dap en la mayoría de los ensayos

(Studdert & Echeverría, 2002; Sasal *et al.*, 2006; Mc Vay *et al.*, 2006), e incrementos en la resistencia a la penetración (Díaz-Zorita, 1999; Álvarez & Steinbach, 2009) con respecto a otros sistemas de labranza. Esta mayor densificación del suelo puede presentar problemas para el desarrollo de las raíces de los cultivos (Lattanzi *et al.*, 2004), sin embargo, algunos autores han comprobado que en suelos bien estructurados o con presencia de biocanales el desarrollo radicular no se ve limitado aún con valores de resistencia a la penetración (RP) elevados (Lampurlanés & Cantero Martínez, 2003).

El contenido de materia orgánica (MO) es una de las propiedades del suelo más alteradas por las prácticas de manejo (Haynes, 2005), determinando si el suelo se comporta como fijador de C (secuestro) o como emisor de dióxido de carbono por mineralización del COT (Studdert & Echeverría, 2002). La mayoría de los estudios a largo plazo muestran un aumento de la MO del suelo en sistemas sin labranza y principalmente en los primeros centímetros del perfil, produciéndose una estratificación de la misma (Studdert & Echeverría, 2002; Díaz-Zorita *et al.*, 2004). En la región semiárida de Canadá se ha comprobado que los suelos destinados a trigo que pasan de labranza convencional a SD pueden secuestrar de 5-6 Mg de C ha<sup>-1</sup> por incremento en los contenidos de MO y residuos superficiales (Curtin *et al.*, 1998). Para la pampa ondulada argentina, Andriulo *et al.* (2001) estimaron una tasa de acumulación anual de 0,1 Mg COT ha<sup>-1</sup> por adopción de la SD en los primeros 20 cm del perfil de suelo, en un período de 20-30 años.

Otros autores señalan que la SD resultaría en una mayor conservación de la MO superficial, pero la actividad biológica no sería suficiente para incorporarla más allá de unos pocos milímetros de profundidad (Bonel *et al.*, 2005). En contraste, bajo LR hay una incorporación más profunda de la MO aunque con mayor degradación (Bonel *et al.*, 2005). De este modo el balance final de la MO del horizonte superficial sería similar entre ambos tratamientos (Micucci & Taboada, 2006; Blanco-Canqui & Lal, 2008).

El cambio en la disposición de los residuos bajo SD también afecta el ciclado, la distribución y la dinámica de los nutrientes en el suelo (Hedley *et al.*, 1982). Por ello, a pesar del incremento de MO señalado por muchos autores, es posible esperar durante los primeros años una menor disponibilidad inicial de nutrientes debido a la mineralización más lenta de la fracción orgánica (Kruger *et al.*, 2005). En el corto plazo se observa un menor suministro de nitrógeno inorgánico (Power *et al.*, 1983); ocasionando una mayor respuesta a la adición de fertilizantes nitrogenados. Esta menor disponibilidad de N para los cultivos es considerada uno de los factores responsables de la baja producción inicial de biomasa en relación a otros sistemas de labranza (Falotico *et al.*, 1999).

A largo plazo, y asociado a la estratificación del COT, los contenidos de N total (NT), fósforo orgánico y fósforo disponible (Pd) muestran un aumento y acumulación superficial bajo SD (Giuffré *et al.*, 1997; Essington & Howard, 2000; Crespo *et al.*, 2001). Por tratarse de un nutriente de escasa movilidad, bajo SD se produce una marcada disminución en las concentraciones de Pd con la profundidad lo que favorecería una mayor producción de raíces en los primeros centímetros del perfil (Cocacevich *et al.*, 1998; Selles *et al.*, 1999). Esta situación resultaría desfavorable si se considera que en períodos de estrés hídrico podría producirse un secado rápido superficial reduciendo la tasa de difusión y por ende la cantidad de fósforo que llega a la raíz (Barber, 1980). Para suelos del SE de la provincia de Bs. As., tal estratificación ha sido comprobada por Calviño *et al.* (2002) en cultivos de trigo bajo SD.

Finalmente, existen plagas que se desarrollan casi exclusivamente en suelos poco disturbados y con humedad resguardada por residuos vegetales, presentando un aumento en su densidad con los sucesivos años sin laboreo. Dentro de este grupo, los mayores daños reportados han sido ocasionados por complejos de “babosas” y “bichos bolita” (*Armadillium vulgare*). Otros organismos como el “gusano blanco” (*Diloboderus abderus*) han incrementado su densidad bajo sistemas de SD, dadas las condiciones favorables para su desarrollo (Carmona, 2005).

## **1.2. Incidencia de la secuencia de cultivos y la textura del horizonte superficial**

Para que la SD exprese al máximo sus beneficios es necesario contar con un adecuado nivel de cobertura del suelo, lo cuál se logra a través de una apropiada elección de las especies utilizadas en el cultivo y su rotación (Benavides *et al.*, 2008; Revelli *et al.*, 2010). Por otra parte, las características intrínsecas de los suelos, particularmente aquellas vinculadas a su granulometría, ejercen una marcada influencia sobre el comportamiento de los parámetros bio-químicos que determinan la fertilidad del horizonte superficial mineral.

En términos generales, la rotación es la siembra sucesiva de diferentes cultivos sobre la misma porción de terreno (Bullock, 1992). Todos los beneficios de esta práctica sobre la producción son, por lo general, referidos como *Efecto rotación* (Studdert & Echeverría, 2000). Este término comprende la acción de la combinación de los cultivos sobre la disponibilidad de nutrientes y agua (especialmente en zonas áridas y semiáridas); la dinámica de las plagas y patógenos; la presencia de sustancias inhibitorias o promotoras del crecimiento y sobre la condición física, química y biológica

del suelo; con importancias relativas variables de acuerdo a las condiciones ambientales (Bullock, 1992; Rufo & Parsons, 2004).

La alternancia planificada de diferentes cultivos es una práctica comprobada para mantener y/o mejorar la sustentabilidad del sistema (Iglesias *et al.*, 2008). Al mismo tiempo permite un mejor aprovechamiento de los recursos suelo y agua mediante la capacidad diferencial que tienen las especies de explorar el suelo, mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo (Puget & Drinkwater, 2001; Deneff & Six, 2006). Otras ventajas de la rotación de cultivos son: cortar el ciclo de malezas, plagas y enfermedades; disminuir los riesgos climáticos y de mercado; distribuir equilibradamente ingresos y egresos de la empresa; eficientizar la utilización de los recursos humanos y mejorar el aprovechamiento de maquinaria e instalaciones (Quiroga *et al.*, 2001).

En sistemas bajo agricultura continua, el tipo de labranza y la secuencia de cultivos son los principales reguladores del ciclado, el almacenamiento y la distribución vertical de los compartimentos de C y nutrientes en el suelo (Franzluebbers *et al.*, 1994; Paustian *et al.*, 1997). Generalmente, se acepta que los sistemas de labranza afectan principalmente la tasa de descomposición de MO y la pérdida de esta por erosión (Havlin *et al.*, 1990; Porter *et al.*, 1997). Una alta frecuencia de cultivos que produzcan un gran volumen de rastrojo y/o sistema radical de distinta arquitectura, la reducción de los períodos de barbecho y el uso más eficiente del agua impactarían positivamente en el mantenimiento o el incremento de la MO superficial, condición que mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas (Studdert & Echeverría, 2000; Dou *et al.*, 2007; García, 2011).

Si bien algunos estudios concluyeron que la reducción de las labranzas podría acumular más COT en el suelo que el acrecentamiento en la complejidad de la rotación (Apezteguía *et al.*, 2000; Bayer *et al.*, 2000; West & Post, 2002), existe poca información a nivel mundial al respecto. En este sentido, los estudios de largo alcance son esenciales debido a que los cambios en las propiedades edáficas a corto plazo son usualmente poco detectables (Heenan *et al.*, 2004). La necesidad de identificar secuencias de cultivos agrícolas que aumenten la fertilidad del suelo y el secuestro de C atmosférico resultan, en los últimos años, un tema de debate y preocupación entre científicos y productores tanto a nivel regional como global (Olivera *et al.*, 2010).

En nuestro país, las investigaciones referidas al efecto de distintas rotaciones sobre el comportamiento de variables edáficas han sido habitualmente realizadas en sistemas mixtos (Miglierina *et al.*, 2000; Galantini *et al.*, 2002; Agostini *et al.*, 2010) o agrícolas de

zonas húmedas con soja y/o maíz interviniendo en la rotación (Echeverría *et al.*, 1992; Fabrizzi *et al.*, 2005). En el caso de los agrosistemas de regiones más secas, los resultados son contradictorios, concluyéndose que algunos tipos de secuencias pueden afectar tanto positiva como negativamente la cantidad y calidad de la MO (Franzluebbers, 2002; Sánchez *et al.*, 2006). El efecto de secuencias trigo-trigo-trigo o trigo-girasol-trigo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, ha sido muy poco estudiado.

Los efectos de la implementación de distintas secuencias de cultivos no pueden generalizarse en la medida que no se consideren suelos de similar granulometría (Quiroga *et al.*, 2008).

El papel de la MO en el mantenimiento de la fertilidad del suelo es ampliamente reconocido y su comportamiento bajo distintas prácticas agrícolas ha sido evaluado en numerosos experimentos a largo plazo ya que el conocimiento de su dinámica en el suelo es esencial para entender el flujo del C y N (Matus & Maire, 2000). No obstante es difícil de predecir un comportamiento general del sistema de labranza sobre los contenidos de MO. Por ejemplo, sobre la base de tres sitios de trabajo en las praderas canadienses, Campbell *et al.* (1996), encontraron una relación positiva entre los contenidos de arcilla y los incrementos en la MO asociados a la adopción de la SD. Además, Angers *et al.* (1997), trabajando en el este de Canadá, comprobaron que el secuestro de C es menos afectado por cambios en el sistema de labranza en suelos de textura fina. Estos resultados permiten señalar, entre otros aspectos, la dificultad de obtener un nivel de equilibrio regional de la MO debido a la alta dependencia entre textura del suelo y sistemas de manejo, lo que además dificulta la extrapolación de resultados que serían sitio-dependientes (Hendrix *et al.*, 1998; Quiroga *et al.*, 2001).

Tal como ha sido demostrado para Molisoles de la región subhúmeda y semiárida argentina (Buschiazzo *et al.*, 1991; Quiroga *et al.*, 2008) existe un efecto de la composición granulométrica, particularmente referida a la proporción de partículas finas (% limo+arcilla) sobre el reciclaje del C en el suelo. Los suelos de textura más fina poseen mayores contenidos de COT respecto a aquellos de granulometría más gruesa, diferencias que resultan de la mayor protección de la MO contra la biodegradación (Van Veen & Kuikman, 1990). Esto ocurre cuando la MO es adsorbida sobre la superficie de las partículas de arcilla y limo, cuando es "incrustada" o recubierta por los minerales de arcilla (Tisdall & Oades, 1982; Golchin *et al.*, 1994) o cuando se localiza dentro de los microagregados, fuera del alcance de los microorganismos (Hassink, 1994). Al comparar distintos sistemas de labranza, las propiedades edáficas normalmente utilizadas como

indicadoras de calidad pueden responder de distinta manera de acuerdo a la granulometría del suelo.

### **1.3. Indicadores de calidad de suelo**

Determinar la sustentabilidad de los nuevos sistemas productivos adoptados en una región, requiere evaluar cuantitativamente la evolución en el tiempo de indicadores de calidad del suelo. Según la Soil Science Society of America, el concepto de calidad, definido como “la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar dentro de los límites de ecosistemas naturales o tecnosistemas, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o incrementar la calidad del agua y del aire y promover la salud de los hombres y de su hábitat” (Karlen *et al.*, 1997), constituye un área de estudio de creciente importancia (Gil-Sotres *et al.*, 2005). La satisfacción de dichos requerimientos puede lograrse mediante la conservación o el potencial mejoramiento de los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo (Arshad & Martin, 2002).

Los conceptos de calidad y sustentabilidad están estrechamente asociados. De este modo, indicadores de calidad - definidos como todas aquellas propiedades y procesos del suelo que resultan sensibles a cambios en el funcionamiento del mismo (Doran & Jones, 1996) - pueden ser utilizados como indicadores ecológicos de sustentabilidad en aspectos referidos a la capacidad productiva de los sistemas (Shukla *et al.*, 2006). Trasladar estos principios a la práctica significa cambiar la forma en que se toman las decisiones. Establecer si la calidad del suelo bajo un determinado sistema de manejo está en una situación de estabilidad, mejora o declinación requiere reunir información consistente acerca de parámetros edáficos, colectando datos que reflejen propiedades dinámicas de los suelos dependientes del uso, con énfasis en aquellas que resulten de procesos que ocurren cerca de la superficie (Norfleet *et al.*, 2003; Shukla *et al.*, 2006).

Existe particular interés en identificar indicadores de calidad de suelo que logren: i) integrar procesos y propiedades físicas, químicas y/o biológicas, ii) ser medibles, cualitativa o cuantitativamente, iii) ser sencillos, de fácil interpretación y económicos de obtener, y iv) ser suficientemente sensibles para responder a cambios en el uso del suelo, a prácticas de manejo y a factores climáticos o humanos (Doran *et al.*, 1996). La evaluación de la sustentabilidad de un sistema de manejo se puede realizar comparando dicho sistema en relación a otros alternativos conducidos al mismo tiempo (Larson & Pierce, 1994). Sin embargo, el análisis de los diferentes atributos edáficos en forma aislada no contribuye a dar una certeza de cuán bien funciona el sistema, ya que puede ir

en mejora de uno y en detrimento de otro conduciendo en algunos casos a respuestas que se apartan de lo real. Al analizar las variables en forma conjunta, las conclusiones se tornan más consistentes pudiendo inferir con un menor error el comportamiento del sistema (Larson & Pierce, 1994).

Numerosos estudios señalan que la cantidad y la composición de la MO es el principal indicador e indudablemente, el que posee una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad debido a sus efectos sobre otras propiedades físicas, químicas y biológicas (Weil & Magdoff, 2004; Galantini & Rosell, 2006; Rotenberg *et al.*, 2007). También aquellos parámetros químicos que reflejan estándares de fertilidad (pH, N, fósforo y potasio) son importantes en términos de producción de cultivos, por lo que usualmente son utilizados como indicadores de calidad (Doran & Parkin, 1994).

La degradación del suelo por pérdidas en los contenidos de MO es un claro síntoma de mal uso y/o manejo inapropiado de los sistemas productivos. Debido a que la pérdida de fertilidad está asociada a la alteración de numerosos procesos biológicos realizados por la biota edáfica, se ha propuesto que los microorganismos del suelo también pueden ser considerados indicadores válidos para el diagnóstico de impacto y restauración en los ecosistemas (Filip, 2002). Parámetros biológicos, tales como la biomasa microbiana y su actividad están fuertemente relacionados con el contenido de MO (Bremer *et al.*, 1994) y además son afectados por el manejo más rápidamente que el COT (Mele & Carter, 1993; Campbell *et al.*, 1992) por lo que resultarían ser indicadores sensibles y tempranos del efecto de las prácticas culturales en el ambiente microbiológico del suelo (Álvarez *et al.*, 1995).

Dentro de las propiedades físicas, existe amplio consenso en estudiar parámetros tales como EE, Dap, distribución del espacio poroso y RP para la cuantificación de los cambios estructurales del suelo. Estos indicadores han sido ampliamente evaluados en la región pampeana húmeda mostrando sensibilidad a los cambios de uso y manejo (Fabrizzi *et al.*, 2005; Aparicio & Costa, 2007; Steinbach & Álvarez, 2007; Ferreras *et al.*, 2007).

Dada la multiplicidad de variables que se han considerado como indicadores de calidad, los criterios para identificar aquellas que tengan mayor incidencia serán diferentes para los diversos tipos de suelos y usos de la tierra. De este modo, la calidad edáfica debe ser evaluada en base al análisis de diversas propiedades del suelo y su interacción, de modo de establecer los mejores indicadores para cada situación (Astier-Calderón *et al.*, 2002). Un mejor conocimiento de los procesos involucrados requiere la utilización de herramientas de estadística multivariada, las cuales tienen en cuenta las

correlaciones entre numerosos parámetros que son analizados simultáneamente, de tal modo que permite sintetizar e interpretar la información (Quiroga *et al.*, 1998b).

## **2. PLANTEO DEL PROBLEMA, OBJETIVOS GENERALES E HIPÓTESIS**

Un sistema de producción que pretenda ser sustentable debe contemplar acciones que permitan mantener y/o mejorar la calidad del suelo y con ello, su capacidad de permitir el desarrollo de los cultivos sin afectar negativamente el ambiente. Si bien por su concepción la práctica de SD tiende a la conservación del recurso, tal como se anticipó, la aplicación del sistema en forma continua presenta ventajas y desventajas. Numerosos autores han estudiado los efectos de la implementación de este paquete tecnológico sobre distintas propiedades superficiales de los suelos en el corto y mediano plazo. La mayoría de las investigaciones se han concentrado en la región pampeana húmeda, mostrando inicialmente ventajas sobre otros sistemas de manejo en lo que respecta a la mejora de la mayoría de las propiedades químicas y biológicas del suelo, destacándose su contribución a la mitigación del cambio climático, asociada, principalmente, a la disminución de la mineralización de la MO (Martino, 2001). Sin embargo, la información generada en los últimos años mostró resultados contradictorios, particularmente en lo referente a las propiedades físicas de los suelos que tienen incidencia sobre la dinámica del agua, los nutrientes y el crecimiento radical. Por otra parte, muchas veces las profundidades de muestreo establecidas para evaluar algunas variables dinámicas superficiales han sobreestimado los beneficios derivados de la aplicación del sistema (Schmidt *et al.*, 2008).

Lograr la sustentabilidad de los sistemas productivos, manteniendo la calidad del recurso de base, requiere la transferencia de tecnología probada en suelos de similares características y bajo condiciones ambientales semejantes. Sin embargo, esta premisa no es a menudo tenida en cuenta y la introducción de nuevos paquetes tecnológicos en áreas marginales para la agricultura se realiza sin contar con los conocimientos necesarios acerca de su impacto sobre los suelos en el mediano y largo plazo. Sus eventuales efectos negativos sólo son puestos en evidencia en forma tardía, cuando la calidad del recurso y por ende, la capacidad productiva del sistema ya ha sido afectada. Si bien aún es relativamente baja la tasa de adopción de la SD en el sur bonaerense, esta se expande, aumentando gradualmente su importancia como sistema de producción en los establecimientos de la región semiárida pampeana, donde los agroecosistemas se emplazan en regiones de alta fragilidad y por ende presentan menor resistencia al cambio, siendo su resiliencia baja. En esta zona, caracterizada por la limitada

sustentabilidad de la agricultura, el régimen de humedad restringe la producción principalmente a cultivos de invierno, y el reemplazo de los sistemas mixtos por la agricultura continua bajo SD, asociado a cuestiones económicas coyunturales, puede tener consecuencias perjudiciales sobre la calidad del recurso en el mediano y largo plazo.

Si bien los efectos de la SD sobre las propiedades del suelo han sido documentados, la información generada hasta el presente para la región muestra resultados contradictorios en los aspectos referidos a modificaciones de algunos parámetros de calidad de suelos bajo SD continua (Kruger, 1996; Buschiazzi *et al.*, 1998; Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Kruger *et al.*, 2005; Galantini & Rosell, 2006; Iglesias *et al.*, 2007). Además, la mayor parte de estas investigaciones involucran también zonas subhúmedas o de transición subhúmeda-húmeda (Echeverría *et al.*, 1992; Fabrizzi *et al.*, 2005; Steinbach & Álvarez, 2007), o bien se han llevado a cabo en parcelas demostrativas, situación que aunque resulta esencial para generar información, no refleja necesariamente la realidad de los sistemas de producción en los que influyen numerosos factores no controlados. Las interacciones entre dichos factores son tan estrechas y complejas que es generalmente difícil separarlas y analizarlas individualmente (Eiza *et al.*, 2005; Strudley *et al.*, 2008).

El presente trabajo de tesis pretende reflejar la realidad de campo por lo que constituye un estudio mensurativo. El mismo se desarrolla en establecimientos agrícolas de la región pampeana semiárida sur sobre lotes en producción bajo sistemas de labranza conservacionista (SD y LR), contemplando diferentes secuencias de cultivo y texturas del horizonte superficial de los suelos. Su finalidad es incrementar el conocimiento acerca de los efectos de su implementación sobre propiedades dinámicas superficiales y poner de manifiesto el verdadero impacto de la adopción de estos sistemas por parte de los productores en condiciones de aplicación no controladas. Se espera que los resultados obtenidos en este trabajo permitan anticipar los cambios producidos en los suelos de la región frente a la expansión de la SD, brindando las herramientas necesarias para realizar un manejo adecuado del recurso.

En base a lo expuesto, los objetivos generales de este trabajo contemplan:

- 1- Evaluar el comportamiento de propiedades bioquímicas y físicas en profundidades diferenciales de los epipedones (0-18 cm) de suelos con diferente textura superficial en lotes agrícolas bajo SD continua y LR, contemplando las secuencias de cultivos más comunes en la región pampeana semiárida sur.

2- Identificar las propiedades edáficas que, por su sensibilidad para evidenciar cambios asociados a la aplicación de distintas secuencias de cultivos y sistemas de labranza, puedan ser utilizadas para evaluar modificaciones en la calidad edáfica.

Para ello se propone cuantificar el impacto de distintos tratamientos resultantes de la combinación de sistemas de labranza, secuencias de cultivo y texturas del horizonte superficial sobre:

a- La materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo), a fin de determinar la existencia de cambios cuantitativos, cualitativos y estratificaciones,

b- La actividad biológica y su distribución en el epipedón, y

c- La estructura y variables físicas asociadas a la misma en el horizonte superficial de los suelos.

En base a los antecedentes recabados en la literatura y considerando las características de los atributos de la tierra de la zona de estudio, se plantean las siguientes hipótesis:

→ *En suelos con horizontes superficiales de textura franco arenosa que resultan dominantes en la región, y bajo una misma secuencia de cultivos:*

**Hipótesis 1:** Debido a la incidencia de factores económicos y edafoclimáticos que restringen la elección de cultivos, la SD continua no produce un incremento del carbono orgánico en los suelos de la región en comparación con la LR.

**Hipótesis 2:** El microambiente generado en la superficie del suelo bajo SD influye sobre la distribución de los microorganismos edáficos provocando estratificaciones sin ejercer un control significativo sobre la magnitud de su actividad global en el epipedón en comparación con la LR.

**Hipótesis 3:** La implementación del sistema de SD continua modifica sustancialmente las características estructurales de superficie originando fenómenos de compactación. La compresión ligada al tránsito altera la estructura del suelo afectando negativamente las propiedades físicas inherentes a la pedalidad, en comparación con la LR.

→ En suelos con horizontes superficiales de textura franco arenosa bajo SD y distinta secuencia de cultivos:

**Hipótesis 4:** a) La intensificación de la agricultura con menores períodos de barbecho y la mayor permanencia de raíces activas en secuencias que incluyen cultivos de invierno y/o cultivos de invierno y verano tendrán un impacto positivo sobre la estructura y los parámetros físicos asociados, presentando además mayores contenidos de COT respecto a aquellas secuencias que poseen un período de barbecho más prolongado. b) La inclusión de cultivos invernales y estivales en las secuencias derivará en una mejora en las propiedades físicas y bioquímicas de los suelos en comparación con el monocultivo.

→ En suelos bajo SD con idéntica secuencia de cultivos y diferente textura en el horizonte superficial:

**Hipótesis 5:** La granulometría del epipedón resulta un factor condicionante de las propiedades edáficas de superficie, presentando los suelos de textura franca a franco arcillosa mejores cualidades agrícolas que aquellos de granulometría más gruesa (franco arenosa).

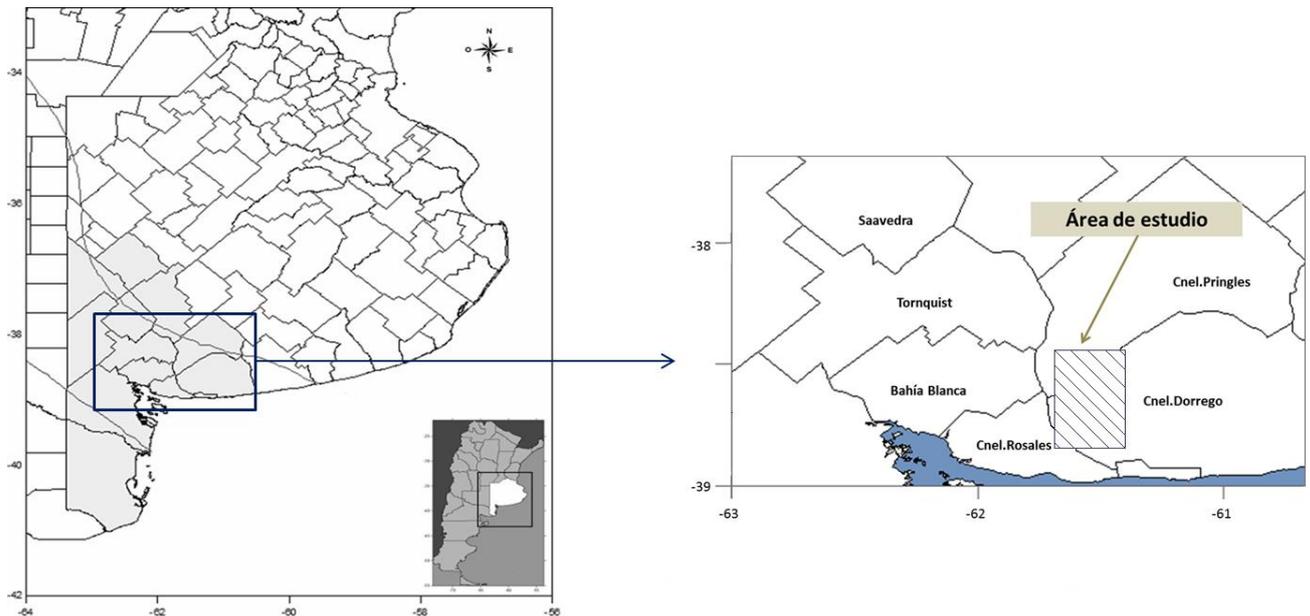
### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Caracterización del área de estudio

##### 3.1.1. Ubicación

La investigación se desarrolló evaluando sistemas reales de modo tal que las tareas se llevaron a cabo en establecimientos agrícolas de la región pampeana semiárida sur ubicados entre los  $38^{\circ} 54' S$ ,  $61^{\circ} 38' O$  y los  $38^{\circ} 34' S$ ,  $61^{\circ} 42' O$ , a aproximadamente 50 km al NNE y E de la ciudad de Bahía Blanca (Fig. 3).

La elección de los sitios de muestreo estuvo acotada a los lotes bajo SD y LR existentes en la región, estableciendo como parámetros condicionantes de la selección las características edafoclimáticas (régimen ústico) y un tiempo mínimo de implementación de SD de 8-10 años. La investigación incluye diferentes planteos agrícolas, por lo que los tratamientos considerados son resultantes de la combinación de distintos sistemas de labranza, secuencias de cultivo y texturas del horizonte superficial de los suelos de la zona de estudio.



**Figura 3.** Ubicación del área de estudio.

### 3.1.2. Aspectos climáticos y edafoclimáticos

La precipitación media anual para las estaciones meteorológicas más cercanas al área bajo estudio es de 580 mm con un desvío de +/- 170 mm (serie histórica 1900-2009) para la ciudad de Bahía Blanca y de 604 mm +/- 163 mm para Cabildo (serie histórica 1904-2009). La evapotranspiración potencial para los mismos períodos fue de 1212 mm y 1100 mm en Bahía Blanca y Cabildo, respectivamente. Las estaciones más lluviosas son verano y otoño, con el 32% y el 28% del total de las precipitaciones, respectivamente. El valor máximo medio se presenta en el mes de marzo, mientras que el mínimo se produce en agosto. Los promedios no reflejan el alto nivel de irregularidad de las precipitaciones, situación que caracteriza a la región semiárida del sur de la provincia de Bs. As. (Scian, 2010).

La temperatura media anual se ubica en los 15,0 °C, mientras que la temperatura media del mes más cálido (enero) es de 23,2 °C y la del mes más frío (julio) de 7,5 °C. Estas condiciones caracterizan a un clima templado. El período medio libre de heladas se extiende desde octubre a abril. Por no poseer barreras transversales a la circulación atmosférica, la región se encuentra sometida a la acción de masas de aire provenientes tanto del sur como del norte, que ejercen su influencia durante todo el año. De esta manera, la variabilidad y la erraticidad de las heladas constituyen uno de los factores adversos más importantes de la región.

En lo que respecta al viento, su dirección predominante es del cuadrante noroeste, siendo la estación más ventosa el verano con velocidades promedio de 24 km h<sup>-1</sup>. En este período es donde además existe una mayor probabilidad de alcanzar vientos erosivos (superiores a 32 km h<sup>-1</sup>). En el trimestre abril-mayo-junio se registran las menores velocidades.

Según el balance hídrico climático de Thornthwaite, durante los meses de verano hay una marcada deficiencia hídrica. A partir de marzo-abril comienza el período de reposición de agua, situación que se extiende hasta el mes de octubre, donde comienza el consumo de agua acumulada en el suelo (Scian, 2010).

El edafoclima está definido por los regímenes de humedad (RHS) y de temperatura del suelo (RTS) quienes controlan la mayoría de los procesos biológicos que ocurren en él y condicionan el potencial productivo. En el área de estudio los suelos presentan un RHS ústico no transicional, con un importante déficit de agua en el suelo particularmente en la época estival (noviembre a febrero) cuando la evapotranspiración es elevada, resultando una limitante de la productividad para los cultivos de verano. De acuerdo a los parámetros establecidos por la taxonomía, el RTS califica como térmico con una media

anual de 16 °C a 50 cm de profundidad y una diferencia entre las medias de verano e invierno mayor a 6 °C.

### 3.1.3. Características de los suelos estudiados

El área de estudio se emplaza en la porción media/distal de la llanura subventánica occidental. Su rango altitudinal varía desde los 300 msnm en adyacencias al pedemonte serrano hasta la cota máxima a 60 msnm al encontrar la faja en pendiente que la limita por el sur. El relieve es plano suavemente ondulado con un gradiente general inferior al 0,1% (González Uriarte, 2010). Desde el punto de vista taxonómico los suelos estudiados pertenecen al Orden Mollisol, Suborden Ustol. Tienen como características diagnósticas un horizonte superficial que reúne los requisitos para ser clasificado como epipedón mólico, una elevada saturación con bases que se mantiene en profundidad y endopedones cálcico y petrocálcico heredado (capa de tosca) dentro del perfil del suelo. A nivel de Familia clasifican como Paleustoles petrocálcicos, franco finos, mixtos, térmicos (Soil Survey Staff – USDA, 2010).

Se trata de suelos de edad holocena, fértiles por definición, típicos de estepas y praderas. Su génesis está vinculada a una combinación de factores que incluyen un material parental rico en  $\text{CaCO}_3$  (loess o sedimentos loessoides), un edafoclima que permitió el desarrollo de un estrato herbáceo rico en gramíneas con elevada capacidad para incorporar MO dentro del suelo, y una importante actividad de la meso y macrofauna, factores que determinan la ocurrencia del proceso de melanización conducente a la génesis del epipedón mólico. De acuerdo a los requisitos taxonómicos, este horizonte superficial no puede ser masivo y duro en seco, debe presentar un contenido de COT igual o mayor a 0,6%, un  $\text{value} \leq 3$  en húmedo y  $\leq 5$  en seco, un espesor promedio de 18 cm o más y una elevada saturación con bases ( $\geq 50\%$ ).

Durante el ciclo pedogenético actual, el proceso de calcificación resultó lo suficientemente intenso como para generar horizontes Ck en los que la magnitud de la concentración secundaria de calcita micrítica supera la exigida para los endopedones cálcicos (15%). Estos horizontes ricos en pseudomiscelios, calcitanes y concreciones de  $\text{CaCO}_3$  suprayacen a un horizonte petrocálcico relíctico (2Ckm: capa de tosca) presente en los planos a profundidades variables (comúnmente entre los 50 y 100 cm), que actúa limitando la profundidad efectiva y por ende, la capacidad de almacenamiento de humedad y la libre percolación de la solución del suelo (Amiotti *et al.*, 2010).

De acuerdo a estudios realizados por Blanco *et al.* (2003), la mineralogía de la fracción arcilla es mixta, con predominio de illita e interestratificados illita-esmectita.

Por sus características las tierras presentan aptitud agrícola – ganadera con posibilidades de realizar cereales y verdes de invierno y pasturas. El éxito de los cultivos de verano (girasol y sorgo) está muy condicionado a la oferta pluvial. La limitante principal de la productividad obedece a la condición climática, a la que se le adiciona la restricción de la capacidad de almacenamiento de humedad ocasionada por la presencia del horizonte petrocálcico.

Como característica particular, los suelos de los lotes estudiados, como muchos otros en la región, han sufrido pulsos de denudación y depositación de materiales vinculados a procesos de erosión eólica asociada a la acción de vientos intensos sobre la superficie desnuda bajo condiciones de manejo deficiente. Como consecuencia de tales eventos, la textura de los horizontes superficiales, inicialmente franca hasta franco arcillosa liviana, muestra en muchos lotes en producción una ganancia relativa de la fracción arena volviéndose más gruesa en la superficie. Esos fenómenos no afectaron a la totalidad de los suelos de la región estudiada, razón por la cual horizontes superficiales de textura franco arenosa (dominantes), coexisten con otros que conservan la granulometría más fina que caracteriza al material original (franca a franco arcillosa).

Vinculado a las labranzas a las que han sido sometidos desde la introducción de la agricultura en la región, los suelos presentan estructura débil en el horizonte Ap y compactación subsuperficial asociada a la génesis de pisos de arado (Ad). Estos procesos se manifiestan particularmente en lotes que luego de ser labrados entraron en SD, pues la no disrupción de los plowpanes fue habitual en estos casos. Bajo LR no se detectaron a campo capas densas subsuperficiales.

#### **3.1.4. Uso de la tierra y prácticas de manejo**

Varios siglos de agricultura y ganadería han alterado completamente las comunidades autóctonas (estepa o pseudoestepa de gramíneas), de forma tal que puede asegurarse que casi no existe porción alguna del territorio que no haya sido modificada por la acción directa o indirecta del hombre. El panorama actual de la región se presenta con la mayor parte de su superficie destinada a la ganadería y en menor proporción a la agricultura continua (Saldungaray *et al.*, 2012). Es de destacar el notable abandono de lotes agrícolas ocurrido en los últimos años, resultado de condiciones climáticas y económicas adversas. Los cultivos más importantes en cuanto al área sembrada son los de ciclo invierno-primaveral (trigo y cebada). Esto obedece a la distribución mensual de las precipitaciones que presenta dos picos, uno en otoño que permite preparar la cama de siembra, y otro en primavera en el momento de encañazón-espigazón. Los cultivos

estivales (girasol, sorgo y ocasionalmente soja) resultan de menor importancia en cuanto su grado de adopción.

En los lotes estudiados el manejo es el habitualmente realizado en la zona, e incluye la secuencia de cereales de invierno en forma continua (con o sin barbecho prolongado) y rotaciones con cultivos de verano. La implementación de barbechos largos, es una práctica utilizada en la región estudiada (así como en otras regiones semiáridas y subhúmedas del mundo) para acumular el agua de las escasas e irregulares precipitaciones, aumentando así su disponibilidad para el cultivo siguiente (Galantini *et al.*, 2013).

En los lotes bajo SD se realizan controles químicos con glifosato y se utilizan herbicidas selectivos al instalarse los cultivos. En el caso del trigo la siembra comienza alrededor del mes de mayo con variedades de ciclo largo y las fertilizaciones incluyen fosfato diamónico al momento de la siembra (60-80 kg ha<sup>-1</sup>). Dependiendo de las condiciones climáticas se agrega urea al macollaje, con dosis variable en función de la disponibilidad de N en el suelo. Los rindes oscilan entre 1500 y 3000 kg ha<sup>-1</sup>. La incorporación en la rotación de cultivos de verano (generalmente girasol) tiene por finalidad cortar el ciclo de plagas y enfermedades. Este último cultivo se siembra en octubre-noviembre y se fertiliza usualmente con 40- 60 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato diamónico. Su bajo rendimiento promedio (500 kg ha<sup>-1</sup>) y la alta variabilidad (0 kg ha<sup>-1</sup> a 1000 kg ha<sup>-1</sup>) se asocia a las elevadas temperaturas y a la escasez y erraticidad de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (Schmidt *et al.*, 2013).

Las labores realizadas en los lotes bajo LR incluyen dos/tres pasadas de rastra de discos (que trabajan a profundidades de 10-15 cm). En general se realiza una primera labranza en marzo, una intermedia en mayo y una final previa a la siembra del cultivo de verano. Si los productores detectan que se está produciendo compactación implementan labranzas verticales (cincel o paratill) con relativa frecuencia, con la finalidad de evitar la formación de pisos de arado. La profundidad media de trabajo de este tipo de labranzas es de aproximadamente 25 cm. De acuerdo a la información provista por los productores, la fecha de siembra, fertilización y rendimiento son similares a los descriptos para SD.

### **3.2. Metodología de la investigación**

#### **3.2.1. Consideraciones generales**

El trabajo se realizó considerando un total de 27 lotes en producción agrícola pura ubicados en establecimientos representativos de la región pampeana semiárida sur. Al

seleccionar los sitios de muestreo se trató de mantener, tanto como fue posible, uniformidad en los factores de pedogénesis a fin de convalidar las comparaciones y poder atribuir las diferencias encontradas a cuestiones relacionadas meramente con las prácticas de manejo adoptadas. La excepción la constituye la variación de la textura de los epipedones, situación contemplada para determinar el control ejercido por las fracciones granulométricas sobre las propiedades estudiadas. Si bien hubiera sido deseable ampliar la cantidad de sitios experimentales, esto habría introducido, sin dudas, distorsiones en los resultados que no podrían ser asociadas a las prácticas de manejo evaluadas. Esta situación es usual en investigaciones realizadas en el área de influencia de la zona de estudio donde, probablemente debido a la falta de un mayor número de sitios de muestreo, resulta habitual que se presenten resultados obtenidos en suelos cuyas características y potencial productivo difieren por diferir particularmente la condición climática. El RHS condiciona la pedogénesis, la resistencia y resiliencia del sistema y la producción de biomasa sobre y dentro del suelo, factores que tienen impacto directo sobre las propiedades que se pretende evaluar al analizar las ventajas y desventajas de los sistemas de manejo. Esta situación no debería ser soslayada cuando se realizan investigaciones que tienen por fin último transferir información a áreas de similares características.

### **3.2.2. Tratamientos**

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en esta investigación se muestrearon lotes bajo diferentes situaciones en producción agrícola típicas de la zona de estudio, incluyendo **dos sistemas de labranza conservacionista**:

1) Siembra directa (SD), en donde el suelo se deja sin disturbar y el control de malezas y plagas se realiza con agroquímicos. Por definición, en este sistema la presencia de residuos desde la cosecha del cultivo al momento de siembra del siguiente debe superar el 30% de cobertura (Karayel, 2009).

2) Labranza reducida (LR), donde el laboreo se realiza con rastras de discos. Según el Manual de FAO (2000) este tipo de labranza puede ser clasificada como un sistema conservacionista o no, dependiendo de los implementos utilizados y el número de pasadas. Además, Lal (2003) establece que cualquier método de labranza que deje suficientes residuos de cultivos en el lugar para cubrir al menos el 30% de la superficie del suelo después de la siembra, puede ser considerado como de AC. En todos los lotes muestreados bajo LR se observaron niveles de cobertura superiores a dicho nivel al

momento de la siembra (Fig. 4a), por lo que en este trabajo se considera a la LR como un sistema conservacionista.

Además, con el fin de evaluar el **efecto de la granulometría** sobre las propiedades edáficas superficiales, antes de proceder al muestreo específico se determinó la clase textural del epipedón de los suelos a partir del promedio ponderado de las fracciones granulométricas cuantificadas en las tres profundidades muestreadas (0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm) por el método de la pipeta de Robinson (Greenland, 1981). El análisis reveló para la mayoría de los lotes, la presencia de texturas franco arenosas (FA) con contenidos medios de arcilla y limo de  $175 \text{ gr kg}^{-1}$  y  $217 \text{ gr kg}^{-1}$ , respectivamente. Por otra parte, cuatro de los lotes mostraron texturas franca a franco arcillosas (F-Fa), con valores de arcilla y limo de  $217 \text{ gr kg}^{-1}$  y  $342 \text{ gr kg}^{-1}$ , respectivamente. Tal como se anticipó, las diferencias encontradas para las distintas fracciones granulométricas analizadas responden a la variabilidad propia de los pulsos de acreción y erosión ocurridos en la región.

Por último, para analizar el efecto de las distintas **secuencias de cultivos** bajo SD sobre las propiedades del epipedón se consideraron, al establecer el muestreo, aquellas más comúnmente utilizadas en la región: secuencias de cultivos invernales (trigo o cebada, FF); secuencias de cultivos invernales y estivales (trigo o cebada y girasol, FG) y secuencias de cultivos invernales con barbecho prolongado (FB). En los lotes evaluados no se detectó una proporción significativa de otros cultivos de verano, tales como maíz o sorgo.

La investigación incluyó entonces **seis tratamientos**, definidos por la combinación del sistema de labranza (SD o LR), años de implementación (8-10 ó 15), secuencia de cultivo y textura del horizonte superficial (1: FA y 2: F-Fa). A continuación se detallan las características de las distintas combinaciones utilizadas y el aspecto de la superficie del suelo al momento del muestreo en cada una de ellas (Fig. 4).

1- **LR15FG1 (n=5)**: Labranza reducida con 15 años de implementación, textura del horizonte superficial franco arenosa y secuencias de cultivos invernales (trigo o cebada) y estivales (en general girasol). La rotación más utilizada es trigo-trigo-girasol (Fig. 4a).

2- **SD10FG1 (n=5)**: Siembra directa continua con un tiempo de implementación de entre 8 y 10 años y secuencias de cultivos invernales (trigo o cebada) y estivales (en general girasol u ocasionalmente soja). La textura del horizonte superficial es franco arenosa y la rotación más utilizada es trigo-girasol-trigo (Fig. 4b).

3- **SD15FG1 (n=5)**: Igual al anterior, pero con un tiempo de implementación de la siembra directa de 15 años (Fig. 4c).

4- **SD15FB1 (n=4)**: Cultivos invernales (trigo o cebada) bajo siembra directa con un año de barbecho sin control de malezas entre dos cultivos sucesivos, textura del horizonte superficial franco arenosa y 15 años de implementación de la SD. La secuencia más común es trigo-barbecho-trigo (Fig. 4d).

5- **SD15FF1 (n=4)**: Cultivos invernales (trigo o cebada) bajo siembra directa continua con 15 años de implementación y textura del horizonte superficial franco arenosa. La secuencia más común es trigo-trigo-trigo (Fig. 4e).

6- **SD15FG2 (n=4)**: Siembra directa continua con 15 años de implementación y textura del horizonte superficial franca a franco arcillosa con secuencias de cultivos invernales (trigo o cebada) y estivales (en general girasol u ocasionalmente soja). La rotación más comúnmente utilizada es trigo-girasol-trigo (Fig. 4f).

a) LR15FG1



b) SD10FG1



c) SD15FG1



d) SD15FB1



e) SD15FF1



f) SD15FG2



**Figura 4.** Aspecto de la superficie del suelo en los distintos tratamientos evaluados.

### 3.2.3. Toma de muestras

Se tomaron muestras al azar, disturbadas (compuestas por 25 submuestras) y no disturbadas (n=4 ó 5) a comienzos del otoño en el centro de los lotes, evitando los bordes y las zonas de mayor tránsito (cabeceras). Para la determinación de la actividad biológica, la toma de muestras se realizó durante el mes de octubre, cuando todos los lotes se encontraban con trigo.

El muestreo se realizó en el año 2008, a tres profundidades preestablecidas: 0 - 5 cm, 5 - 10 cm y 10 - 18 cm a fines de determinar la existencia de posibles estratificaciones en las variables evaluadas. Se seleccionó la profundidad 0-18 cm pues este es el espesor estipulado por la taxonomía americana (Soil Survey Staff – USDA, 2010) para clasificar al horizonte superficial de los suelos estudiados como epipedón mólico. Las determinaciones físicas y químicas se realizaron sobre un total (N) de 81 muestras de suelo.

### 3.2.4. Determinaciones de laboratorio

#### Parámetros bioquímicos

- pH en suspensión suelo-agua relación 1:2,5 (potenciométrico).
- Carbono orgánico total (COT, g kg<sup>-1</sup>) por el método de Walkey & Black (Nelson & Sommers, 1996).
- Nitrógeno total (NT, g kg<sup>-1</sup>) por el método de micro-Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1996).
- Fraccionamiento granulométrico por tamizado en húmedo con tamiz de 0,1 mm (Galantini, 2005). Se cuantificaron los contenidos de carbono orgánico particulado (COP) y nitrógeno total particulado (NP) en la fracción gruesa (0,1-2 mm) y se determinaron las relaciones COP/NP en los tratamientos comparados. Por cálculo se determinó el contenido de COT y NT recalcitrantes en la fracción fina (< 0,1 mm) (COR y NR, respectivamente), además de las relaciones COP/COT y NP/NT.
- El contenido de COT, NT y sus fracciones, se transformaron en valores de stock mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Mg ha}^{-1} = (x/100) * \text{Dap} * p * 10^4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$$

donde **Dap** es la densidad aparente (Mg m<sup>-3</sup>); **p** es el espesor del suelo en metros y **x** es el contenido de COT, NT o sus fracciones en %.

- Fósforo disponible (Pd, mg Kg<sup>-1</sup>) por el método de Bray & Kurtz N° 1 (1945).
- Índice estructural (IE) a partir de la siguiente relación (Pieri, 1995):

$$IE = MO \text{ (g kg}^{-1}\text{)} / a + L \text{ (g kg}^{-1}\text{)} * 100$$

siendo a y L los contenidos de arcilla y limo, respectivamente.

- Actividad biológica (mg de CO<sub>2</sub> desprendido en 1 kg de suelo por día) por el método de desprendimiento de dióxido de carbono (Soil Science Society of America, 1994).

### Parámetros físicos

- Densidad aparente por el método del núcleo (Dap, Mg m<sup>-3</sup>; Blake & Hartge, 1986). Se calculó además la densidad aparente crítica (Dapc, Mg m<sup>-3</sup>), de acuerdo a la ecuación: **Dapc = 1,52 – 0,0065 \* arcilla (%)**, propuesta por Pilatti & de Orellana (2000) para los suelos de la región pampeana. Esta ecuación fue utilizada para referenciar las Dap de campo, con el objetivo de establecer el estado de densificación del suelo.

- Densidad aparente máxima (Dap máx., Mg m<sup>-3</sup>) y compactación relativa (CR, %). La Dap máx. se determinó mediante el Test Proctor de compactación dinámica a energía constante, de acuerdo al método AASHO Standard T-99 (Gupta & Allmaras, 1987). Este utiliza un cilindro de 956 cm<sup>3</sup> de capacidad (10,2 cm de diámetro y 11,7 cm de altura), donde es compactada la muestra previamente humedecida en tres capas iguales, a razón de 25 golpes por capa. El pisón, de 2,5 kg de peso, se lanza desde una altura de 0,305 m, proporcionando así una energía específica de compactación de 590 kJ.m<sup>-3</sup>. Luego la muestra es llevada a estufa a 105 °C hasta peso constante y, con los valores obtenidos de Dap y los respectivos contenidos de humedad, se traza la curva de compactación, obteniendo así la Dap máx y el contenido de humedad crítica (HC). La compactación relativa se calculó de la siguiente manera:

$$CR (\%) = [(Dap \text{ (Mg m}^{-3}\text{)} / Dap \text{ máx. (Mg m}^{-3}\text{)}] * 100.$$

- Estabilidad estructural (EE) por medio de la diferencia entre el diámetro medio en peso o diámetro ponderado de los agregados secos al aire y luego de tamizados en agua, según el método de De Leenher & De Boodt (1958) modificado por Silenzi *et al.* (1987). Las muestras fueron secadas al aire, desagregadas manualmente según los planos de fragilidad y luego tamizadas. Los resultados se expresan como valores del cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP, mm), que resulta de la diferencia entre el diámetro ponderado de los agregados en seco y en húmedo (DMPs – DMPH), de acuerdo a:

$$\text{DMPs} = [(\% * 6,4) + (\% * 3,8) + (\% * 2,4) + (\% * 1,5)] / 100$$

$$\text{DMPH} = [(\% * 6,4) + (\% * 3,8) + (\% * 2,4) + (\% * 1,5) + (\% * 0,75) + (\% * 0,4)] / 100$$

donde: %, corresponde a la fracción en peso de cada muestra y es multiplicada por el valor medio en mm de la abertura de los dos tamices consecutivos.

Para el tamizado en seco se utilizaron mallas de 8,0; 4,8; 2,8; 2,0 y 1,0 mm de abertura, sumándose a las anteriores las de 0,5 y 0,3 mm de abertura para el tamizado en húmedo.

- Porosidad total (Pt, %) según Danielson & Sutherland (1986).
- Distribución por tamaño de los poros del suelo. Si bien existen en la literatura numerosas clasificaciones de tamaños de poros, en el presente trabajo se utilizó un sistema relativamente simple aplicado previamente por Kay & Vanden Bygaart (2002), que divide los poros en base a sus diferencias funcionales. Se tomaron tres clases de poros: poros de transmisión (>9  $\mu\text{m}$ , macroporos, MP) calculados a partir de los contenidos volumétricos de agua a potenciales de 0 y -33 kPa; poros de almacenamiento (mesoporos, mP) calculados a partir de los contenidos volumétricos de agua a potenciales de -33 y -1500 kPa y microporos ( $\mu\text{P}$ , < 0,2  $\mu\text{m}$ ) calculados a partir del contenido volumétrico de agua a -1500 KPa.
- Contenido volumétrico de agua (%v/v) por el método de Richards según Klute (1986). Se utilizaron potenciales de 0 (saturación), -8,6; -33 (capacidad de campo) y -1500 kPa (punto de marchitez permanente).
- Contenido volumétrico de agua útil (AU, %v/v): diferencia entre los contenidos de agua a potenciales mátricos de -33 y -1500 kPa (Cassel & Nielsen, en Klute, 1986).

### 3.2.5.- Determinaciones de campo

- Resistencia a la penetración con penetrómetro de golpe (RP, MPa) (O'Sullivan *et al.*, 1987). Las características del penetrómetro utilizado son:
  - Peso del martillo en kg (M): 1,191
  - Peso del resto del penetrómetro en kg (m): 2,245
  - Altura de caída del martillo en cm (H): 98
  - Superficie del cono en  $\text{cm}^2$  (S): 4,27
  - Ángulo del ápice del cono: 30°
  - Radio de la base del cono: 0,98 cm
  - Altura del cono: 0,98 cm

Para realizar la conversión del número de golpes a MPa se utilizó la siguiente fórmula:

$$RP \text{ (MPa)} = \{M^2 * H * \text{número de golpes} * [2(M+m) * S * Z]^{-1}\} * 0,10$$

siendo **Z** la profundidad de la capa evaluada en cm, mientras que 0,10 es el factor utilizado para convertir kg cm<sup>-2</sup> a MPa.

- Humedad gravimétrica (%) al momento de la determinación de RP.

### **3.3. Análisis estadístico**

El presente trabajo es un estudio observacional de modo que cada lote perteneciente a cada una de los tratamientos (combinaciones) muestreados constituye una unidad experimental.

#### Análisis univariado

El análisis de datos incluyó técnicas descriptivas para la caracterización de situaciones representativas (parámetros de centralización y dispersión). Se utilizó un diseño completamente aleatorizado, utilizando el procedimiento Modelos lineales generales y mixtos del programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013). Como factores fijos se consideraron la profundidad de muestreo (0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm), las combinaciones que constituyeron los distintos tratamientos evaluados (LR15FG1, SD10FG1, SD15FG1, SD15FB1, SD15FF1 y SD15FG2) y la interacción entre ambos. El factor aleatorio estuvo constituido por los lotes. Se realizó la comparación de varios modelos para seleccionar la estructura de la matriz más adecuada, utilizando los criterios de ajuste AIC y BIC. Se consideró una estructura de la covarianza autorregresiva, ya que las correlaciones entre las distintas profundidades disminuyen con la distancia (Balzarini *et al.*, 2008).

Para afirmar la inexistencia de interacción entre los factores combinación y profundidad de muestreo, se consideró un valor de  $p > 0,25$ . En estos casos, se utilizó la prueba de diferencia mínima significativa protegida de Fisher ( $p < 0,10$ ) para realizar la comparación entre los valores medios de la variable en el horizonte superficial de los diferentes tratamientos, previa verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Cuando la interacción fue significativa, la comparación de las medias de las seis combinaciones evaluadas se realizó para cada profundidad por separado.

En la interpretación de algunas variables se consideró además la comparación de las medias de las combinaciones entre profundidades, a fin de detectar la presencia de posibles estratificaciones.

El efecto principal de cada una de las propiedades del suelo promediada (en este caso se utilizó el promedio ponderado) a través de los niveles de la otra variable (profundidad de muestreo) se incluye en la discusión de los resultados, por resultar ilustrativo del comportamiento de dichas propiedades en la totalidad del horizonte superficial del suelo (0-18 cm).

Para la interpretación de resultados, en el análisis de datos también se utilizaron otras herramientas estadísticas tales como coeficientes de correlación (Pearson) y regresiones del programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

### Análisis multivariado

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP), el cuál permite definir nuevas variables en función de las originales, de manera que se obtiene una información similar pero en menos dimensiones. Los resultados obtenidos se muestran mediante gráficos biplot, donde cada propiedad del suelo es representada por un autovector que queda definido por la correlación existente entre dicha variable y la componente principal (CP) considerada. El conjunto de muestras, que corresponde a las tres profundidades evaluadas (0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm) en todas las combinaciones, aparecen graficadas en el biplot como puntos (N=81). Sólo se considerarán en la discusión de los resultados aquellas variables que aparezcan con un porcentaje de reconstrucción mayor al 50%.

Las componentes, que resultan independientes entre si, se interpretan en función de las correlaciones más altas con las variables originales mientras que el ángulo existente entre dos vectores representa el grado de correlación entre las propiedades consideradas. Se presentan además los autovalores resultantes del análisis, que hacen referencia a la proporción de la variabilidad total explicada por cada componente y en forma acumulada.

A fines de identificar aquellas propiedades del suelo que resulten más relevantes para la separación de los distintos tratamientos luego del ACP se aplicó la técnica del análisis discriminante canónico (AD), nuevamente utilizando la totalidad de los datos (N=81). El AD construye combinaciones lineales de las variables originales cuantitativas, representando todos los datos en un espacio donde las diferencias entre grupos (combinaciones) son máximas. Es decir que se explica la variación entre tratamientos de la misma forma que las combinaciones lineales que constituyen las componentes principales explican la variación total. También brinda la posibilidad de clasificar nuevos casos en los grupos establecidos *a priori* sobre la base de una regla de clasificación basada en las variables independientes (Balzarini *et al.*, 2008).

En este tipo de análisis, resulta necesario estimar la probabilidad asociada a una correcta clasificación de nuevas observaciones. Cuando se tienen suficientes datos, es común particionarlos en dos subconjuntos, uno es utilizado para hallar la función discriminante y otro para la validación de la misma. La función estimada a partir del primer archivo (*datos de calibración*) puede ser evaluada con los datos del segundo archivo (*datos de validación*). En este trabajo se presentan las tasas de error aparente, calculadas utilizando un único archivo para ambos procesos, es decir las mismas observaciones usadas para estimar la función son luego reclasificadas con la función para estimar el error de clasificación (Johnson & Wichern, 1998).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Características de la superficie del suelo y morfología del epipedón**

Las observaciones de campo indican claras diferencias en el estado de la superficie de los suelos bajo LR y SD. En el primer tratamiento se apreció alta rugosidad superficial, importante actividad de la mesofauna y abundantes restos vegetales (50-70%), valores que superan al umbral requerido para los sistemas conservacionistas. Por otra parte, un 45% del total de lotes bajo SD mostraron niveles de cobertura de rastrojo menores a 30%, aunque si sólo se consideran los tratamientos de textura superficial FA con secuencias de cultivos invernales y estivales, en el 80% de lotes la SD no se comportó como una práctica de manejo conservacionista por el bajo nivel de cobertura logrado. Recientemente, e incluso cuando su área de estudio involucra zonas de mayor precipitación media anual, López *et al.* (2014) manifiestan que el 44% y el 63% de los lotes bajo SD en el sudoeste bonaerense dejaron menos de 30% de cobertura de la superficie de suelo al momento de la siembra de trigo cuando los antecesores fueron cultivos invernales o estivales respectivamente.

Del mismo modo fueron notorias las diferencias observadas en las características morfológicas de los horizontes superficiales de los suelos comparados, en particular aquellas relacionadas con el tipo de agregación. Bajo LR el horizonte Ap de 10 cm de espesor, presentó estructura en bloques subangulares, finos y medios, débiles a moderados, con evidente refinamiento de los peds consecuencia de las prácticas culturales. Bajo SD el encostramiento resultó evidente y generalizado observándose claros signos de densificación superficial los que denotan un evidente deterioro de la macroestructura, de modo tal que el epipedón se torna masivo, con fractura a laminar grueso en los primeros 5 cm (Fig. 5). La continuidad de la estructura masiva por debajo de los 10 cm superficiales -profundidad media de labranza en la región- indicaría que el deterioro de la calidad de la estructura en superficie se suma a aquel provocado por la génesis de plowpanes. Características superficiales similares fueron citadas, entre otros, por Bonel *et al.* (2005) para suelos de la región pampeana húmeda. La génesis de costras superficiales puede disminuir la capacidad de captación de agua en una zona donde ésta resulta la principal limitante de la producción de cultivos, así como propiciar condiciones que permiten la generación de escurrimiento superficial bajo lluvias intensas (Taboada & Micucci, 2002b) o incluso favorecer la ocurrencia de procesos de erosión eólica en suelos secos y desnudos, tal como fue observado con condiciones de vientos fuertes.

No se evidenció bajo SD un aumento de la bioporosidad, señalado como una de las ventajas comparativas de este sistema de labranza (Francis & Knight, 1993). Por el contrario, en algunos lotes de más de 15 años de implementada esta práctica y bajo la secuencia trigo-girasol, se observaron numerosas cavidades no interconectadas de tamaño superior a 1 cm, generadas por la proliferación de larvas de *Diloboderus abderus* “bicho torito”, en una proporción de 50-60 larvas por m<sup>2</sup>. La aplicación de agroquímicos tendientes a su control, podría haber provocado un efecto detrimental sobre la mesofauna generadora de biocanales, particularmente lombrices.

La observación a campo de la estructura del suelo y de la presencia o no de bioporos resulta de gran interés a los fines de realizar un primer diagnóstico del estado físico del suelo, lo cuál está de acuerdo con reportes previos (Soracco *et al.*, 2010).



**Figura 5:** Evidencias morfológicas de deterioro de la macroestructura bajo SD.

## **4.2. Parámetros bioquímicos**

### **4.2.1. pH actual**

La reacción del suelo (pH) es una medida que refleja la actividad de los hidrogeniones ( $H^+$ ) presentes en su solución. El conocimiento de esta propiedad es de gran significado pues determina los procesos involucrados en la pedogénesis, la disponibilidad y absorción de nutrientes, influye sobre la actividad de los organismos del suelo y la descomposición de la MO y determina la presencia o ausencia de elementos tóxicos tales como Al, Mn y Fe (Millán *et al.*, 2010).

Los resultados obtenidos para el análisis de esta variable muestran una interacción significativa entre los factores evaluados ( $p < 0,001$ ). En todos los lotes estudiados la reacción del suelo fue ligeramente ácida (Schoeneberger *et al.*, 2002), con valores de pH actual que oscilaron entre 5,8 y 6,5. El tratamiento de textura más fina fue el que presentó los valores más elevados (6,3 a 6,5). Considerando los suelos de textura FA, si bien las diferencias no siempre resultaron estadísticamente significativas, se observó una tendencia a una mayor acidificación en los tratamientos que incluyen cultivos invernales y estivales en la secuencia (SD10FG1, SD15FG1 y LR15FG1) con diferencias de entre 0,1 a 0,7 unidades de pH respecto a SD15FF1 y SD15FB1 (Tabla 1). Comparando los sistemas de labranza entre si, se detectó una ligera disminución de 0,2 unidades de pH bajo SD15FG1 respecto a la LR, similar a lo reportado por Rasmussen (1999). Otros estudios realizados en suelos del oeste de Canadá (Arshad *et al.*, 1990) y en la región pampeana argentina (Buschiazzo & Panigatti, 1996) también reportan que el pH desciende en lotes bajo SD continua.

Algunos trabajos citan que las distintas rotaciones de cultivo no afectan el pH (Riedell *et al.*, 1998) o las diferencias son de escasa magnitud (Mc Vay *et al.*, 1989). En cambio, en esta investigación, si se comparan las distintas secuencias de cultivo se observa una disminución de 0,2 a 0,7 unidades de pH en SD15FG1 respecto a SD15FF1 y SD15FB1. Esta mayor pérdida de bases posiblemente responda a una mayor extracción y exportación en el grano asociada al mayor número de cultivos, más que a la aplicación diferencial de fertilizantes en este tratamiento respecto a las otras dos combinaciones. La aplicación de N en la región no justificaría, por sus bajas dosis, descensos marcados en el pH (Gutiérrez Boem *et al.*, 2006).

**Tabla 1.** Valores medios de pH actual para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	6,1 ± 0,06 <sup>#</sup> BC	6,0 ± 0,06 CD	5,9 ± 0,06 D	6,2 ± 0,07 AB	6,1 ± 0,07 BC	6,3 ± 0,07 A
5-10	6,0 ± 0,05 B	5,9 ± 0,05 BC	5,8 ± 0,05 C	6,4 ± 0,06 A	6,3 ± 0,06 A	6,3 ± 0,06 A
10-18	6,0 ± 0,05 B	6,0 ± 0,05 B	5,8 ± 0,05 C	6,4 ± 0,05 A	6,5 ± 0,05 A	6,5 ± 0,05 A

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media.

#### 4.2.2. Carbono orgánico total

La fuente original de la MO del suelo son los restos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, así como la biomasa microbiana (Galantini, 2005). En el presente estudio el COT varió entre 10,0 g kg<sup>-1</sup> y 22,2 g kg<sup>-1</sup> (Tabla 2), mostrando el análisis estadístico de su concentración una interacción significativa entre tratamientos y profundidad de muestreo ( $p=0,004$ ).

En todas las profundidades evaluadas se observó el mayor COT en SD15FG2 de textura F a Fa. No se detectaron diferencias marcadas al contrastar entre si los tratamientos de textura más gruesa aunque en general, los lotes bajo SD con secuencias de cultivos invernales y estivales (SD10FG1 y SD15FG1) tuvieron siempre los menores valores en la medición de esta variable.

**Tabla 2.** Valores medios de carbono orgánico total (g kg<sup>-1</sup>) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	19,1 ± 1,01 <sup>#</sup> B	14,4 ± 1,01 D	14,1 ± 1,01 D	16,0 ± 1,13 CD	17,7 ± 1,13 BC	22,2 ± 1,13 A
5-10	14,4 ± 0,63 BC	12,6 ± 0,63 D	12,9 ± 0,63 CD	14,6 ± 0,70 B	13,0 ± 0,70 BCD	18,3 ± 0,70 A
10-18	13,0 ± 0,56 C	10,0 ± 0,56 D	12,2 ± 0,56 C	12,3 ± 0,62 C	14,6 ± 0,62 B	18,1 ± 0,62 A

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p<0,10$ ). #: Error estándar de la media.

Al analizar el comportamiento de todos los tratamientos con la profundidad, se observa que, en general, el COT en g kg<sup>-1</sup> presenta estratificación en su distribución dentro del epipedón, registrándose los mayores valores en superficie respecto a las capas subyacentes. En SD, dicha estratificación ha sido ampliamente citada por la bibliografía (Díaz-Zorita *et al.*, 2004; Morrás *et al.*, 2004; Galantini *et al.*, 2008; Martínez *et al.*, 2013a) y se atribuye a la menor intensidad de mineralización de la MO del suelo como resultado de disminuciones en la temperatura, conjuntamente con la falta de incorporación y mezclado de los residuos con el suelo (Crespo *et al.*, 2001). La estratificación del COT fue evidente en LR sólo al comparar el espesor 0-5 cm con el resto de las profundidades ( $p<0,10$ ) debido al mayor volumen de rastrojo incorporado.

El efecto de las distintas labranzas sobre el contenido de COT varía según la profundidad de muestreo considerada. Sasal *et al.* (2006) en suelos de la región pampeana húmeda informaron mayores contenidos de COT en los 5 cm superficiales bajo SD, comparados con LR. Sin embargo, otros autores no encontraron diferencias al

considerar mayores espesores, como 0-10 cm (Bonel *et al.*, 2005) ó 0-20 cm (Puget & Lal, 2005). Por otro lado, en la revisión bibliográfica realizada por West & Post (2002), se reporta que los contenidos de COT en el horizonte superficial de los suelos de los sistemas bajo SD eran mayores que aquellos bajo LR. En este trabajo se observó la situación inversa, ya que si comparan los resultados obtenidos en SD15FG1 y LR15FG1 se puede advertir que en superficie los contenidos de COT fueron un 35% más elevados en el último sistema de labranza, mientras que a mayor profundidad no se detectan diferencias significativas entre ambas combinaciones en coincidencia con lo reportado por Costantini *et al.* (2006) y Baker *et al.* (2007).

El efecto de las secuencias de cultivos sobre los contenidos de MO y la dinámica del N es también ampliamente reconocida (Power, 1990; Bullock, 1992; Galantini *et al.*, 2008) dada su influencia sobre la dinámica del C del suelo, al condicionar el momento, la cantidad y la calidad del aporte de residuos vegetales (Studdert & Echeverría, 2000). En general se afirma que la inclusión de gramíneas en la rotación mejora el balance de C del suelo, tanto por la cantidad como por la calidad de los residuos aportados y porque se logra una mayor cobertura de rastrojos respecto a secuencias que incluyen al girasol (Díaz-Zorita & Grove, 2001; García, 2011). Al respecto, estudios realizados en Dakota del Norte (USA) por Merrill *et al.* (2006) y Krupinsky *et al.* (2007) señalan que el trigo produce altos niveles de cobertura (en general más de 90%) mientras que girasol produce niveles del orden del 45% y 70%. Estudios realizados por López *et al.* (2014) en suelos del SO bonaerense confirman una mayor cobertura de residuos asociada a los cultivos invernales (44%) respecto a los de ciclo estival (31%).

En este trabajo las diferencias entre los tratamientos bajo SD de 15 años con distintas secuencias de cultivo no siempre resultaron estadísticamente significativas. Sin embargo, en concordancia con la bibliografía citada se detecta una tendencia del COT a aumentar en SD15FF1 con respecto a SD15FG1, lo que podría asociarse al mayor aporte de rastrojos y biomasa radical del cultivo de trigo con respecto a la oleaginosa (Andrade *et al.*, 1996), ya que los aumentos de COT en el suelo se encuentran frecuentemente asociados a los incrementos en el volumen de los residuos aportados (Campbell *et al.*, 1991, 2000; García, 2011). Al producirse mayor biomasa de residuos a través del año, existen, en el largo plazo, mayores oportunidades para ingresar carbono al suelo vía fotosíntesis y de lograr mayores reservas de MO (Franzluebbers, 2004).

Los valores de COT para el promedio ponderado del epipedón, calificados como medios para la región (Rivero & Cruzate, 2008), fueron de 11,9 g kg<sup>-1</sup> y 12,9 g kg<sup>-1</sup> para los tratamientos bajo SD con secuencias que incluyen cultivos de verano por 10 y 15 años, y de 14,0 g kg<sup>-1</sup>; 15,0 g kg<sup>-1</sup> y 15,4 g kg<sup>-1</sup> para SD15FB1, SD15FF1 y LR15FG1, respectivamente. La literatura señala que suelos más arcillosos retienen más MO que suelos arenosos, aun cuando ambos hayan sido sometidos a aportes similares (Jenkinson, 1988). En coincidencia con lo observado por el autor, los suelos de textura F a Fa (SD15FG2) presentaron un mayor contenido de COT que los suelos de granulometría más gruesa (SD15FG1) en todas las profundidades evaluadas y, por lo tanto, en el promedio ponderado del epipedón (19,3 g kg<sup>-1</sup>).

Los suelos de los tratamientos de textura FA partieron de contenidos iniciales de COT similares, siendo estos de 12,5 g kg<sup>-1</sup> a 13,5 g kg<sup>-1</sup> para el año 1992 (datos cedido por productores). Los resultados observados bajo SD señalan que la aplicación de SD15FB1 y SD15FF1 redundó en un incremento relativo de COT en el horizonte superficial de los suelos del 8% y 15%, respectivamente. Por el contrario, la introducción de cultivos estivales en la secuencia no contribuyó a aumentar los contenidos de COT en el epipedón de los suelos de la región de estudio.

Al realizar el estudio de los contenidos de COT por ha, también se detectó una interacción significativa entre tratamientos y profundidad de muestreo ( $p < 0,0001$ ). Se observaron valores extremos de 31,3 hasta 38,1 Mg ha<sup>-1</sup> para el total del epipedón de los suelos FA, mientras que el stock de COT para el horizonte superficial de los suelos de textura más fina fue de 43,3 Mg ha<sup>-1</sup>.

El análisis de su distribución dentro del horizonte superficial revela que los mayores contenidos de COT en todos los tratamientos se detectan en los 10-18 cm respecto a las capas superficiales (Tabla 3). Esto está asociado al mayor espesor de suelo considerado y, en SD, a la densificación registrada en esta profundidad con respecto a las suprayacentes.

En los suelos de textura más fina se detectaron los contenidos de COT más elevados en todas las profundidades evaluadas. Considerando las combinaciones de granulometría más gruesa y para la superficie del suelo, se observa un valor de COT más alto en LR15FG1 (12,4 Mg ha<sup>-1</sup>) con respecto a SD10FG1 (10,1 Mg ha<sup>-1</sup>) y SD15FG1 (9,4 Mg ha<sup>-1</sup>) mientras que SD15FF1 y SD15FB1 presentaron valores intermedios. En 5-10 cm no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Por último, en la profundidad 10-18 cm, se observa que SD15FF1 y SD10FG1 poseen respectivamente,

los mayores y menores contenidos de COT, presentando SD15FB1, SD15FG1 y LR15FG1 valores intermedios y sin diferencias estadísticas entre ellos.

**Tabla 3.** Valores medios de carbono orgánico total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	12,4 ± 0,66 <sup>#</sup> A	10,1 ± 0,66 BC	9,4 ± 0,66 C	11,1 ± 0,72 AB	11,2 ± 0,72 AB	12,7 ± 0,72 A
5-10	9,9 ± 0,43 B	9,3 ± 0,43 B	9,6 ± 0,43 B	10,1 ± 0,48 B	9,6 ± 0,48 B	11,4 ± 0,48 A
10-18	13,7 ± 0,63 C	11,9 ± 0,63 D	14,4 ± 0,63 C	14,7 ± 0,70 C	17,3 ± 0,70 B	19,2 ± 0,70 A

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media.

En general, los niveles de COT expresados por unidad de área ( $\text{kg o Mg ha}^{-1}$ ), brindan una información más precisa de los efectos de la aplicación de distintos sistemas de laboreo sobre el suelo (Barrios Arosemena *et al.*, 2000). Sin embargo, debe considerarse que los stocks de COT pueden ser sobreestimados como consecuencia de la mayor Dap del suelo reportada bajo SD (Studdert & Echeverría, 2002). De este modo, al calcular los contenidos totales de COT en el epipedón de los suelos, se obtuvieron similares o mayores valores en SD15FB1 ( $35,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y SD15FF1 ( $38,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) en comparación con LR15FG1 ( $36,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Resulta interesante destacar que a pesar del mayor espesor considerado y la Dap más elevada a la profundidad 10-18 cm, los bajos valores de COT ( $\text{g kg}^{-1}$ ) registrados en SD15FG1 y particularmente en SD10FG1, no lograron incrementar el COT expresado en masa ( $33,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $31,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente) cuando se los compara con LR15FG1.

#### 4.2.3. Nitrógeno total y Relación C/N

El NT es el nutriente que en mayor medida condiciona el crecimiento y rendimiento de los cultivos en los suelos de la región pampeana. Los suelos presentan distinta capacidad potencial de proveer N a las plantas a partir de la mineralización de la MO humificada. Tanto su disponibilidad inicial como el aporte posterior responden a complejas interacciones entre los factores que afectan la descomposición y la inmovilización del N mineral (Walley *et al.*, 2002). El sentido, la magnitud y el resultado final de tales relaciones son determinados por las condiciones ambientales y por la influencia de las decisiones de manejo tales como las labranzas, la cantidad y la calidad

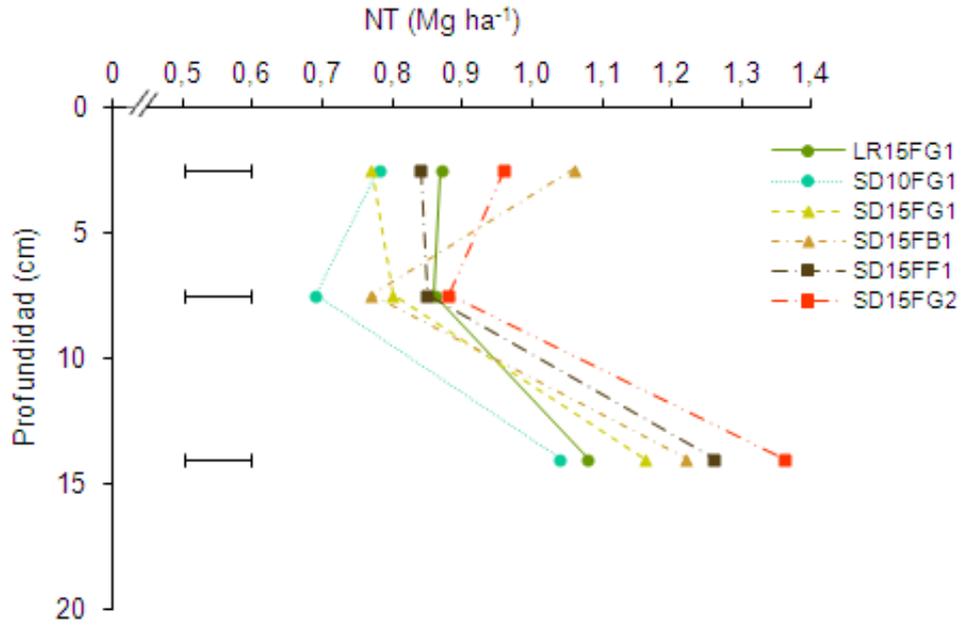
de los residuos devueltos al suelo y la duración de los períodos de barbecho, entre otras (Tisdale *et al.*, 1993; Studdert *et al.*, 2000). El análisis estadístico evidenció que existe interacción entre tratamientos y profundidad de muestreo para el análisis del NT expresado en  $\text{g kg}^{-1}$  ( $p=0,002$ ) y en  $\text{Mg ha}^{-1}$  ( $p<0,0001$ ). Al comparar los resultados obtenidos en la medición de esta variable en concentración, el tratamiento SD15FG2 se separa claramente del resto en todas las profundidades estudiadas, mostrando un contenido de NT significativamente más elevado (Tabla 4). En cambio, al expresar los resultados en  $\text{Mg ha}^{-1}$ , las diferencias a favor de la combinación de textura más fina no resultaron significativas debido a la influencia de la Dap (Fig. 6).

**Tabla 4.** Valores medios de nitrógeno total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	1,34 ± 0,06 <sup>#</sup> C	1,12 ± 0,06 D	1,16 ± 0,06 D	1,53 ± 0,07 B	1,33 ± 0,07 C	1,70 ± 0,07 A
5-10	1,24 ± 0,05 B	0,93 ± 0,05 D	1,08 ± 0,05 C	1,11 ± 0,06 BC	1,16 ± 0,06 BC	1,42 ± 0,06 A
10-18	1,03 ± 0,04 B	0,87 ± 0,04 C	0,98 ± 0,04 B	1,02 ± 0,04 B	1,07 ± 0,04 B	1,28 ± 0,04 A

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p<0,10$ ). #: Error estándar de la media.

En el análisis del NT en  $\text{g kg}^{-1}$  se observó estratificación de este nutriente en todas las combinaciones estudiadas ( $p<0,10$ ). En el caso de SD10FG1, SD15FB1 y SD15FF1 se detectaron los mayores valores de NT en superficie respecto a las profundidades de 5-10 cm y 10-18 cm mientras que en las combinaciones LR15FG1 y SD15FG1 los 0-5 cm y 5-10 cm no difirieron entre sí y presentaron un contenido de NT más elevado que 10-18 cm. Por último, los suelos de textura más fina (SD15FG2) presentaron disminuciones estadísticamente significativas desde la superficie a la profundidad 10-18 cm. Al igual que lo ocurrido con los contenidos de COT, y por las razones ya explicitadas, al expresar los resultados en  $\text{Mg ha}^{-1}$  se detectaron los mayores valores de NT en la profundidad 10-18 cm con respecto a las suprayacentes ( $p<0,10$ ).



**Figura 6.** Evolución de los contenidos de nitrógeno total (NT, Mg ha<sup>-1</sup>) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa ( $p < 0,10$ ).

Considerando los tratamientos de similar textura (FA) y para 0-5 cm, se observa que SD15FB1 presenta los contenidos de NT (g kg<sup>-1</sup> y Mg ha<sup>-1</sup>) más elevados respecto al resto de las combinaciones. A mayor profundidad, en general no se observan diferencias significativas entre tratamientos, aunque se detecta una tendencia marcada del NT a disminuir en SD10FG1. Al realizar la comparación entre sistemas de labranza, sólo se observan diferencias en los contenidos de NT (Mg ha<sup>-1</sup>) en los primeros 5 cm, con los mayores valores en LR15FG1 respecto a SD15FG1, en coincidencia a lo observado en el COT. Al expresar el NT en g kg<sup>-1</sup>, las diferencias a favor de la LR se manifiestan hasta los 10 cm.

La actividad de los microorganismos del suelo depende, entre otras cosas, de la cantidad y calidad de sustratos energéticos (compuestos carbonados) y de N. A través de las rotaciones es posible combinar cultivos que dejen diferentes cantidades de residuos de distinta calidad y con ello modificar la disponibilidad de este nutriente para el cultivo siguiente (Power & Doran, 1988). Al comparar los resultados obtenidos en la medición del NT en las distintas secuencias de cultivos, nuevamente se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas sólo en superficie, con los mayores contenidos en el tratamiento SD15FB1 con respecto a SD15FF1 y SD15FG1.

Al expresar el NT como promedio ponderado del epipedón, los valores obtenidos fueron mayores en SD15FG2 (1,44 g kg<sup>-1</sup>) respecto a los tratamientos de textura FA (SD10FG1: 0,96 g kg<sup>-1</sup>; SD15FG1: 1,06 g kg<sup>-1</sup>; LR15FG1 y SD15FF1: 1,17 g kg<sup>-1</sup>, SD15FB1: 1,19 g kg<sup>-1</sup>). Las diferencias detectadas al realizar el análisis por profundidades se ven aquí atenuadas. El stock de NT para el epipedón de los suelos fue: SD15FG2: 3,21 Mg ha<sup>-1</sup>; SD10FG1: 2,51 Mg ha<sup>-1</sup>; SD15FG1: 2,73 Mg ha<sup>-1</sup>; LR15FG1: 2,80 Mg ha<sup>-1</sup>; SD15FF1: 2,95 Mg ha<sup>-1</sup> y SD15FB1: 3,05 Mg ha<sup>-1</sup>.

En cuanto a la relación existente entre los contenidos de COT y NT en los tratamientos comparados, se encontraron relaciones positivas significativas ( $p < 0,05$ ) tanto en concentración (LR15FG1= r: 0,76; SD10FG1= r: 0,83; SD15FG1= r: 0,56; SD15FB1= r: 0,65; SD15FF1= r: 0,69; SD15FG2= r: 0,90), como en cantidad por ha (LR15FG1= r: 0,70; SD10FG1= r: 0,82; SD15FG1= r: 0,91; SD15FB1= r: 0,69; SD15FF1= r: 0,91; SD15FG2= r: 0,96).

La relación C/N de la MO expresa su grado de descomposición, así como la magnitud del aporte de N durante su descomposición (Echeverría & Sainz Rozas, 2006). Este parámetro también presentó interacción significativa entre combinaciones y profundidad de muestreo ( $p = 0,0001$ ) (Tabla 5).

**Tabla 5.** Valores medios de relación C/N para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	14,3 ± 0,52 <sup>#</sup> A	12,8 ± 0,52 B	12,2 ± 0,52 B	10,4 ± 0,59 C	13,1 ± 0,59 AB	13,2 ± 0,59 AB
5-10	11,7 ± 0,62 BC	13,5 ± 0,62 A	12,0 ± 0,62 ABC	13,1 ± 0,69 AB	11,4 ± 0,69 C	12,9 ± 0,69 ABC
10-18	12,7 ± 0,55 B	12,8 ± 0,55 AB	12,2 ± 0,55 B	10,4 ± 0,61 C	13,2 ± 0,61 AB	14,1 ± 0,61 A

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media.

En superficie los mayores valores de relación C/N se observaron en LR15FG1 (14,3), SD15FG2 (13,2) y SD15FF1 (13,1). Las combinaciones SD10FG1 (12,8) y SD15FG1 (12,2) presentaron valores intermedios, mientras que SD15FB1 tuvo la menor relación C/N en dicha profundidad (10,4). En las profundidades de 5-10 cm y 10-18 cm en general no se detectaron diferencias marcadas entre tratamientos.

Los promedios ponderados para el epipedón fueron de 11,2; 12,1; 12,7; 12,9; 13,0 y 13,5 para SD15FB1, SD15FG1, SD15FF1, LR15FG1, SD10FG1 y SD15FG2, respectivamente. El valor más bajo observado en SD15FB1 se podría atribuir a la mayor

duración del barbecho respecto a las otras combinaciones, lo que determinaría una mayor mineralización de la MO. Esta sería más lenta en los suelos de textura más fina.

Las relaciones C/N descritas en este trabajo fueron similares a las reportadas por Galantini *et al.* (2007a) y Martínez *et al.* (2013b) en lotes bajo SD del sudoeste bonaerense.

#### 4.2.4. Fósforo disponible

El fósforo del suelo se encuentra en reservorios orgánicos e inorgánicos de diferente labilidad e interconectados entre sí, estando afectada su distribución y dinámica por las características del suelo, la fertilización y las labranzas (Zamuner *et al.*, 2008). Los Molisoles de la Región Pampeana poseen una concentración de fósforo total relativamente elevada, oscilando entre los 400 y 600 mg kg<sup>-1</sup> (Diez *et al.*, 2000); sin embargo, la cantidad de Pd para las plantas es normalmente inferior a 10 mg Pd kg<sup>-1</sup> (Echeverría & Ferrari, 1993).

El fósforo calculado con el método de Bray y Kurtz N°1 resulta ser un indicador sensible de las variaciones producidas en la disponibilidad del nutriente, dada su relación con el rendimiento de los cultivos (Rossi *et al.*, 2008). Es de destacar que el mismo mide el fósforo soluble y parte del que se encuentra en la fase sólida del suelo (Picone *et al.*, 2007), encontrándose preferentemente asociado a la fracción fina (Suñer *et al.*, 1999).

La acumulación superficial de los rastrojos en los sistemas de labranza conservacionista, particularmente en SD y la aplicación de los fertilizantes fosfatados producen cambios en la dinámica y distribución del fósforo, aumentando la concentración de sus formas disponibles en los primeros 5 cm (Duval *et al.*, 2013) o 10 cm (Calviño *et al.*, 2002). Se ha descrito una mayor disponibilidad de este elemento en la superficie de suelos del sur y sudoeste bonaerense manejados con dicho sistema de labranza (Suñer *et al.*, 2007). En concordancia con la bibliografía, en este trabajo se detectó una marcada estratificación de este nutriente dentro del epipedón de todos los tratamientos considerados, siendo los niveles entre 1,0 - 1,5 y 2,3 - 3,1 veces superiores en la profundidad 0-5 cm con respecto a los determinados en las profundidades 5-10 cm y 10-18 cm, respectivamente ( $p < 0,10$ ).

Los resultados obtenidos para el análisis de esta variable, muestran interacción ( $p < 0,0001$ ) y diferencias atribuidas a los factores evaluados (Tabla 6).

**Tabla 6.** Valores medios de fósforo disponible ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	23,6 $\pm$ 1,27 <sup>#</sup> B	15,6 $\pm$ 1,27 C	25,0 $\pm$ 1,27 B	15,5 $\pm$ 1,42 C	15,8 $\pm$ 1,42 C	34,0 $\pm$ 1,42 A
5-10	21,0 $\pm$ 1,17 B	10,6 $\pm$ 1,17 D	20,0 $\pm$ 1,17 B	10,3 $\pm$ 1,31 D	15,0 $\pm$ 1,31 C	24,8 $\pm$ 1,31 A
10-18	10,2 $\pm$ 1,05 A	6,4 $\pm$ 1,05 B	11,0 $\pm$ 1,05 A	5,0 $\pm$ 1,18 B	6,2 $\pm$ 1,18 B	11,5 $\pm$ 1,18 A

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). #: Error estándar de la media.

Se observaron menores contenidos de Pd en todas las profundidades de estudio en SD15FF1, SD10FG1 y SD15FB1 respecto a SD15FG1, SD15FG2 y LR15FG1 ya que en estas últimas combinaciones el consumo de fósforo sería más bajo. Las mayores aplicaciones de fertilizantes asociadas a los bajos rendimientos observados en la zona para los cultivos estivales, determinarían un balance positivo de fósforo en el suelo.

Las bajas concentraciones de Pd detectadas en los lotes con barbecho más prolongado (SD15FB1) podrían asociarse a la menor frecuencia de aplicación de fosfato diamónico y/o a la menor frecuencia de laboreo. La liberación del fósforo asociado a la MO se vería retardada, limitando su disponibilidad para las plantas (Suñer *et al.*, 2004).

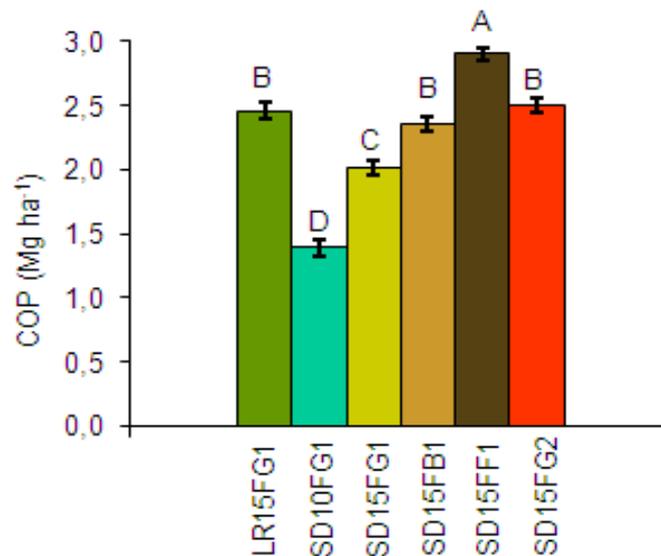
Al comparar los sistemas de labranza se observa una mayor variabilidad en los contenidos de Pd en la profundidad de 0-5 cm (medida a través del coeficiente de variación) en SD15FG1 (12,6) respecto a LR15FG1 (6,4). Según la bibliografía, en el primer sistema se produciría un aumento en la variabilidad espacial de los nutrientes poco móviles en la superficie del suelo. Esto sería consecuencia de la eliminación de la mezcla de fertilizante-suelo producida por el laboreo, de la heterogeneidad de la distribución de los residuos vegetales en superficie y también debida al uso más frecuente de aplicaciones localizadas de fertilizantes (Giuffré *et al.*, 1995).

Los contenidos de Pd para el epipedón de los tratamientos comparados fue de 9,4  $\text{mg kg}^{-1}$ ; 10,1  $\text{mg kg}^{-1}$ ; 11,3  $\text{mg kg}^{-1}$ ; 16,9  $\text{mg kg}^{-1}$ ; 17,4  $\text{mg kg}^{-1}$  y 21,4  $\text{mg kg}^{-1}$  para SD15FB1, SD10FG1, SD15FF1, LR15FG1, SD15FG1 y SD15FG2, respectivamente. En un estudio realizado por Suñer & Galantini (2013) se reportan contenidos de Pd de entre 2,0  $\text{mg kg}^{-1}$  y 26,0  $\text{mg kg}^{-1}$  con un promedio de 13,6  $\text{mg kg}^{-1}$  para 56 lotes bajo SD de la región sudoeste bonaerense.

#### 4.2.5. Carbono orgánico y Nitrógeno asociados a las fracciones de suelo > 100 $\mu\text{m}$ y <100 $\mu\text{m}$

##### 4.2.5.1. Carbono orgánico particulado y Relación COP/COT

La MO del suelo representa un compartimiento complejo cuyos componentes se encuentran asociados con partículas minerales de diferente tamaño, difiriendo en su estructura y funcionamiento (Galantini, 2005). En este sentido, es posible diferenciar dos formas orgánicas con características contrastantes: el carbono orgánico recalcitrante o asociado a la matriz mineral (COR) y el carbono orgánico joven o particulado (COP). El primero es una porción estable en el tiempo y de estructura muy compleja, que se caracteriza por su mayor grado de transformación y por tener una activa participación en la formación de los complejos órgano-minerales (Balesdent *et al.*, 2000; Wander, 2004). Por el contrario el COP, compuesto por partículas de tamaño arena y con tiempo de reciclado menor a una década (Buyanovsky *et al.*, 1994) es sensible a los efectos producidos por las diferentes prácticas de manejo, por lo que resulta clave para interpretar cambios en la calidad del suelo y en su productividad (Quiroga *et al.*, 1996; Fabrizzi *et al.*, 2003; Studdert *et al.*, 2005). El análisis estadístico realizado no detectó interacción entre tratamientos y profundidad ( $p=0,34$ ), aunque si se encontraron efectos significativos de ambos factores sobre el COP ( $p<0,05$ ) (Fig. 7).



**Figura 7.** Contenidos de carbono orgánico particulado (COP, Mg ha<sup>-1</sup>) en el epipedón de los suelos para las distintas combinaciones evaluadas. Letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p<0,10$ ). Las barras indican el valor del error estándar de las medias.

Se observó una estratificación marcada en los contenidos de carbono asociado a la fracción de suelo > 100  $\mu\text{m}$  en todos los lotes evaluados, con un mayor valor en los 0-5 cm (2,6  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) respecto a las profundidades de 5-10 cm (2,2  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y 10-18 cm (2,1  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Al tratarse de MO menos transformada, ésta es mayor en superficie, donde tiene lugar la acumulación de material vegetal en los sistemas de labranza conservacionista (Needelman *et al.*, 1999; Roldán *et al.*, 2012).

Los contenidos de COP en el suelo dependen de la agresividad de los sistemas de labranza y de los cultivos empleados en la rotación o secuencia. De esta manera, el tratamiento con mayor proporción de gramíneas (SD15FF1) mostró los stocks de COP más elevados en el horizonte superficial del suelo (8,8  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), seguido de SD15FG2 (7,5  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), LR15FG1 (7,4  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y SD15FB1 (7,0  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Las combinaciones bajo SD que incluyen cultivos de verano (SD15FG1 y SD10FG1) presentaron un menor COP (6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  y 4,2  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), respectivamente.

Si se considera el efecto de la secuencia de cultivos sobre esta variable, se observa que el contenido de carbono asociado a la fracción > 100  $\mu\text{m}$  en SD15FF1 resultó un 7% y un 24% superior a los obtenidos en SD15FB1 y SD15FG1, respectivamente.

Las gramíneas aportan un volumen de rastrojo más elevado y de menor tamaño que el girasol, además presentan relaciones C/N altas, lo que permitiría un mayor enriquecimiento de COT y COP en los suelos (Díaz-Zorita & Grove, 2001; Krupinsky *et al.*, 2007; García, 2011).

Mandolesi *et al.* (2002) y Galantini *et al.* (2007b) en trabajos que consideran secuencias de cultivos que incluyen al trigo y al girasol en la región semiárida-subhúmeda, reportan valores de carbono unido a la fracción gruesa en los horizontes superficiales de los suelos más bajos a los obtenidos en esta investigación.

Las diferencias obtenidas entre los tratamientos comparados en los contenidos de COT fueron aproximadamente del 2%, mientras que el COP resultó ser un indicador más sensible, con variaciones en sus contenidos entre las distintas combinaciones del 47%.

La proporción de carbono orgánico más fácilmente mineralizable respecto del COT, resulta un indicador sensible que permite inferir acerca del enriquecimiento o pérdida de C en suelos sometidos a diferentes manejos (Mandolesi *et al.*, 2002, Noellemeyer *et al.*, 2006). El análisis estadístico realizado reveló una interacción significativa entre los factores evaluados ( $p=0,01$ ) (Tabla 7).

**Tabla 7.** Valores medios de relación carbono orgánico particulado/carbono orgánico total para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	21,2 ± 3,0 <sup>#</sup> BC	15,0 ± 3,0 C	22,4 ± 3,0 B	28,3 ± 3,3 AB	31,7 ± 3,3 A	21,2 ± 3,3 BC
5-10	25,0 ± 1,7 AB	13,0 ± 1,7 D	21,5 ± 1,7 BC	19,5 ± 1,9 C	28,5 ± 1,9 A	21,6 ± 1,9 BC
10-18	16,3 ± 1,4 A	12,1 ± 1,4 C	13,3 ± 1,4 ABC	13,7 ± 1,6 ABC	15,8 ± 1,6 AB	12,5 ± 1,6 BC

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). #: Error estándar de la media.

En general, las mayores relaciones COP/COT se detectaron en la superficie del suelo, disminuyendo luego con la profundidad ( $p < 0,10$ ). Esto no fue observado en LR15FG1 ni en SD10FG1 ya que en los sistemas bajo LR habría una mayor distribución del material vegetal dentro de los primeros 10 cm del epipedón con respecto a 10-18 cm. El comportamiento observado en SD10FG1 podría ser atribuido al menor tiempo de implementación de la SD. Diez años bajo este sistema incorporando cultivos de verano que presentan escasa producción de rastrojos en la secuencia, probablemente no han sido suficientes para producir estratificación en esta relación. Esto resultaría en contenidos de COP más bajos y menores relaciones COP/COT respecto al resto de los tratamientos, las que además son similares en las distintas profundidades de estudio ( $p > 0,10$ ).

En las profundidades de 0-5 cm y 5-10 cm, SD15FF1 presentó las relaciones COP/COT más elevadas (32% y 28%, respectivamente), si bien en superficie no se diferenció estadísticamente de SD15FB1 (28%) y en 5-10 cm fue similar a LR15FG1 (25%). En los 10-18 cm no se detectaron diferencias importantes asociadas a la aplicación de los distintos tratamientos.

Entre el 77% y el 87% del contenido de COT en los horizontes superficiales de los suelos comparados se encuentra íntimamente asociada a la fracción mineral, por lo que en promedio para todos los tratamientos comparados la fracción de carbono orgánico poco transformada ligada a la porción mayor de 100  $\mu$ m representó aproximadamente el 20% del COT en el epipedón. Este valor se asemeja al informado por Quiroga *et al.* (2008) para rotaciones de pasturas perennes con agricultura (19%) y es inferior al 50% mencionado para sistemas sin disturbar de la región semiárida (Quiroga *et al.*, 2005). Kiessling *et al.* (2010) en Haplustoles énticos de la región semiárida pampeana bajo SD informaron valores de 10% - 13% en los primeros 15 cm del horizonte A.

#### 4.2.5.2. Carbono orgánico recalcitrante

Se detectó una interacción significativa entre tratamientos y profundidad de muestreo en el análisis del C asociado a la fracción fina del suelo ( $p < 0,0001$ ) (Fig. 8). Desde el punto de vista ambiental, esta fracción es de gran importancia, ya que permite secuestrar C en fracciones con un tiempo de ciclado muy largo. Al contrario de lo observado para el COP, el contenido de COR en todos los tratamientos fue superior en la profundidad 10-18 cm con respecto a la superficie. Si bien los procesos de transformación ocurren en la zona de contacto de los residuos con el suelo, por lo cual es esperable mayor contenido de MO más transformada a mayor profundidad (Roldán *et al.*, 2012) también influye en este estudio la Dap más elevada y el mayor espesor de suelo considerado a esta profundidad respecto a la superficie.

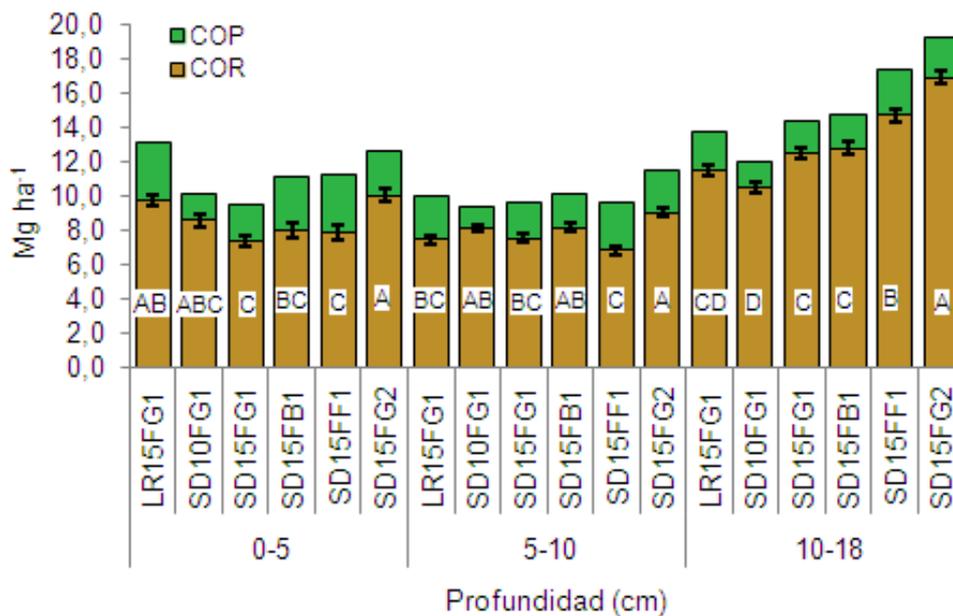
Aún cuando las diferencias no resultaron estadísticamente significativas en todos los casos, se observó que los valores de COR fueron levemente mayores en los suelos de textura F a Fa en las distintas profundidades evaluadas, con respecto a aquellos FA. Esto estaría asociado a la mayor capacidad de protección de la MO por la fracción fina, a mejores condiciones de humificación y a una mayor producción de materia seca, ligadas a factores como retención de nutrientes y humedad (Galantini *et al.*, 2004; Casas *et al.*, 2005).

Considerando sólo los tratamientos de textura superficial FA y en superficie, se detectan contenidos de COR superiores en LR15FG1 ( $9,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) con respecto a los sistemas SD15FF1:  $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  y SD15FG1:  $7,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ , mientras que SD10FG1 y SD15FB1 presentaron valores intermedios ( $8,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente). En la capa de 5-10 cm los menores valores de C asociado a la fracción menor a 100  $\mu\text{m}$  se observaron en SD15FF1 ( $6,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) mientras que el resto de las combinaciones presentó valores más elevados y similares entre sí (entre  $7,4$  y  $8,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). En los 10-18 cm, los contenidos de COR más altos y bajos fueron para SD15FF1 ( $14,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y SD10FG1 ( $10,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), respectivamente.

Como ya se mencionó, los valores de COR en la superficie del suelo fueron estadísticamente mayores bajo LR15FG1 respecto a SD15FG1. Sin embargo, a pesar de la significancia de las diferencias observadas en superficie, los stocks de C asociado a la fracción menor a 100  $\mu\text{m}$  en el epipedón fueron similares en ambos tratamientos (LR15FG1:  $28,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; SD15FG1:  $27,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

En la superficie del suelo no se detectaron diferencias entre las combinaciones bajo SD con distintas secuencias de cultivo. En los 5-10 cm, SD15FB1 ( $8,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y

SD15FG1 ( $7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) presentaron mayores valores de COR respecto a SD15FF1 ( $6,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) mientras que en la profundidad 10-18 cm se produjo la situación inversa, con los mayores contenidos de COR en SD15FF1 ( $14,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) en comparación con SD15FB1 ( $12,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y SD15FG1 ( $12,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). El comportamiento errático registrado para el COR condujo a que los contenidos totales en el epipedón resultaran similares en las tres combinaciones evaluadas:  $29,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $28,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  y  $27,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  para SD15FF1, SD15FB1 y SD15FG1, respectivamente. Esto coincide con lo reportado por algunos autores, quienes afirman que por su baja labilidad, los valores de COR no deberían ser muy diferentes entre suelos de texturas similares bajo diferentes prácticas de manejo (Domínguez, 2004; Eiza *et al.*, 2005).

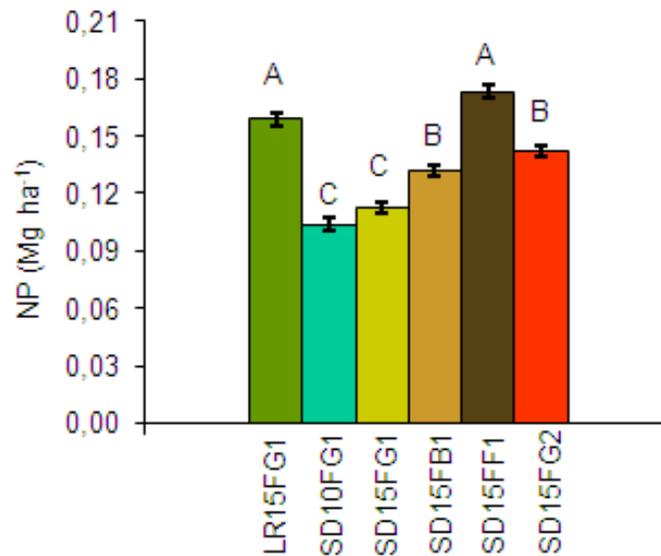


**Figura 8.** Contenidos de carbono orgánico particulado (COP,  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y carbono orgánico recalcitrante (COR,  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) a las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm para las distintas combinaciones evaluadas. Para cada profundidad, letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones en el COR ( $p < 0,10$ ). Las barras indican el valor del error estándar de las medias.

#### 4.2.5.3 Nitrógeno particulado y Relación NP/NT

La importancia del estudio del N asociado a la fracción gruesa del suelo, radica en que sus contenidos están asociados con la capacidad potencial de la MO particulada para aportar este nutriente a los cultivos (Koutika *et al.*, 2008). Este potencial es variable en el año y puede condicionar la respuesta a la fertilización así como la eficiencia en el uso del fertilizante (Quiroga *et al.*, 2001; Galantini *et al.*, 2007a).

El análisis estadístico del N asociado a la fracción de suelo > 100  $\mu\text{m}$  (NP) no mostró interacción entre tratamientos y profundidad de muestreo ( $p=0,26$ ) (Fig. 9).



**Figura 9.** Contenidos de nitrógeno particulado (NP,  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en el epipedón de los suelos para las distintas combinaciones evaluadas. Letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). Las barras indican el valor del error estándar de las medias.

Al igual que lo ocurrido para el COP se observó una estratificación de este nutriente con la profundidad ( $p < 0,001$ ), con los mayores contenidos en 0-5 cm ( $0,15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y los menores en las profundidades de 5-10 cm y 10-18 cm ( $0,13 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

Los tratamientos SD15FF1 ( $0,52 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y LR15FG1 ( $0,48 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) presentaron los valores de NP en el epipedón de los suelos significativamente más elevados. El resto de los tratamientos se separaron en dos grupos: SD15FG2 ( $0,43 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y SD15FB1 ( $0,40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) con un mayor NP que SD15FG1 ( $0,34 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y SD10FG1 ( $0,31 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

El comportamiento de esta variable resulta similar al observado para el COP. Considerando el sistema de labranza, se observaron valores más elevados de NP en LR15FG1 respecto a SD15FG1, mientras que si se analizan las secuencias de cultivo, se detectan diferencias significativas a favor de la combinación SD15FF1 respecto a SD15FB1 y SD15FG1.

Los tratamientos SD15FG1 y SD10FG1 no se diferenciaron entre si por sus contenidos de NP, y si en cambio se detectó un mayor COP en la primera combinación respecto a la segunda. Esta variable resultó más sensible al tiempo de implementación

de la SD que el NP, ya que aunque ambos parámetros están estrechamente relacionados, sus cinéticas son diferentes (Galantini & Suñer, 2008).

En lo que respecta a la relación NP/NT, en la que el análisis estadístico detectó interacción entre los factores evaluados ( $p < 0,0001$ ), se observaron valores más elevados en SD15FF1 y LR15FG1 respecto al resto de las combinaciones evaluadas en las profundidades de 0-5 cm y 5-10 cm (Tabla 8). En la profundidad 10-18 cm, los lotes bajo SD y secuencias que incluyen cultivos de invierno volvieron a presentar las relaciones NP/NT más elevadas respecto al resto de los tratamientos de granulometría FA, mientras que en SD15FG2 se observaron las relaciones significativamente más bajas, en coincidencia con los valores de nitrógeno recalcitrante (NR) más elevados descriptos en este tratamiento. Al expresar dicha variable en el epipedón se encontró que el NP particulado constituyó el 18; 17; 13; 13; 10 y 13% del NT en SD15FF1, LR15FG1, SD15FB1, SD10FG1, SD15FG1 y SD15FG2, respectivamente.

**Tabla 8.** Valores medios de relación nitrógeno particulado/nitrógeno total para las distintas combinaciones evaluadas.

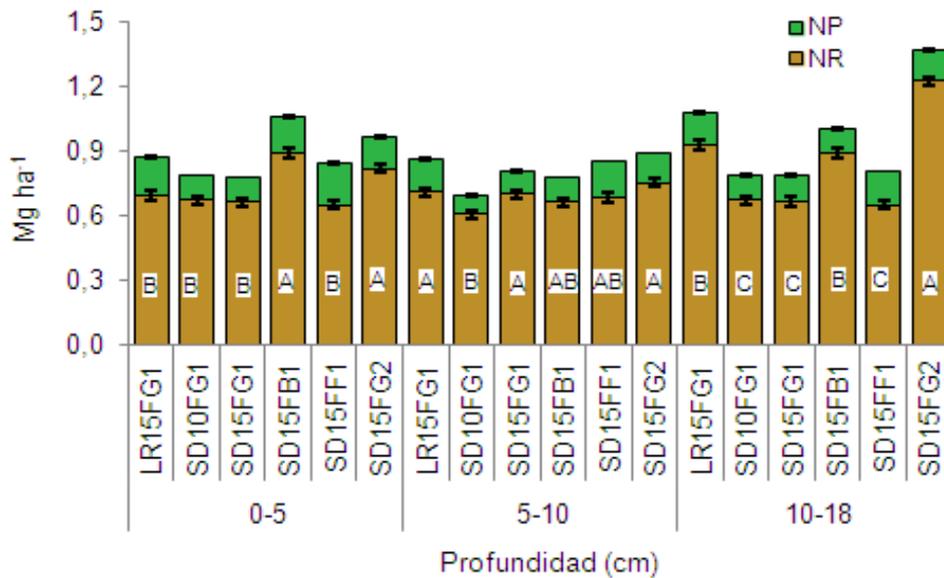
Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	20,1 ± 1,33 <sup>#</sup> A	14,6 ± 1,33 B	14,4 ± 1,33 B	16,2 ± 1,48 B	23,2 ± 1,48 A	15,7 ± 1,48 B
5-10	17,6 ± 1,09 AB	12,4 ± 1,09 D	13,5 ± 1,09 CD	13,7 ± 1,22 CD	19,6 ± 1,22 A	15,3 ± 1,22 BC
10-18	13,8 ± 1,25 B	14,6 ± 1,25 B	14,4 ± 1,25 B	16,2 ± 1,40 B	23,2 ± 1,40 A	10,4 ± 1,40 C

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). #: Error estándar de la media.

#### 4.2.5.4. Nitrógeno recalcitrante

El análisis estadístico realizado para el N unido a la fracción fina del suelo (NR) arrojó que existe interacción entre los factores evaluados ( $p < 0,0001$ ). Los resultados obtenidos muestran que en superficie, SD15FG2 y SD15FB1 presentaron mayores contenidos de NR respecto al resto de los tratamientos, que no se diferenciaron entre si (Fig. 10). En la capa de 5-10 cm no se observaron diferencias marcadas, si bien el N asociado a la fracción <100 um resultó más elevado en SD15FG2, LR15FG1 y SD15FG1 respecto a SD10FG1. En 10-18 cm se detectó un mayor contenido de N asociado a la fracción fina bajo los suelos F a Fa, y dentro de los tratamientos de textura FA, en LR15FG1 y SD15FB1 el NR fue superior que en SD10FG1, SD15FG1 y SD15FF1.

Los valores obtenidos para el stock en la profundidad 0-18 cm (2,20 Mg ha<sup>-1</sup>, 2,43 Mg ha<sup>-1</sup>, 2,39 Mg ha<sup>-1</sup>, 2,33 Mg ha<sup>-1</sup>, 2,66 Mg ha<sup>-1</sup> y 2,79 Mg ha<sup>-1</sup> para SD10FG1, SD15FF1, SD15FG1, LR15FG1, SD15FB1 y SD15FG21, respectivamente) muestran que para el área de estudio, aproximadamente el 82% - 89% del N del suelo se encuentra asociado a la fracción mineral en todos los suelos evaluados.



**Figura 10.** Contenidos de nitrógeno particulado (NP, Mg ha<sup>-1</sup>) y nitrógeno recalcitrante (NR, Mg ha<sup>-1</sup>) a las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm para las distintas combinaciones evaluadas. Para cada profundidad, letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones en el NR ( $p < 0,10$ ). Las barras indican el valor del error estándar de las medias.

En los suelos del área de estudio, el N y el C de ciclado lento fueron superiores a los encontrados en la fracción gruesa del suelo provocando bajas relaciones NP/NR y COP/COR, sin diferencias marcadas entre tratamientos, a excepción de SD15FF1 y LR15FG1 que en general presentaron ambas relaciones más elevadas, particularmente en los primeros 10 cm del horizonte superficial. Estos resultados ratifican que la mineralización del nitrógeno de los tratamientos comparados ocurren fundamentalmente a expensas de la degradación de la fracción de ciclado rápido de la MO.

#### 4.2.5.5. Relaciones COP/NP y COR/NR

Además de la distribución de las fracciones orgánicas, es importante evaluar su calidad. En este sentido, no se detectó una interacción significativa entre los factores ( $p=0,97$ ), ni efectos de la profundidad de muestreo ( $p=0,31$ ) en el estudio de las relaciones COP/NP. Los mayores valores en dicha relación, y sin diferencias entre ellos, lo tuvieron SD15FG1 (17,8), SD15FB1 (18,0), SD15FG2 (17,4) y SD15FF1 (17,1) mientras que LR15FG1 (15,4) y SD10FG1 (13,3) fueron las combinaciones que presentaron las menores relaciones carbono/nitrógeno.

Galantini *et al.* (2007a) en lotes bajo SD del sudoeste bonaerense reportaron relaciones COP/NP superiores (19,3) a las obtenidas en este trabajo, mientras que Kiessling (2012) cita valores menores (11,5) y similares entre sistemas de LV y SD.

La relación C/N en la fracción más estable de la MO presentó interacción entre los factores evaluados ( $p=0,002$ ), mostrando los mayores valores en LR15FG1 y SD15FF1 respecto al resto de las combinaciones estudiadas en los 10 cm superficiales del suelo (Tabla 9). En la profundidad de 10-18 cm, SD15FF1 presentó las relaciones significativamente más elevadas que el resto de las combinaciones de texturas franco arenosas, mientras que en el tratamiento de granulometría más fina se detectaron los menores valores en la medición de COR/NR.

**Tabla 9.** Valores medios de relación carbono orgánico recalcitrante/nitrógeno recalcitrante para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	0,25 ± 0,76 <sup>#</sup> A	0,18 ± 0,76 B	0,17 ± 0,76 B	0,19 ± 0,85 B	0,30 ± 0,85 A	0,19 ± 0,85 B
5-10	0,22 ± 0,72 AB	0,14 ± 0,72 D	0,16 ± 0,72 C	0,16 ± 0,80 CD	0,24 ± 0,80 A	0,18 ± 0,80 BC
10-18	0,16 ± 0,74 B	0,18 ± 0,74 B	0,17 ± 0,74 B	0,19 ± 0,66 B	0,30 ± 0,66 A	0,12 ± 0,66 C

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p<0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media.

#### 4.2.6. Índice estructural

El cálculo del índice estructural (IE) es una de las maneras de evidenciar cambios por efecto de manejo (rotación y labranzas). El mismo relaciona el contenido de MO del horizonte superficial con la fracción arcilla+limo, y reflejaría la respuesta del crecimiento de las plantas a las condiciones físicas del suelo y a la disponibilidad de nutrientes (Quiroga *et al.*, 2006).

De acuerdo a este parámetro, un suelo físicamente degradado presenta un IE  $\leq 5$ . Valores entre 5 y 7 indican suelos con alto riesgo a la degradación física por encostramiento o compactación, suelos con IE entre 7 y 9 presentan moderado riesgo a la degradación, mientras que si el índice resulta mayor a 9 los suelos se consideran estructuralmente estables o conservados (Pieri, 1995; Quiroga, 2002).

En la Tabla 10 se presentan los valores obtenidos en el cálculo de la relación MO/arcilla+limo (índice estructural) a las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm en los distintos tratamientos evaluados (p interacción combinación \* profundidad: 0,0001).

**Tabla 10.** Valores medios de índice estructural para las distintas combinaciones evaluadas.

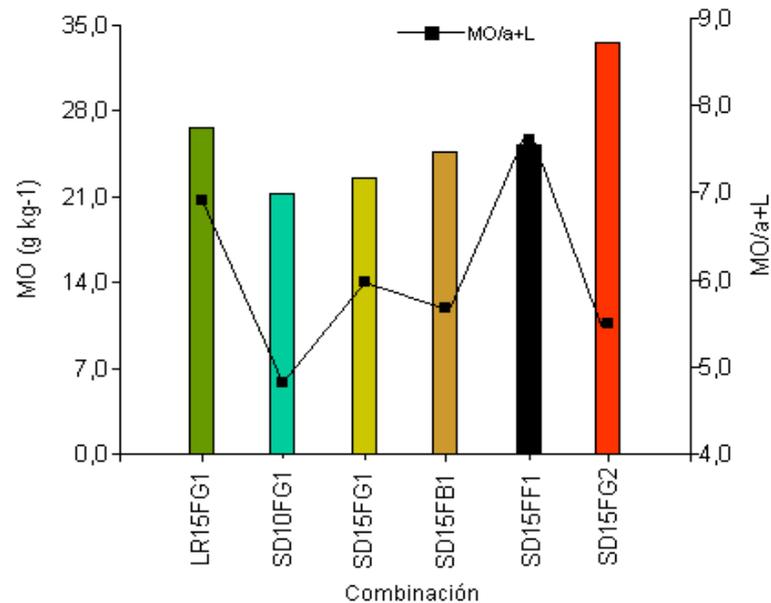
Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	8,6 $\pm$ 0,4 <sup>#</sup> A	5,4 $\pm$ 0,4 B	6,4 $\pm$ 0,4 B	6,5 $\pm$ 0,5 B	8,7 $\pm$ 0,5 A	6,5 $\pm$ 0,5 B
5-10	5,8 $\pm$ 0,2 B	4,6 $\pm$ 0,2 C	6,1 $\pm$ 0,2 B	6,1 $\pm$ 0,3 B	7,2 $\pm$ 0,3 A	5,1 $\pm$ 0,3 B
10-18	6,4 $\pm$ 0,2 B	4,5 $\pm$ 0,2 D	5,6 $\pm$ 0,2 BC	4,5 $\pm$ 0,3 D	7,5 $\pm$ 0,3 A	5,0 $\pm$ 0,3 CD

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media.

De acuerdo a los valores obtenidos para el IE, los suelos bajo estudio presentan un alto riesgo a la degradación física. La excepción la constituye el tratamiento SD15FF1 y los 5 cm superficiales de LR15FG1, donde el riesgo es moderado. Si se considera la totalidad del epipedón (0-18 cm), se observa un valor de 8 en SD15FF1 y de entre 5 a 7 en el resto de los tratamientos. En la Fig. 11 se graficaron los contenidos de MO y la relación MO/a+L del epipedón de los suelos bajo las distintas combinaciones evaluadas. Los resultados muestran la alta susceptibilidad de los suelos de la región semiárida a la pérdida de su calidad física, situación evidente aún en aquellos con texturas F-Fa y relativamente elevados contenidos de COT (SD15FG2).

Un modelo similar para los suelos de la región semiárida pampeana fue desarrollado por Bravo (2014) para el sector distal de la región pampeana (pampa austral). En este caso se plantean los umbrales de índice estructural (degradado, preservado o con acumulación de carbono orgánico) de acuerdo a los contenidos de arcilla+limo de los primeros 10 cm del horizonte superficial. A medida que la textura es más fina los umbrales se incrementan, siguiendo un comportamiento que puede ser explicado por un polinomio de segundo grado. De acuerdo a este modelo, los suelos de las combinaciones LR15FG1, SD15FB1 y SD15FF1 califican como preservados, mientras

aquellos tratamientos que consideran cultivos de verano en la secuencia se encontrarían degradados, independientemente de la textura (SD10FG1, SD15FG1 y SD15FG2).



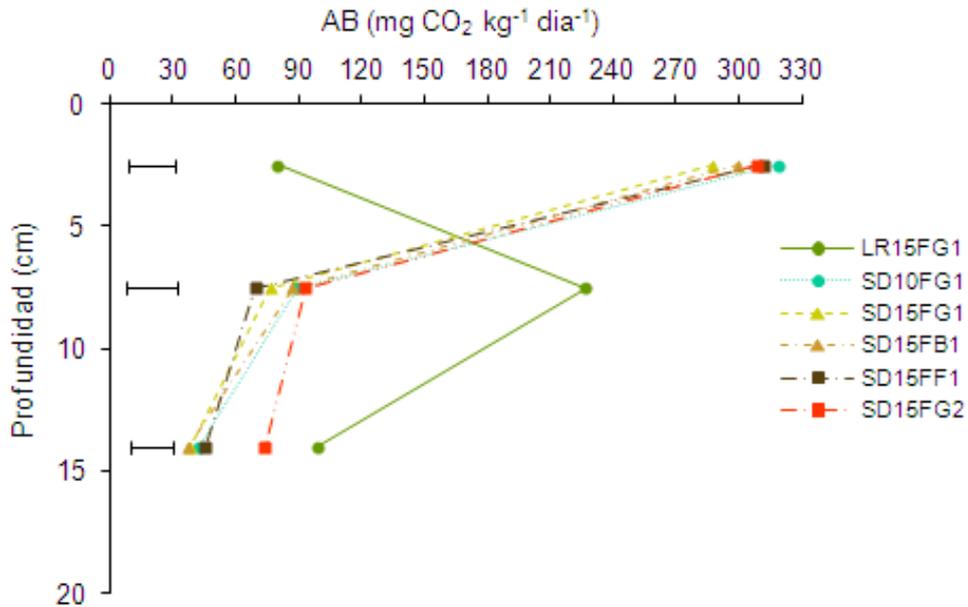
**Figura 11.** Contenidos de materia orgánica (MO, g kg<sup>-1</sup>) y relación MO/arcilla+limo para el epipedón de los suelos en las distintas combinaciones evaluadas.

#### 4.2.7. Actividad biológica

Los microorganismos del suelo llevan a cabo procesos cruciales en el ecosistema, como la descomposición de MO y el reciclaje de nutrientes. Está demostrado que la estructura de la comunidad microbiana puede ser afectada por las prácticas agrícolas, entre ellas la labranza y la rotación de cultivos (Yin *et al.*, 2010). Los microorganismos del suelo de mayor actividad en los ciclos de la MO son en su mayoría aerobios, por lo que la medición del dióxido de carbono producido por los mismos constituye una estimación de la actividad microbiana en el suelo (Sagardoy *et al.*, 2001).

El muestreo se realizó durante el mes de octubre, cuando todos los lotes se encontraban con cultivo de trigo y con porcentajes hídricos dentro del rango de AU los cuáles no resultarían limitantes para la actividad de los microorganismos (Han *et al.*, 2007).

Al realizar el análisis estadístico para la actividad biológica, se detectó una interacción significativa entre los tratamientos y la profundidad de muestreo ( $p < 0,01$ ).



**Figura 12.** Evolución de la actividad biológica ( $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa ( $p < 0,10$ ).

Los resultados (Fig. 12) mostraron evidentes signos de estratificación en todas las combinaciones bajo SD, con elevados valores de respiración en superficie ( $p < 0,10$ ). Resultados similares a los aquí obtenidos fueron reportados por Álvarez *et al.* (1995). Esto no se observó en la LR, combinación que presentó una mayor actividad biológica en las profundidades de 0-5 cm y 10-18 cm respecto a 5-10 cm. Este comportamiento estaría vinculado a la distinta posición que ocupan los residuos vegetales en los tratamientos comparados y a variaciones en el equilibrio aire-agua del suelo. Según Conant *et al.* (2004), la actividad biológica en ecosistemas semiáridos responde positivamente a la temperatura y a la humedad del suelo.

La respiración observada en 0-5 cm fue significativamente mayor ( $p < 0,10$ ) en todas las combinaciones bajo SD respecto a LR15FG1, mientras que en los 5-10 cm y 10-18 cm se registró un comportamiento inverso, con mayores valores de actividad microbiana en LR15FG1. Las diferencias más notorias corresponden a la superficie del suelo donde los valores de actividad biológica en los sistemas bajo SD superan en un 258% - 297% a aquellos registrados para la misma profundidad en LR ( $80,1 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ). Considerando las combinaciones en SD, se observa una mayor respiración en SD10FG1 ( $318,4 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) y SD15FF1 ( $311,5 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) respecto a SD15FG1 ( $287,4 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), mostrando SD15FB1 ( $299,8 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) y SD15FG2 ( $309,0 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) valores intermedios. En 5-10 cm no se detectaron diferencias

significativas entre los tratamientos considerados, mientras que en la profundidad 10-18 cm se repite lo observado en la profundidad 0-5 cm, sólo que en este caso el tratamiento de textura F-Fa posee una actividad biológica intermedia entre el resto de los tratamientos bajo SD y LR.

En lo que respecta a las distintas secuencias de cultivo, se detectó que la utilización de cultivos invernales (SD15FF1) provocó una mayor actividad microbiana en la profundidad de 0-5 cm respecto a SD15FG1, presentando SD15FB1 valores intermedios, no encontrándose diferencias significativas en los 5-10 cm y 10-18 cm, como ya fue señalado.

Finalmente, al analizar la actividad biológica global en el epipedón (0-18 cm) no se observaron grandes diferencias entre tratamientos de similar textura (SD15FG1: 118,0; SD15FB1: 124,1; SD15FF1: 126,1; LR15FG1: 129,3 y SD10FG1: 132,2 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>). En suelos con cultivo de trigo bajo SD en el SO de la región pampeana, Gómez *et al.* (1996) determinaron valores algo superiores de respiración microbiana (216 a 273 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) a una profundidad de 0-15 cm. El suelo de textura más fina presentó el valor más elevado (144,4 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) respecto de aquellos FA, probablemente debido al efecto protector de las arcillas sobre los microorganismos (Van Veen *et al.*, 1985; Franzluebbbers *et al.*, 1996). En términos generales, los resultados obtenidos en este estudio son coincidentes con los reportados por Carter (1986) y Álvarez *et al.* (1995), quienes describieron una mayor respiración bajo SD en los 5 cm superficiales del suelo con respecto a sistemas de LR, pero citan además que dicho incremento no se mantuvo a mayores profundidades.

#### 4.2.8. Índice de estratificación

La estratificación de la MO es común en ecosistemas naturales, pasturas implantadas y sistemas bajo labranzas conservacionistas prolongadas. La bibliografía cita que esta variable puede ser utilizada como indicador de calidad de suelo o de funcionamiento del ecosistema, ya que la MO superficial resulta esencial para el control de la erosión, la infiltración, conservación de nutrientes y el control de la emisión de gases de efecto invernadero (Franzluebbbers, 2002; 2009). Con la información disponible, no se detectaron diferencias en el índice de estratificación (cociente entre las concentraciones de COT o COP en los 0-5 cm con respecto a los 10-18 cm) entre los diferentes tratamientos evaluados. Los valores observados para el COT fueron 1,15; 1,22; 1,23; 1,32; 1,46 y 1,47 para SD15FG1, SD15FF1, SD15FG2, SD15FB1, SD10FG1 y LR15FG1, respectivamente, y de 1,07; 1,12; 1,13; 1,25; 1,26 y 1,56 para los contenidos

de COP en SD10FG1, SD15FG2, SD15FG1, LR15FG1, SD15FF1 y SD15FB1, respectivamente. En este trabajo el índice de estratificación de las variables COT y COP no resultó un indicador adecuado de los cambios en la calidad del suelo ya que no se detectaron diferencias entre los distintos tratamientos comparados.

De la misma manera que para el COT, se puede calcular dicho índice para la actividad biológica. En este caso, se detectaron diferencias entre las combinaciones evaluadas ( $p < 0,05$ ), en coincidencia con varios autores (Álvarez *et al.*, 1995,1998; Alkorta *et al.*, 2004), quienes señalan que las propiedades microbiológicas podrían reflejar cambios entre distintas prácticas de manejo más rápidamente que otras propiedades del suelo (tales como el contenido de COT), debido a su gran sensibilidad y rapidez de respuesta. Se detectaron mayores relaciones de estratificación de la actividad biológica en los tratamientos SD15FB1: 11,4; SD15FF1: 10,2; SD15FG1: 9,4 y SD10FG1: 8,2 (sin diferencias estadísticas entre si) respecto a SD15FG2: 4,4 y LR15FG1: 0,8. De acuerdo a Franzluebbers (2009), la magnitud de la estratificación dependerá del tipo de suelo, condiciones climáticas, manejo y tiempo transcurrido. En SD la estratificación es esperable, ya que los residuos no son incorporados al suelo. La baja relación actividad biológica 0-5 cm/10-18 cm en LR15FG1 se atribuye a la mayor incorporación de residuos y/o a la mayor porosidad existente en las capas subsuperficiales en este sistema respecto a SD15FG1, que favorecerían la actividad de los microorganismos del suelo a mayor profundidad dentro del epipedón.

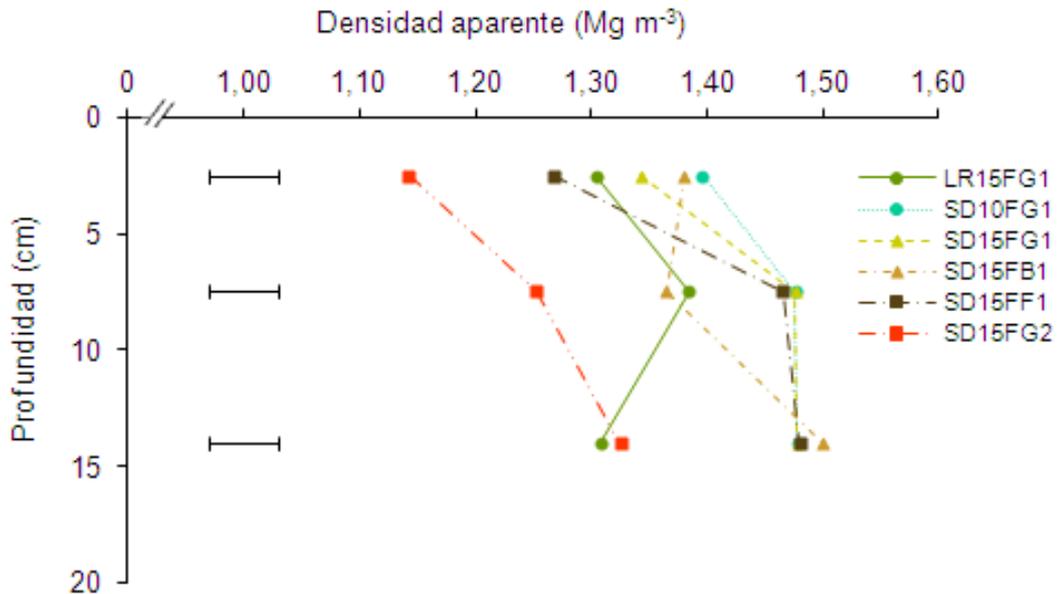
### **4.3. Parámetros físicos**

#### **4.3.1. Densidad aparente**

La densidad aparente (Dap), definida como la masa de suelo por unidad de volumen, tiene interés desde el punto de vista agronómico siendo su uso frecuente en los estudios de calidad edáfica, ya que brinda información sobre el estado de compactación de los horizontes del suelo y permite inferir la existencia de dificultades para la emergencia, la elongación de raíces y la circulación del agua y el aire (Reynolds *et al.*, 2007).

Los resultados estadísticos obtenidos en este trabajo para la Dap muestran una interacción significativa entre los tratamientos y la profundidad ( $p=0,0003$ ).

La representación gráfica de la evolución de esta propiedad con la profundidad dentro del horizonte superficial, se presenta en la Fig. 13.



**Figura 13.** Evolución de la densidad aparente ( $D_{ap}$ ,  $\text{Mg m}^{-3}$ ) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa ( $p < 0,10$ ).

El análisis de los valores obtenidos para esta variable expresan, en general, una tendencia a incrementarse bajo el sistema de SD en los 5-10 cm y 10-18 cm respecto a la superficie del suelo ( $p < 0,10$ ), situación no observada en los lotes de LR, donde la  $D_{ap}$  es mayor en los 5-10 cm ( $p < 0,10$ ). Este comportamiento, ha sido atribuido al tránsito de la maquinaria agrícola en los 5-10 cm (Pidgeon & Soane, 1977) y a la presencia de pisos de arado remanentes en la profundidad de 10-18 cm. El tratamiento que se diferencia del resto de las combinaciones bajo SD es SD15FB1, donde las  $D_{ap}$  observadas en 0-5 cm y 5-10 cm no difieren estadísticamente ( $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$  y  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ ), incrementándose luego en los 10-18 cm ( $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ ).

Al analizar el comportamiento de las combinaciones con textura FA en el horizonte superficial respecto a los lotes de granulometría F - Fa, se observa que en las profundidades 0-5 cm y 5-10 cm estos últimos presentaron las  $D_{ap}$  más bajas ( $1,14 \text{ Mg m}^{-3}$  y  $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente). Sólo en la profundidad correspondiente a los 10-18 cm el valor obtenido ( $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ ) no se diferenció estadísticamente de LR15FG1 ( $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ ).

Considerando los suelos FA, los valores de la Dap en la capa de 0-5 cm con mayor densidad de raíces muestran mayor variabilidad entre tratamientos que en las demás profundidades. Las Dap más bajas se registraron en SD15FF1 (1,27 Mg m<sup>-3</sup>) y LR15FG1 (1,30 Mg m<sup>-3</sup>), mientras que las más elevadas se verificaron en SD15FB1 (1,38 Mg m<sup>-3</sup>) y SD10FG1 (1,40 Mg m<sup>-3</sup>), presentando SD15FG1 valores intermedios (1,34 Mg m<sup>-3</sup>). Los valores observados en las secuencias con predominio de cultivos de invierno en SD (SD15FF1) se asociarían a las características del sistema radicular de las gramíneas, con gran desarrollo en los primeros cm del suelo, mientras que la Dap obtenida en LR sería consecuencia de la remoción producida por las labranzas. Los resultados obtenidos para SD15FB1 se explican si se considera que el muestreo se realizó al final del barbecho, es decir luego de un año y medio sin cultivos en el suelo.

En 5-10 cm, LR15FG1 (1,38 Mg m<sup>-3</sup>) y SD15FB1 (1,36 Mg m<sup>-3</sup>) presentaron Dap significativamente menores que SD15FF1 (1,46 Mg m<sup>-3</sup>), SD15FG1 (1,48 Mg m<sup>-3</sup>) y SD10FG1 (1,48 Mg m<sup>-3</sup>). Las diferencias obtenidas para esta profundidad pueden ser atribuidas a los sistemas de labranza utilizados, demostrando que la compresión por el tránsito produce en los suelos FA bajo SD densificaciones en esta porción del perfil. La excepción a dicho comportamiento la constituye SD15FB1, posiblemente asociado al menor tránsito de maquinarias agrícolas en estas secuencias ya que los lotes permanecen un año sin cultivar.

En la capa de 10-18 cm, las distintas combinaciones evaluadas bajo SD no tuvieron influencia sobre la Dap. Tampoco las diferencias observadas en esta profundidad responderían a procesos vinculados con la no inversión de la gleba, sino más bien deberían ser tomadas como indicio de la persistencia de plowpanes bajo este sistema, a pesar del tiempo transcurrido desde su implementación ( $\geq 8$  años). La ausencia de plowpanes o su disrupción mecánica en LR15FG1, queda reflejada por el valor obtenido para dicha profundidad (1,31 Mg m<sup>-3</sup>), significativamente menor ( $p < 0,10$ ) a los medidos en los lotes bajo SD de textura FA (entre 1,48 Mg m<sup>-3</sup> y 1,50 Mg m<sup>-3</sup>).

Considerando el promedio ponderado del horizonte A (18 cm) en los lotes de textura FA se encontraron valores de Dap de 1,33; 1,42; 1,43; 1,44 y 1,45 Mg m<sup>-3</sup> en LR15FG1, SD15FF1, SD15FB1, SD15FG1 y SD10FG1, respectivamente. Por otra parte, SD15FG2 presentó una Dap promedio de 1,25 Mg m<sup>-3</sup> en el epipedón.

En la literatura se encuentran resultados contradictorios cuando se comparan los efectos de distintos sistemas de labranza sobre la Dap del suelo. En un relevamiento realizado para la región pampeana, Álvarez & Steinbach (2009) detectaron mayores valores de Dap en la superficie del suelo bajo SD en comparación con sistemas de LR. Procesos de compactación similares a los descriptos fueron comunicados por Quiroga *et al.* (1996); Studdert & Echeverría (2002); Bonel *et al.* (2005); Sasal *et al.* (2006) y Álvarez *et al.* (2009), entre otros, para suelos de la región pampeana húmeda hasta semiárida. Por el contrario, Strudley *et al.* (2008) citan que no existen diferencias entre labranzas en los valores de Dap y porosidad total.

En los lotes bajo SD el aumento en la Dap estuvo correlacionado con el contenido de COT del suelo (SD10FG1:  $r: -0,62$ ,  $p < 0,01$ ; SD15FG1:  $r: -0,56$ ,  $p < 0,05$ ; SD15FB1:  $r: -0,69$ ,  $p < 0,01$ ; SD15FF1:  $r: -0,57$ ,  $p < 0,05$  y SD15FG2:  $r: -0,64$ ,  $p < 0,05$ ). Por otra parte, en LR no se detectó una relación significativa entre ambos parámetros.

Pilatti y de Orellana (2000) propusieron una ecuación para estimar los valores críticos de Dap en suelos de la región pampeana, sobre la base de que el contenido de arcilla está relacionado con el efecto que la Dap puede ejercer sobre el ambiente para el crecimiento de las raíces de los cultivos. Para los sitios bajo estudio, el valor de la Dap crítica (Dapc) obtenido en las distintas combinaciones evaluadas se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Valores de densidad aparente crítica (Dapc) y densidad aparente (Dap) para las distintas combinaciones evaluadas.

Combinación	Profundidad (cm)					
	0-5		5-10		10-18	
	Dapc	Dap	Dapc	Dap	Dapc	Dap
LR15FG1	1,43	1,30	1,40	1,38	1,41	1,31
SD10FG1	1,40	1,40	1,40	1,48	1,40	1,48
SD15FG1	1,40	1,34	1,41	1,48	1,41	1,48
SD15FB1	1,40	1,38	1,40	1,37	1,38	1,50
SD15FF1	1,42	1,27	1,42	1,47	1,42	1,48
SD15FG2	1,36	1,14	1,34	1,25	1,33	1,32

Para los tratamientos de textura FA, se observa que en la superficie del suelo la LR y los lotes bajo 15 años de SD con secuencias FF y FG presentaron valores de Dap entre un 4% y 11% por debajo del umbral crítico calculado, probablemente asociado a la acción superficial de las raíces. Lo mismo ocurrió con el tratamiento de textura más fina, que presentó densidades aparentes un 16% por debajo del valor crítico calculado. En cambio, bajo SD15FB1 y SD10FG1 se detectaron valores cercanos o similares a la Dapc, ya que

cuatro de los lotes presentaron una Dap elevada, alcanzando  $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ ,  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$  y  $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$  en la primera combinación y  $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$  bajo SD10FG1.

La profundidad 5-10 cm de los suelos de textura FA muestra compactación asociada al tránsito, ya que el 70% de los lotes presentaron densidades aparentes superiores al umbral. Sin embargo, el porcentaje de lotes afectado por un incremento de la compactación fue inferior bajo LR (40%) respecto a SD (78%). El deterioro de la estructura fue además más marcado en este último sistema de labranza, donde se detectaron valores de Dap hasta un 7% superiores a la Dapc, respecto al 1% de incremento relativo observado en LR. Nuevamente, y al igual que lo descrito para la Dap, la combinación que se diferencia del resto bajo SD es SD15FB1, tratamiento que en todos los casos presentó valores de Dap por debajo del umbral asociado al menor tránsito. En el caso de la combinación SD15FG2, si bien el umbral de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  no fue superado, dos de los cinco lotes considerados en el estudio presentaron una Dap similar o cercana a dicho límite ( $1,32$  y  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$ ), demostrando que los suelos de textura más fina también se verían afectados en el mediano plazo.

En la profundidad 10-18 cm, la totalidad de los lotes de textura franco arenosa bajo SD presentaron densidades aparentes hasta un 19% superiores a la crítica (entre  $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$  y  $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$ ), asociado a los pisos de arado remanentes. En contrapartida, la Dap observada bajo LR (entre  $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$  y  $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$ ) no excedió el umbral calculado en ninguno de los casos. En los suelos de textura más fina, tres de los cuatro lotes presentaron valores similares ( $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ ) o superiores al umbral ( $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  y  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ ) posiblemente asociado a la presencia de compactaciones preexistentes.

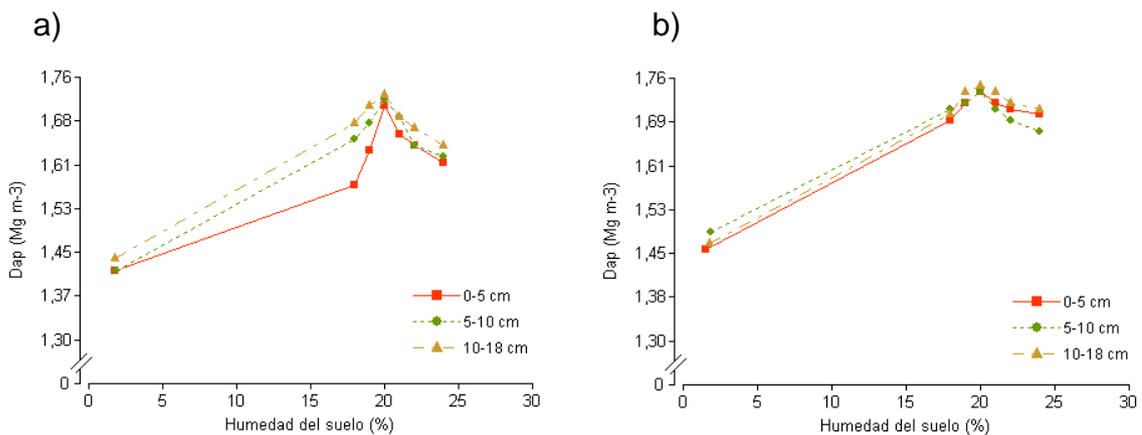
#### **4.3.2. Densidad aparente máxima y Compactación relativa**

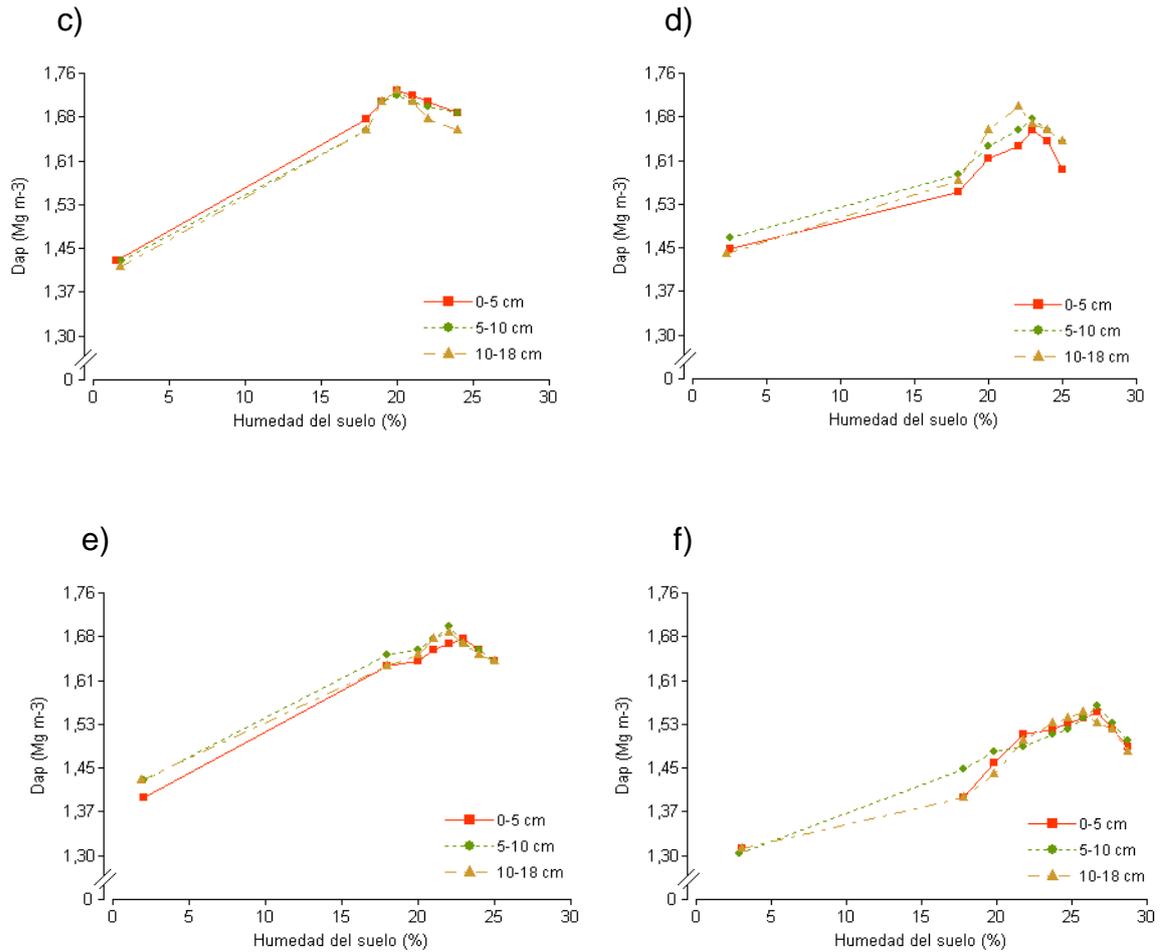
La compactación de los suelos en sistemas agrícolas depende tanto de factores extrínsecos como el tráfico de las maquinarias y la acción de las labranzas (Hamzaa & Anderson, 2005), así como también de algunas de sus propiedades intrínsecas tales como textura, contenidos de MO y humedad al momento de ocurrir el estrés. La susceptibilidad de los suelos a ser compactados es caracterizada usando el procedimiento de la prueba de Proctor. Este test es un método estandarizado que describe los cambios en la resistencia del suelo a la compactación sobre un rango de contenidos de agua, utilizando una cantidad constante de energía (Zhang *et al.*, 1997; Aragón *et al.*, 2000).

En las curvas obtenidas mediante la utilización de esta técnica (Fig. 14) se observa que la densidad es una función creciente del contenido de humedad hasta el límite máximo de compactación, donde la porosidad de aireación es casi completamente eliminada y se alcanza el contenido de HC (Wagner *et al.*, 1994). Este último valor resulta importante en la toma de decisiones a la hora de transitar el lote, ya que está comprobado que en el umbral de HC la capacidad de soporte del suelo alcanza su valor más bajo (Micucci *et al.*, 2008). Como era de esperar, el análisis estadístico de esta variable no detectó evidencias de interacción ( $p=0,50$ ) entre los factores combinación y profundidad de muestreo (Tabla 12).

En la región, la capacidad de soporte del suelo estará comprometida más frecuentemente en los lotes de textura FA, asociado a los valores más bajos de HC (entre 20% y 23%) que se observan en estos tratamientos respecto a la combinación de granulometría más fina (26%).

La susceptibilidad de los suelos a la compactación puede ser expresada por una serie de parámetros, información que se presenta en la Tabla 12. Mettauier *et al.* (1983) consideran la pendiente de la rama ascendente de curva Proctor (variación de la Dap respecto a la variación de humedad,  $\Delta Dap / \Delta H$ ) como el mejor indicador de susceptibilidad a la compactación. Por otra parte, otros autores como Stengel *et al.* (1984) proponen a la Dap máx. como el indicador más adecuado para representar las condiciones menos favorables de porosidad del suelo.





**Figura 14.** Relación de la densidad aparente ( $Dap$ ,  $Mg\ m^{-3}$ ) con la humedad del suelo (%) (curvas Proctor) en las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm bajo a) LR15FG1, b) SD10FG1, c) SD15FG1, d) SD15FB1, e) SD15FF1 y f) SD15FG2.

**Tabla 12.** Parámetros derivados de las curvas Proctor para el horizonte superficial de los suelos (0-18 cm) para las distintas combinaciones evaluadas.

Combinación	HI (%)	HC (%)	$Dap$ máx. ( $Mg\ m^{-3}$ )	$\Delta Dap$	$\Delta Dap/\Delta H$
LR15FG1	1,8	20,0 $\pm$ 0,59 <sup>#</sup> C	1,72	0,30	1,6
SD10FG1	1,7	20,2 $\pm$ 0,59 C	1,74	0,27	1,5
SD15FG1	1,7	20,1 $\pm$ 0,59 C	1,73	0,29	1,6
SD15FB1	2,4	22,6 $\pm$ 0,53 B	1,68	0,23	1,2
SD15FF1	2,0	22,3 $\pm$ 0,53 B	1,69	0,27	1,3
SD15FG2	3,0	26,3 $\pm$ 0,53 A	1,57	0,26	1,1

HI: contenido de humedad inicial, HC: contenido de humedad crítico,  $Dap$  máx.: densidad aparente máxima,  $\Delta Dap$ : diferencia entre  $Dap$  máx. y  $Dap$  mínima,  $\Delta Dap/\Delta H$ , variación de la densidad aparente respecto a la variación en el contenido de humedad (HC-HI) expresado en porcentaje. Para HC, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). #: Error estándar de la media.

El análisis estadístico realizado para la  $Dap$  máx. reveló una interacción significativa ( $p=0,0001$ ) entre los tratamientos y la profundidad de muestreo (Tabla 13).

**Tabla 13.** Valores medios de densidad aparente máxima ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	$1,71 \pm 0,004^{\#}$ B	$1,74 \pm 0,004$ A	$1,73 \pm 0,004$ A	$1,67 \pm 0,004$ C	$1,68 \pm 0,004$ C	$1,56 \pm 0,004$ D
5-10	$1,71 \pm 0,004$ B	$1,74 \pm 0,004$ A	$1,72 \pm 0,004$ B	$1,68 \pm 0,005$ D	$1,70 \pm 0,005$ C	$1,57 \pm 0,005$ E
10-18	$1,72 \pm 0,007$ A	$1,74 \pm 0,007$ A	$1,73 \pm 0,007$ A	$1,70 \pm 0,008$ B	$1,69 \pm 0,008$ B	$1,58 \pm 0,008$ C

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). #: Error estándar de la media.

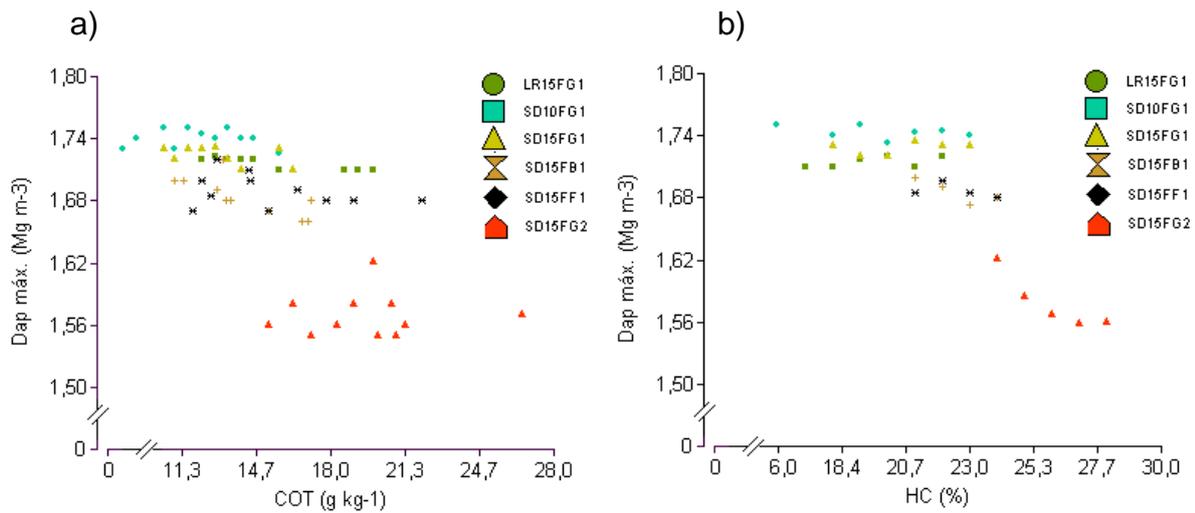
La Dap máx. alcanzada por el suelo bajo SD15FG2 resultó significativamente menor que la encontrada en el resto de las combinaciones de textura FA en todas las profundidades evaluadas, diferenciándose además por los mayores contenidos de HC a los que se alcanza la misma.

Según Quiroga (1994) y Micucci *et al.* (2006), entre otros, la forma de la curva Proctor es influida por los tenores de arcilla, MO y arena. Mientras los dos primeros provocan un corrimiento de la curva sobre el eje de la humedad, el contenido de arena influye sobre su amplitud. Díaz-Zorita & Grosso (2000) y Aragón *et al.* (2000), también examinaron los efectos de la MO en la Dap máx. y concluyeron que un aumento en su contenido reduce la compactabilidad de los suelos en la región pampeana. Esto se atribuye a un incremento de la resistencia a la deformación al condicionar la cohesión entre las partículas minerales y entre los agregados y/o a un aumento en la elasticidad (Soane, 1990). De esta manera, se observa que los suelos de textura FA presentaron una mayor susceptibilidad a la compactación ( $\Delta \text{Dap} / \Delta H$  según Mettauier *et al.*, 1983 en Quiroga *et al.*, 1999), lo que coincide con un menor contenido de MO y un mayor tenor de arena. Esto último provoca un ligero aguzamiento de la curva alcanzando así, una Dap máx. mayor a un contenido de humedad más bajo respecto a los suelos de textura más fina (Fig. 14).

Considerando sólo los tratamientos de textura FA bajo SD se observa que en todas las profundidades estudiadas, SD10FG1 y SD15FG1 presentaron una mayor Dap máx. (Tabla 13) y una susceptibilidad a la compactación más elevada en el epipedón, alcanzando además menores contenidos de HC con respecto a SD15FF1 y SD15FB1 (Tabla 12). Este comportamiento se asociaría a los menores porcentajes de COT observado en las secuencias bajo SD en las que intervienen los cultivos estivales con respecto a aquellas que no los consideran (Tabla 2). La combinación LR15FG1 presenta un comportamiento intermedio, en coincidencia con los contenidos de COT levemente superiores a SD10FG1 y SD15FG1 e inferiores/similares a SD15FF1 y SD15FB1. En la

Tabla 12 se detalla además, a modo ilustrativo, el promedio obtenido en la Dap máx. del epipedón de los suelos en las distintas combinaciones.

Existe amplio consenso en afirmar que la Dap máx. se relaciona significativamente con la HC y el COT (Wagner *et al.*, 1994; Aragón *et al.*, 2000; Díaz-Zorita & Grosso, 2000; Álvarez, 2013). También Quiroga *et al.* (1999) reportan una relación significativa entre la Dap máx. y la MO trabajando sobre Haplustoles de la región pampeana semiárida con texturas del horizonte superficial desde arenosas hasta francas. En coincidencia con lo reportado por estos autores, en los lotes bajo estudio el descenso de la Dap. máx. estuvo correlacionado con los aumentos en la HC ( $r: -0,84, p < 0,01, N: 81$ ) o los contenidos de COT ( $r: -0,71, p < 0,05, N: 81$ ) (Fig. 15). También se encontraron correlaciones negativas significativas entre la Dap máx. y las distintas fracciones del COT en el epipedón de todos los suelos evaluados. Los coeficientes hallados fueron de 0,38 y 0,24 para COP ( $p < 0,01$ ) y COR ( $p < 0,05$ ), respectivamente.



**Figura 15.** Relación entre la densidad aparente máxima (Dap máx.,  $\text{Mg m}^{-3}$ ) con **a)** el contenido de carbono orgánico total (COT,  $\text{g kg}^{-1}$ ) y **b)** la humedad crítica (HC, %) para las distintas combinaciones evaluadas.

La compactación relativa (CR) surge de relacionar la Dap hallada a campo respecto de la Dap máx. obtenida a partir del Test Proctor, siendo útil su determinación ya que permite realizar comparaciones del estado de compactación entre diferentes suelos y prácticas de manejo (Micucci & Taboada, 2006).

Los resultados estadísticos obtenidos en el estudio de la CR muestran una interacción significativa ( $p < 0,0001$ ) entre tratamientos y profundidad de muestreo (Tabla 14).

**Tabla 14.** Valores medios de compactación relativa (%) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	76,3 ± 0,20 <sup>#</sup> D	80,5 ± 0,20 B	77,6 ± 0,20 C	82,7 ± 0,22 A	75,5 ± 0,22 E	73,2 ± 0,22 F
5-10	80,6 ± 0,22 D	84,6 ± 0,22 B	85,9 ± 0,22 A	81,4 ± 0,25 C	86,2 ± 0,25 A	79,7 ± 0,25 E
10-18	75,8 ± 0,42 D	85,0 ± 0,42 BC	85,6 ± 0,42 B	88,2 ± 0,47 A	87,6 ± 0,47 A	83,9 ± 0,47 C

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media.

Analizando el comportamiento de esta variable se observa que en las profundidades de 0-5 cm y 5-10 cm, SD15FG2 presentó los menores valores de CR respecto del resto de los suelos con granulometría FA. Esta situación no se repitió en los 10-18 cm, ya que en este caso LR15FG1 fue el que mostró la CR significativamente más baja, asociada a la ausencia y/o disrupción mecánica de plowpanes en estos lotes, como ya fuera mencionado en la descripción de la Dap.

En la superficie del suelo, zona más influenciada por las raíces, la CR mostró un comportamiento similar al descrito para la Dap, alcanzando porcentajes del 73% al 83% diferenciándose además todos los tratamientos entre si. Los suelos de textura más fina, la LR y las combinaciones bajo SD con secuencias de cultivos invernales presentaron los menores valores (73% a 76%) respecto a FG y FB (78% a 83%). Los menores valores de CR observados en esta porción del perfil, también se asociarían al “efecto escarificador” de los distintos órganos de las sembradoras (cuchillas cortadoras de rastrojo, abresurcos, etc.).

Según Carter (1990) la CR resultaría una limitante crítica para el crecimiento de los cultivos si alcanza valores cercanos o superiores al 90%. En este estudio, los valores promedios de las distintas combinaciones no superaron en ningún caso dicho umbral. Sin embargo, las CR obtenidas para la profundidad 5-10 cm en los tratamientos SD15FF1 (86%), SD15FG1 (86%) y SD10FG1 (85%) están cercanas al umbral, lo que asociado a la reducción de los macroporos (mostrados en la Fig. 19), indicaría un deterioro en la calidad de los suelos. Esta situación podría agudizarse con la continuidad del sistema, ya que se vería afectado el normal movimiento de los fluidos (Lipiec *et al.*, 1991). La

combinación SD15FB1 se diferencia del resto de las combinaciones bajo SD (CR: 81%), mostrando el efecto del menor tránsito. Por otra parte, los valores de CR observados en LR15FG1 a las profundidades de 5-10 cm y particularmente a los 10-18 cm, fueron significativamente menores ( $p < 0,10$ ) a aquellos obtenidos en el resto de las combinaciones de textura FA bajo SD (SD15FF1, SD15FG1, SD10FG1 y SD15FB1).

### 4.3.3. Estabilidad estructural

La estructura es uno de los principales atributos de calidad del suelo. Ha sido definida de varias maneras, pero en un sentido amplio se puede describir como la organización o disposición espacial de las partículas, agregados y los huecos o poros del suelo. La forma, tamaño y la estabilidad de los agregados pueden ser modificados en gran medida por la implementación de diferentes prácticas agrícolas, con efectos significativos en las relaciones suelo-agua-aire (Kutílek, 2004; Álvarez *et al.*, 2012). A continuación se describen los resultados obtenidos en la distribución por tamaño y el diámetro medio ponderado de los agregados luego del tamizado en seco y en húmedo.

#### Distribución de agregados luego del tamizado en seco y DMPs

El porcentaje que representa cada fracción de agregados luego del tamizado en seco exhibió una distribución similar dentro de cada tratamiento. Los agregados de tamaño entre 8 y 4,8 mm son los que se encontraron en mayor cantidad, seguidos por los del rango 4,8-2,8 mm y 2-1 mm. En todos los casos la menor participación estuvo dada por la fracción de 2,8-2,0 mm.

Comparando el comportamiento de las distintas combinaciones evaluadas entre sí, se observa que SD15FB1, SD15FF1 y SD15FG2 presentaron, en general, un menor porcentaje de agregados de tamaño 4,8 mm a 2,8 mm respecto de LR15FG1, SD10FG1 y SD15FG1, mientras que la proporción correspondiente al rango 8,0 a 4,8 mm se vio incrementada en el primer grupo de combinaciones en comparación con las secuencias que consideran cultivos invernales y estivales. Las diferencias entre combinaciones en los agregados de tamaño menor a 2,8 mm no fueron de gran magnitud (Fig. 16).

En el análisis del diámetro medio ponderado en seco (DMPs, Tabla 15) se detectó interacción significativa ( $p < 0,0001$ ) entre los factores evaluados. En todos los tratamientos de textura FA se observaron menores valores en superficie, zona de mayor disturbio, respecto a 5-10 cm y 10-18 cm. En los suelos de textura más fina (SD15FG2), el DMPs fue similar en todas las profundidades.

Si bien las diferencias asociadas a las distintas combinaciones bajo estudio resultaron estadísticamente significativas las mismas no fueron de gran magnitud, a excepción de la influencia de la textura que se manifestó en los 0-5 cm. En dicha profundidad SD15FG2 mostró el mayor DMPs (4,5 mm) respecto al resto de los tratamientos de textura FA que presentaron valores similares entre si (3,6 mm a 4,1 mm). A mayor profundidad, los CDMPs observados fueron de 4,1 mm a 4,7 mm (5-10 cm) y 4,2 mm a 4,5 mm (10-18 cm).

El promedio ponderado para el epipedón fue: 4,10 mm; 4,16 mm; 4,20 mm; 4,30 mm; 4,38 mm y 4,52 mm para LR15FG1, SD10FG1, SD15FG1, SD15FB1, SD15FF1 y SD15FG2, respectivamente.

#### Distribución de agregados luego del tamizado en húmedo y DMPH

Nuevamente, la fracción de 2,8-2,0 mm resultó minoritaria en todas las combinaciones y a todas las profundidades de estudio. Excepto en SD15FG1 donde la fracción < 0,3 mm fue la más abundante, en el resto de los tratamientos los agregados de tamaño correspondiente a los rangos de 8-4,8 mm y < 0,3 mm resultaron en general los más elevados.

También se observó un comportamiento diferencial al comparar las distintas combinaciones bajo estudio entre si. La proporción de agregados grandes (> 2,8 mm) e intermedios (2,8 mm a 1,0 mm) luego del tamizado en agua alcanzó los valores más bajos en SD15FG1, tratamiento que además, como ya se mencionara se caracterizó por presentar un incremento en los agregados de tamaño < 0,3 mm respecto al resto de las combinaciones en las tres profundidades estudiadas (Fig. 17).

Al realizar el análisis estadístico del diámetro medio ponderado en húmedo (DMPH, Tabla 15) se detectó interacción significativa entre los factores evaluados ( $p < 0,001$ ). En la profundidad de 0-5 cm la combinación SD15FG2, de textura F-Fa, mostró los mayores valores en su medición (2,9 mm) mientras que SD15FF1, SD15FB1 y LR15FG1, con DMPH entre 2,3 mm y 2,6 mm, no se diferenciaron estadísticamente ( $p < 0,10$ ). Los tratamientos que consideran la utilización de cultivos de invierno y verano en SD mostraron los DMPH más bajos cuando la textura fue FA. Las diferencias fueron más acentuadas en los lotes con mayor tiempo de implementación de dicho sistema de labranza (1,70 mm y 0,85 mm, para 10 y 15 años, respectivamente).

Para la profundidad 5-10 cm, nuevamente la combinación de textura más fina presentó el DMPH más alto. El resto de las combinaciones no mostró diferencias

estadísticas significativas a excepción de SD15FG1, donde nuevamente se detectó el valor más bajo (1,6 mm).

En los 10-18 cm, LR15FG1 fue el tratamiento con el DMPH más elevado (3,2 mm) mientras que no se detectaron diferencias significativas entre SD15FG2, SD15FF1 y SD15FB1. En las combinaciones de textura FA que incluyeron cultivos de verano (SD10FG1 y SD15FG1) se observaron los DMPH significativamente más bajos en dicha profundidad ( $p < 0,10$ ).

Los resultados obtenidos al calcular el promedio ponderado del epipedón fueron: 1,06 mm; 2,00 mm; 2,50 mm; 2,52 mm; 2,78 mm y 2,85 mm para SD15FG1, SD10FG1, SD15FF1, SD15FB1, LR15FG1 y SD15FG2, respectivamente.

Los valores observados en el estudio de la estabilidad estructural (EE) se encuentran expresados como el cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP), índice inverso de la EE. En el análisis estadístico realizado para esta variable (Tabla 15) se observó una interacción significativa entre los factores tratamiento y profundidad de muestreo ( $p = 0,0003$ ).

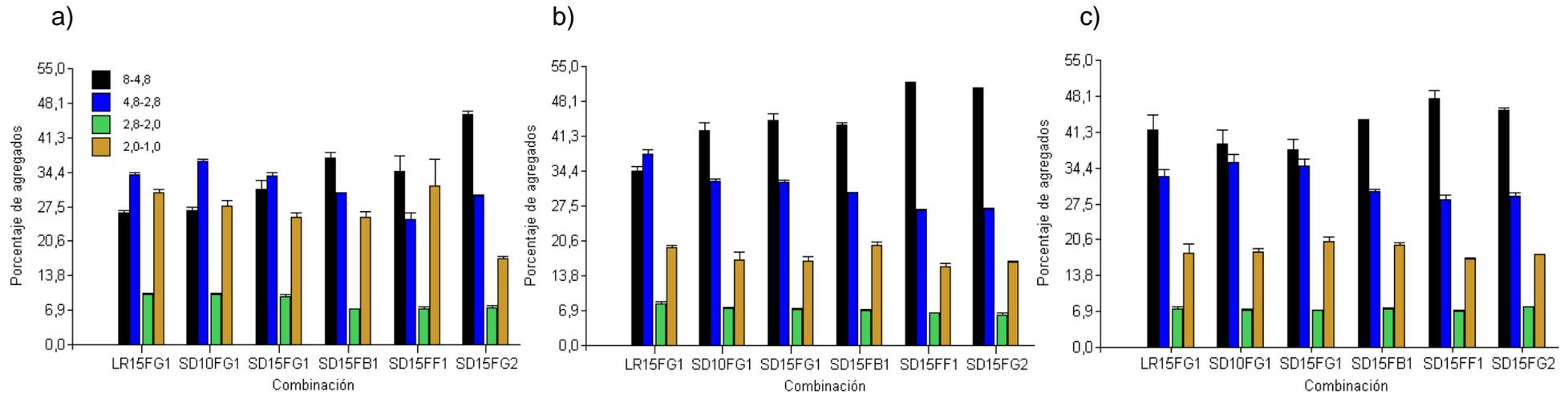


Figura 16. Porcentaje de agregados luego del tamizado en seco para las distintas combinaciones evaluadas, a) 0-5 cm, b) 5-10 cm y c) 10-18 cm.

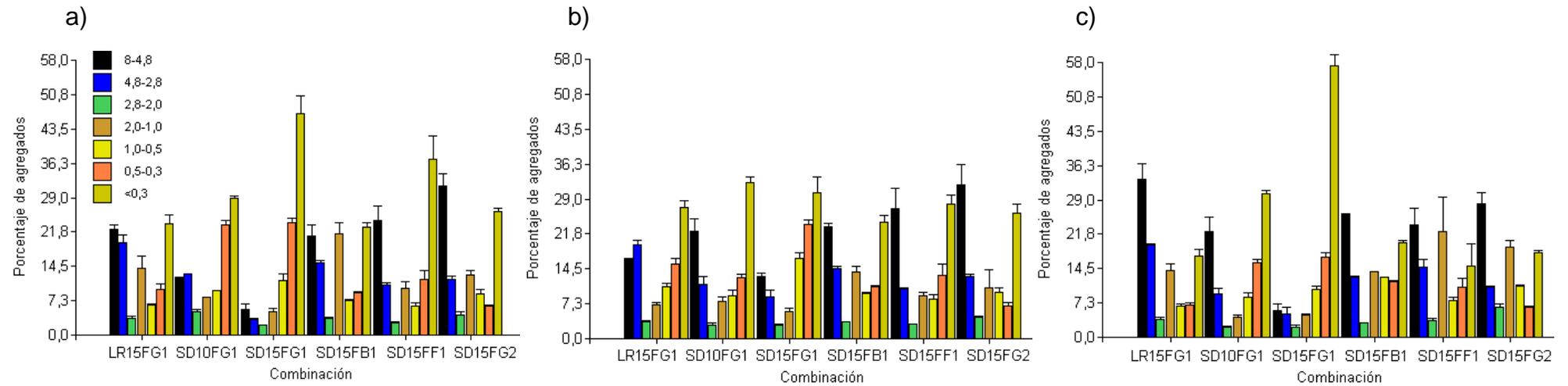


Figura 17. Porcentaje de agregados luego del tamizado en húmedo para las distintas combinaciones evaluadas, a) 0-5 cm, b) 5-10 cm y c) 10-18 cm

**Tabla 15.** Valores medios de diámetro medio ponderado en seco (DMPs, mm), diámetro medio ponderado en húmedo (DMP<sub>h</sub>, mm) y cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP, mm) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
	-----DMPs-----					
0-5	3,6 ± 0,08 <sup>#</sup> D	3,7 ± 0,08 CD	3,9 ± 0,08 C	4,1 ± 0,09 B	3,8 ± 0,09 CD	4,5 ± 0,09 A
5-10	4,1 ± 0,04 C	4,4 ± 0,04 B	4,5 ± 0,04 B	4,4 ± 0,05 BC	4,7 ± 0,05 A	4,6 ± 0,05 A
10-18	4,3 ± 0,07 BC	4,3 ± 0,07 BC	4,2 ± 0,07 C	4,4 ± 0,08 ABC	4,5 ± 0,08 A	4,5 ± 0,08 AB
	-----DMP <sub>h</sub> -----					
0-5	2,6 ± 0,10 B	1,7 ± 0,10 D	0,8 ± 0,10 C	2,4 ± 0,12 B	2,3 ± 0,12 B	2,9 ± 0,12 A
5-10	2,2 ± 0,13 B	2,2 ± 0,13 B	1,6 ± 0,13 C	2,5 ± 0,14 B	2,5 ± 0,14 B	2,9 ± 0,14 A
10-18	3,3 ± 0,18 A	2,1 ± 0,18 C	0,9 ± 0,18 D	2,6 ± 0,20 B	2,6 ± 0,20 B	2,8 ± 0,20 B
	-----CDMP-----					
0-5	1,1 ± 0,06 D	2,0 ± 0,06 B	3,0 ± 0,06 A	1,6 ± 0,06 C	1,5 ± 0,06 C	1,6 ± 0,06 C
5-10	2,0 ± 0,15 BC	2,1 ± 0,15 B	2,9 ± 0,15 A	1,9 ± 0,16 BC	2,2 ± 0,16 B	1,7 ± 0,16 C
10-18	1,1 ± 0,13 D	2,2 ± 0,13 B	3,3 ± 0,13 A	1,8 ± 0,15 C	1,9 ± 0,15 BC	1,7 ± 0,15 C

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media.

La EE resultó ser una propiedad sensible a la implementación de las distintas combinaciones evaluadas. En la superficie del suelo (0-5 cm), el sistema de LR presentó los menores valores en el CDMP respecto al resto de las combinaciones. Por otra parte, la incorporación de cultivos estivales en los lotes de textura FA bajo SD produjo una pérdida importante de la EE, llegando casi a duplicar el CDMP respecto a SD15FB1 y SD15FF1. En los 5-10 cm SD15FG1 se diferencia claramente de los demás tratamientos, presentando el CDMP significativamente más elevado. El resto de las combinaciones presentó similares valores de EE.

A los 10-18 cm se observó el comportamiento descrito para la profundidad 0-5 cm. La combinación bajo LR mostró la EE más alta, seguida de SD15FF1, SD15FB1 y SD15FG2 que no mostraron diferencias estadísticas entre si. Nuevamente, SD15FG1 y SD10FG1 presentaron los mayores valores en el CDMP.

Las diferencias entre tratamientos a las distintas profundidades de muestreo se vieron reflejadas en los promedios ponderados del epipedón, con un marcado deterioro de la estructura en el caso de las secuencias que consideran cultivos estivales en SD. En aquellos lotes con 8-10 años bajo dicho sistema de labranza se observaron elevados valores de CDMP (2,2 mm), los que se incrementaron en un 41% tras 15 años de implementación de dicho sistema de labranza. Bajo LR el promedio ponderado del epipedón fue de 1,3 mm, y en los suelos de textura más fina se observó un valor de 1,7 mm. El promedio para el epipedón también mostró una tendencia de la EE a disminuir a

medida que aumenta el tránsito bajo SD en los suelos de textura FA (SD15FB1: 1,8 mm; SD15FF1: 1,9 mm y SD15FG1: 3,1 mm)

Los resultados obtenidos muestran en todos los casos valores elevados en el CDMP, ratificando la baja EE característica de los suelos de la región pampeana semiárida que los torna susceptibles a la erosión eólica debido a las condiciones climáticas imperantes (Buschiazzo *et al.*, 1999). Este proceso se vería además favorecido por los bajos rendimientos y la arquitectura propia de los cultivos estivales, que no lograrían una adecuada cobertura de rastrojos en la superficie del suelo en una época donde los vientos erosivos son más frecuentes y la evapotranspiración elevada.

El comportamiento descrito para el CDMP fue similar al registrado en el análisis de la Dap, observándose una correlación positiva y significativa entre ambos parámetros ( $r: 0,42$ ,  $p < 0,01$ ,  $N=81$ ). Algunos autores, no reportan diferencias en el CDMP al comparar SD con labranzas convencionales (Ferrerías *et al.*, 2000) o verticales (Díaz-Zorita, 1999), mientras que otros citan mejoras en la EE en lotes bajo SD con respecto a otros sistemas de labranza (Buschiazzo *et al.*, 1998; Sasal *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008). Por el contrario, en este trabajo se encontraron los valores de EE estadísticamente más bajos en SD15FG1 con respecto a LR15FG1. En el primer tratamiento, y luego del tamizado en agua, los agregados más grandes redujeron su proporción en un 80% (8-4,8 mm) y en un 84% (4,8-2,8 mm) respecto al tamizado en seco, pudiéndose interpretar esto como producto de la presencia de fragmentos (clods) más que de agregados (peds). En tanto, bajo LR la reducción fue menor, alcanzando valores del 27% y 43% para las fracciones 8-4,8 mm y 4,8-2,8 mm, respectivamente. Además, la SD se caracterizó por un incremento en los agregados menores (tamaño 0,5-0,3 mm y  $< 0,3$  mm) los que se duplicaron en dicho sistema en comparación con LR, consecuencia de una mayor destrucción de agregados.

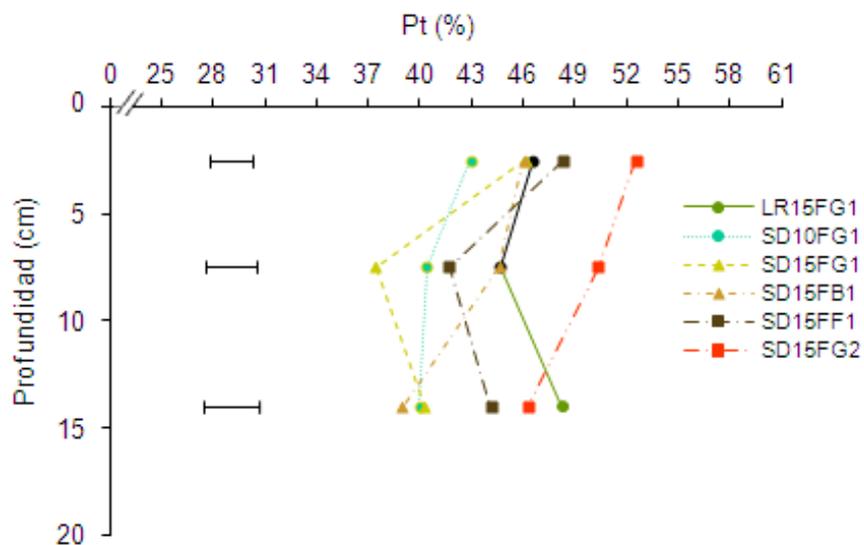
Al analizar el comportamiento de las distintas secuencias de cultivo bajo SD, se observa que en todas las profundidades de estudio, SD15FF1 y SD15FB1 tuvieron un menor CDMP que SD15FG1. El porcentaje de agregados correspondientes a los tamaños 8-4,8 mm y 4,8-2,8 mm luego del tamizado en húmedo disminuyó 1,8 y 1,6 veces más, respectivamente, en los lotes con secuencias FG respecto a FF y FB mientras que la fracción  $< 3$  mm observada en la primera combinación resultó el doble que la obtenida en los cultivos invernales. La EE se encuentra fuertemente influenciada por el contenido de COT del suelo, ya que éste es considerado como el agente más importante para la estabilización de los agregados (Tisdall & Oades, 1982; Steinbach & Álvarez, 2007). De esta manera, es comúnmente informada una relación significativa entre el COT y/o COP con la EE (Eiza *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009). La mayor

cantidad de residuos producidos por el trigo en SD15FF1 y el prolongado barbecho en el caso del tratamiento fina-barbecho-fina sumado a los mayores contenidos de COT (Tabla 3) y COP (Fig. 7) en SD15FF1 y SD15FB1, explicarían las diferencias observadas en la agregación entre dichas combinaciones y SD15FG1.

#### 4.3.4. Porosidad total y Distribución por tamaño del espacio de poros

La caracterización de la red porosa del suelo es importante, ya que el volumen de poros, su distribución por tamaño, conectividad y tortuosidad determinan el ingreso, circulación y retención de agua, la disponibilidad de oxígeno y la resistencia mecánica a la penetración de las raíces, entre otros procesos (Dexter *et al.*, 2008). La importancia del estudio de la porosidad total (Pt) radica en que dicha propiedad tiene una relación directa con la dinámica del agua dentro y fuera del perfil, presentando además un rol decisivo en la productividad y en el movimiento de solutos en el suelo (Mallants *et al.*, 1997).

En la evaluación de este parámetro (Fig. 18) se detectó una interacción significativa entre los tratamientos y la profundidad de muestreo ( $p=0,0004$ ).



**Figura 18.** Evolución de la porosidad total (Pt, %) con la profundidad para las distintas combinaciones evaluadas. Las barras indican el valor de la diferencia mínima significativa ( $p < 0,10$ ).

Los menores valores de Dap observados en el tratamiento de textura más fina (SD15FG2) se correspondieron con una mayor Pt en los 0-5 cm (52,5%) y 5-10 cm (50,3%) con respecto a los lotes de textura FA, los que presentaron una Pt de 43,0% a 48,3% (0-5 cm) y 37,4% a 44,7% (5-10 cm). En la profundidad 10-18 cm, el valor de Pt obtenido en los suelos de textura más fina (46,3%) no se diferenció estadísticamente de LR15FG1 (48,3%), en correspondencia con lo observado para la Dap en dicha profundidad.

En superficie los lotes bajo SD10FG1 presentaron la Pt significativamente más baja (43,0%), mientras que el resto de los tratamientos de textura FA tuvieron mayor Pt sin diferencias significativas entre ellos (SD15FB1: 46,0%; SD15FG1: 46,1%; LR15FG1: 46,6% y SD15FF1: 48,3%).

En la profundidad de 5-10 cm los tratamientos que presentaron valores más bajos de Dap (LR15FG1 y SD15FB1) tuvieron asociada una Pt más elevada (45,0%). El valor obtenido en SD15FG1 resulta particularmente bajo (37,4%), en concordancia con la mayor Dap y los reducidos contenidos de COT observados. SD15FF1 y SD10FG1 tuvieron un comportamiento intermedio, con una Pt del 41,7% y 40,4% respectivamente.

Considerando el espesor 10-18 cm, LR15FG1 presentó una Pt significativamente mayor (48,3%) que el resto de los tratamientos bajo SD con textura FA (SD15FF1: 44,1%; SD15FG1: 40,3%; SD10FG1: 40,0% y SD15FB1: 39,0%) lo que respondería a la presencia de plowpanes generados antes de la implementación de la SD, situación ya comentada.

Para el promedio ponderado del epipedón, el porcentaje de poros fue de 40,9; 41,1; 42,5; 44,6; 46,8 y 49,1 para SD10FG1, SD15FG1, SD15FB1, SD15FF1, LR15FG1 y SD15FG2, respectivamente.

La Pt se halla conformada por poros de diferente tamaño, cuya proporción refleja el impacto de los distintos sistemas de labranza. Los macroporos (MP, mayores de 9  $\mu\text{m}$ ) son los que permiten el flujo primario de agua durante la infiltración y el drenaje siendo los que poseen un mayor control sobre la aireación del suelo. Por otra parte, los poros de diámetro entre 9 y 0,2  $\mu\text{m}$  (mesoporos, mP), son particularmente importantes para el almacenamiento de agua y la actividad microbiana, mientras que los microporos ( $\mu\text{P}$ , < 0,2  $\mu\text{m}$ ) se caracterizan por retener el agua en forma no disponible para las plantas.

En el análisis estadístico de los valores obtenidos para los tres tamaños de poros determinados (Fig. 19), se detectó interacción significativa entre tratamientos y profundidad de muestreo ( $p < 0,0001$ ,  $p = 0,002$  y  $p = 0,01$  para los MP, mP y  $\mu\text{P}$ , respectivamente).

Al realizar el estudio de los MP en la superficie del suelo, zona de mayor disturbio, se observaron valores entre 19% y 25%, presentando LR15FG1 una porosidad  $> 9 \mu\text{m}$  más elevada (25%) que SD15FG2 (21%) y SD10FG1-SD15FB1 (ambas con 19%). Los suelos de los tratamientos SD15FG1 (23%) y SD15FF1 (23%) presentaron una MP sin diferencias con LR15FG1 y SD15FG2.

En la profundidad 5-10 cm, las combinaciones LR15FG1, SD15FB1 y SD15FG2 en las que se detectaron los menores valores de Dap y una mayor Pt, también presentaron el porcentaje de MP más elevado (23%, 21% y 19%, respectivamente). El resto de los tratamientos mostraron valores de MP más bajos y sin diferencias estadísticas entre sí (SD15FF1 y SD10FG1: 16% y SD15FG1: 15%). Los resultados obtenidos muestran una disminución significativa de los MP en los suelos FA bajo SD respecto a LR. Al igual que en el caso de la Dap y la Pt, la excepción a dicho comportamiento la constituye SD15FB1, asociado al menor tránsito.

En la profundidad 10-18 cm, la LR tuvo un contenido de MP significativamente más elevado (27%) que los tratamientos bajo SD de textura FA (12% a 17%), lo que ratifica la persistencia del fenómeno de compactación subsuperficial en estos últimos. La combinación de textura más fina también presentó bajos valores de MP (16%).

Los valores de MP obtenidos para el promedio ponderado del epipedón fueron del 16% para SD10FG1 y SD15FB1, y 18% en SD15FG2, SD15FF1 y SD15FG1. Para LR15FG1 el porcentaje de poros  $> 9 \mu\text{m}$  fue del 25%.

Si se considera que el valor crítico para los poros no capilares se aproxima a 15% (Vomocil & Flocker, 1961), los resultados obtenidos tras 8-10 y 15 años de SD continua en la región, indican que el colapso de MP como consecuencia de la compactación generada por el tráfico es importante, y de continuar la tendencia observada la tasa de difusión de gases, particularmente en condiciones de suelo mojado, podría verse afectada en el corto plazo.

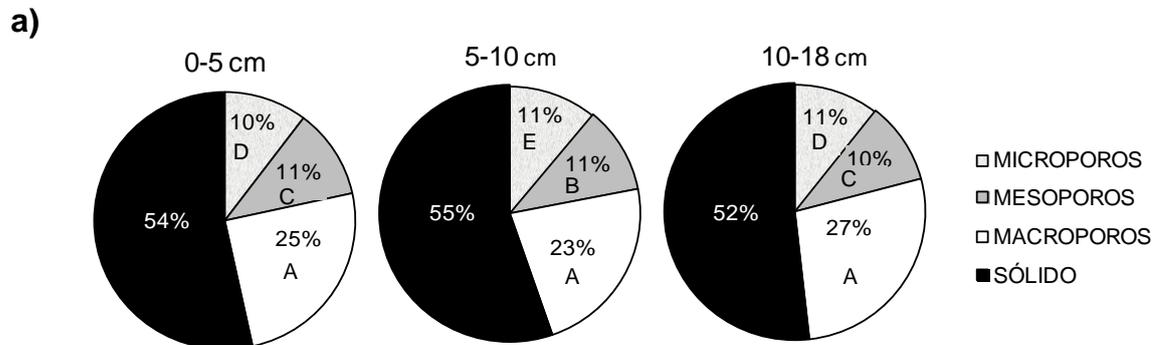
En cuanto al comportamiento de la mesoporosidad, se observa que SD15FG2 presentó los mayores valores en todas las profundidades evaluadas (14%) en comparación con el resto de las combinaciones de textura FA. Considerando estos últimos, en la profundidad de 0-5 cm el mayor porcentaje de poros de almacenamiento, sin diferencias entre ellos, lo poseen SD15FG1, SD15FB1 y SD15FF1 mientras que los menores valores de mP se observan en LR15FG1 y SD10FG1, los que a su vez no se diferenciaron de SD15FB1 y SD15FF1. Si bien las diferencias fueron estadísticamente significativas, los porcentajes de mesoporos no difirieron marcadamente, ya que en todos los casos estuvieron entre el 11% y 13%.

En 5-10 cm, todos los lotes presentaron entre 10% y 11% de poros de diámetro entre 9 y 0,2  $\mu\text{m}$ .

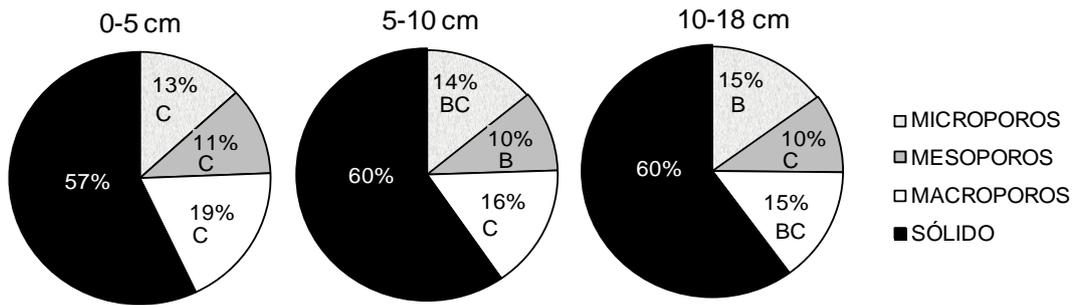
En 10-18 cm se repite lo observado en 0-5 cm, donde si bien los tratamientos SD15FG1, SD15FB1 y SD15FF1 presentan un mayor porcentaje de mP respecto a LR15FG1 y SD10FG1, las diferencias son de escasa magnitud.

También los promedios ponderados resultaron similares ya que se obtuvieron contenidos de mP del 11%-12% para todos los tratamientos bajo LR y SD de textura FA y del 14% para SD15FG2, de textura más fina.

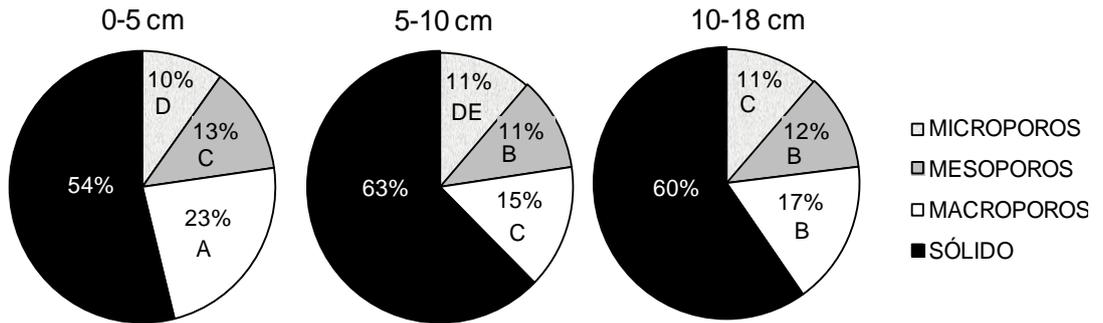
El porcentaje de poros  $< 0,2 \mu\text{m}$  fue en todos los casos significativamente mayor en SD15FG2, asociado a los mayores contenidos de arcilla y MO. Dentro de los tratamientos de textura FA, y en todas las profundidades evaluadas, se observan los porcentajes de  $\mu\text{P}$  más elevados (y similares entre sí) en SD15FB1, SD15FF1 y SD10FG1 y los menores en SD15FG1 y LR15FG1. El volumen ocupado por los  $\mu\text{P}$  en el horizonte superficial de los suelos estaría regulado por pequeñas diferencias en los contenidos de arcilla (19% en SD15FB1, SD15FF1 y SD10FG1 vs 16% a 17% en SD15FG1 y LR15FG1), a pesar de la similitud textural existente entre los tratamientos. Se detectó una asociación lineal entre ambos parámetros ( $r: 0,60$ ,  $p < 0,01$ ,  $N: 81$ ), y el contraste a posteriori realizado entre ambos grupos de combinaciones también presentó diferencias significativas ( $p < 0,001$ ).



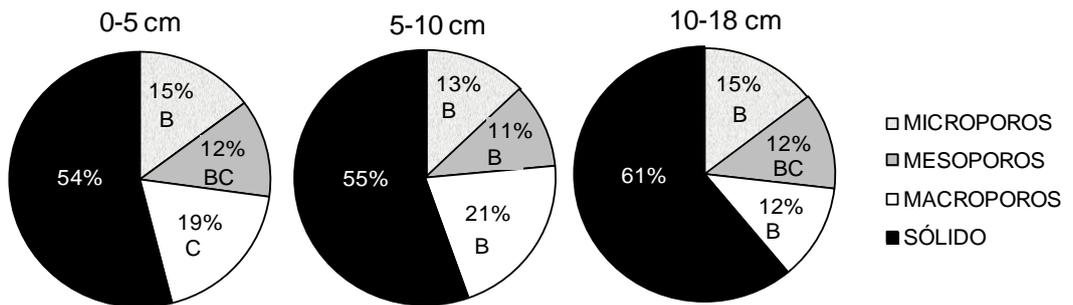
b)



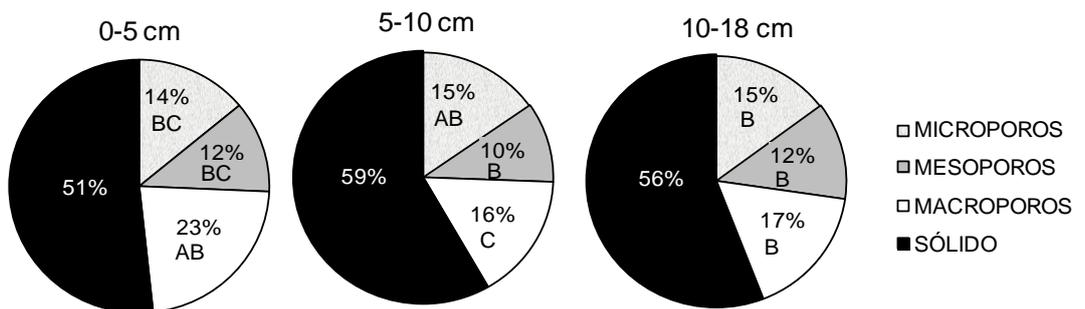
c)

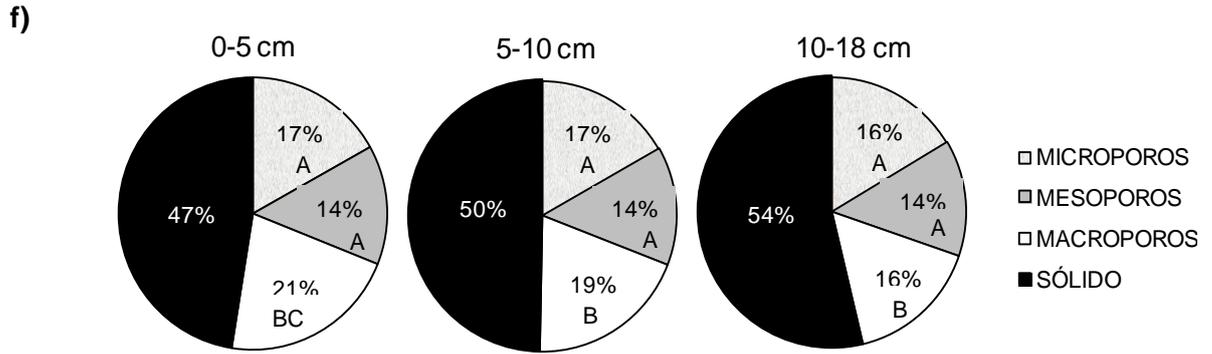


d)



e)





**Figura 19.** Distribución por tamaño de poros en las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm para a) LR15FG1, b) SD10FG1, c) SD15FG1, d) SD15FB1, e) SD15FF1 y f) SD15FG2.

Como síntesis del análisis de la Pt y la distribución por tamaño de los poros del suelo en las combinaciones estudiadas, se observa que los horizontes de textura más fina (F a Fa) presentaron los mayores valores de Pt, mP y uP con respecto a aquellos de textura más gruesa en las tres profundidades evaluadas. Esto no se apreció en el caso de los MP. En la superficie del suelo, zona de mayor desarrollo radicular, no se detectaron diferencias en la Pt entre las combinaciones de textura FA (46% - 48%) a excepción de SD10FG1 que presentó los valores más bajos en la medición de dicha variable (43%). Tampoco se observó un cambio importante en la distribución por tamaño del espacio de poros del suelo asociado a la aplicación de las distintas combinaciones, si bien la macroporosidad fue levemente mayor en LR15FG1, SD15FG1 y SD15FF1 respecto al resto de las combinaciones, posiblemente asociado a la mayor actividad radicular.

En cambio, en la profundidad de 5-10 cm el aumento de la Dap ya descrito en SD continua (SD15FG1, SD10FG1 y SD15FF1) estuvo acompañado por una marcada disminución en la Pt ( $r: -0,58, p < 0,05, n: 42$ ) y en los MP ( $r: -0,59, p < 0,05, n: 42$ ). La disminución de la macroporosidad en los lotes con SD continua se debería a la destrucción de los poros de mayor tamaño asociado al tránsito de las maquinarias, sin regeneración de los mismos (Sasal *et al.*, 2006). Whalley *et al.* (1995); Rasmussen & Arshad (1999) y Amiotti *et al.* (2012) también señalan que los cambios causados por la compactación en los suelos están caracterizados por una disminución en los poros de tamaño  $> 9 \mu\text{m}$ . El análisis de la microporosidad muestra una tendencia a incrementarse en los tratamientos bajo SD resultados que concuerdan con los reportados por Kiessling *et al.* (2007), si bien estos autores lo asocian al pisoteo animal en secuencias agrícola-ganaderas. Las diferencias obtenidas para las combinaciones evaluadas no siempre resultaron estadísticamente significativas. El menor tránsito en la combinación SD15FB1

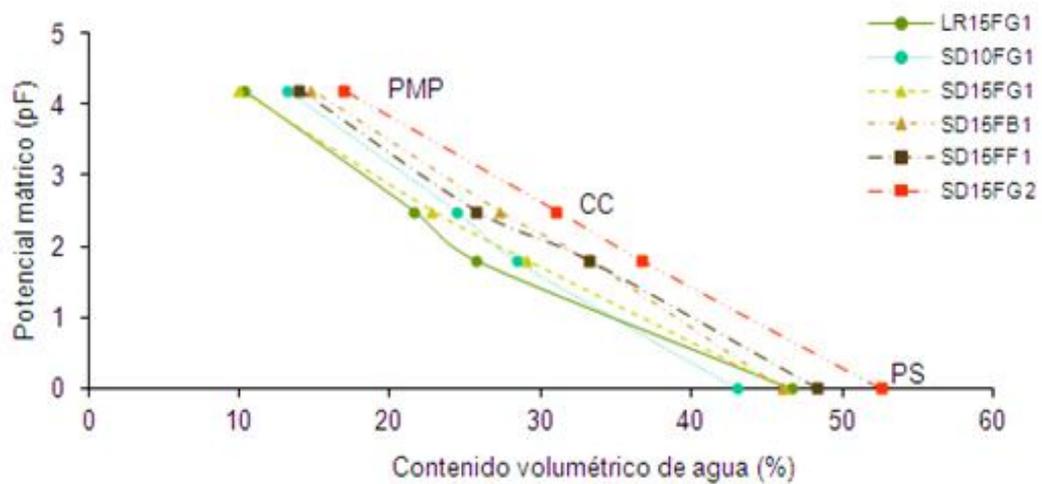
se vio reflejado en los valores de Dap y Pt que resultaron similares a los observados en LR15FG1 y mayores a los obtenidos en SD15FF1, SD10FG1 y SD15FG1.

En la profundidad 10-18 cm, la disminución de la Pt bajo SD está asociada principalmente a una pronunciada pérdida de MP observándose además un aumento en los mP y uP consecuencia de la permanencia de densificaciones en la región.

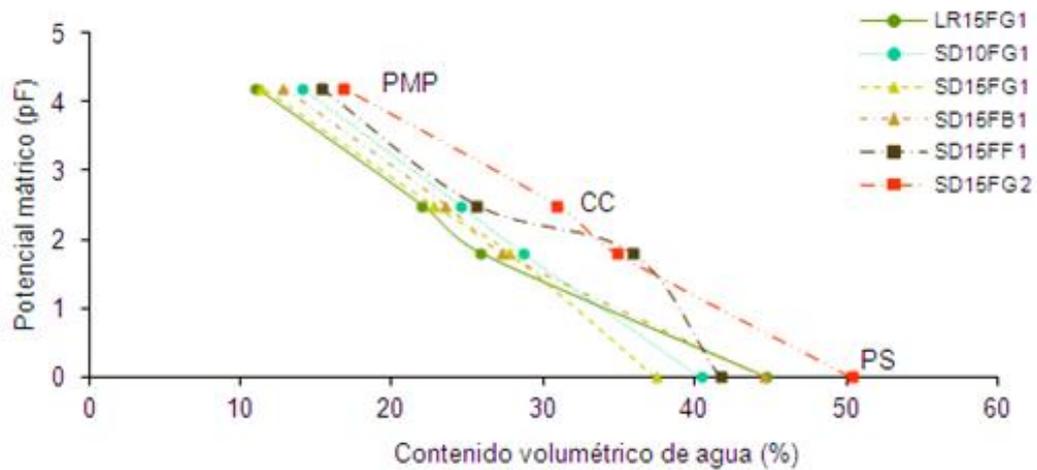
#### 4.3.5. Curvas de retención hídrica y Contenidos de agua útil

Las curvas de retención de humedad, constituyen la relación entre el potencial mátrico y el contenido hídrico del suelo. A medida que la cantidad de agua del mismo decrece desde saturación, la energía potencial del agua remanente disminuye, debido a la creciente tenacidad con la cual es retenida por fuerzas capilares y de adsorción. Las curvas correspondientes a los sistemas de labranza evaluados se muestran en la Fig. 20.

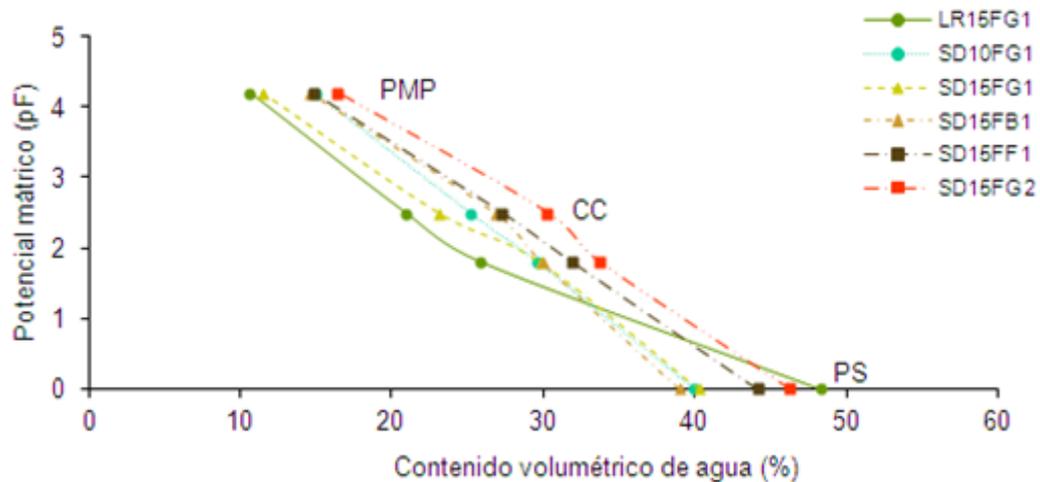
a)



b)



c)



**Figura 20.** Curvas hídricas para las profundidades de **a)** 0-5 cm, **b)** 5-10 cm y **c)** 10-18 cm para las distintas combinaciones evaluadas. CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, PS: punto de saturación.

El contraste de los resultados obtenidos para los contenidos volumétricos de agua a las distintas tensiones aplicadas en todos los tratamientos, refleja que las retenciones hídricas más altas en todas las profundidades evaluadas correspondieron a SD15FG2 debido, al menos en parte, a las fuerzas de succión más elevadas que presentan los suelos con mayores contenidos de arcilla y MO.

Considerando los tratamientos de textura FA se observa que en el PS y en la superficie del suelo, la menor retención de agua la presenta SD10FG1 asociada a su menor  $P_t$ , mientras que el resto de los tratamientos tuvieron una mayor retención, sin diferencias significativas entre ellos. En 5-10 cm los tratamientos LR15FG1 y SD15FB1 tuvieron los mayores contenidos de agua, mientras que el valor más bajo en la medición

de esta variable en el PS se observó en SD15FG1. Considerando el espesor 10-18 cm, LR15FG1 presentó contenidos hídricos significativamente más elevados que el resto de los tratamientos que consideran el sistema de SD.

En los potenciales mátricos aplicados correspondientes a -8,6 kPa (ó pF 1,8) y CC (-33 kPa ó pF 2,5), los menores contenidos hídricos se observaron en el sistema de LR en todas las profundidades consideradas. En lo que respecta a los tratamientos bajo SD y textura superficial FA se observa que, en general, los lotes con secuencias de cultivos de invierno (FF y FB) mostraron una mayor retención de agua que aquellos que presentan la rotación FG (SD10FG1 y SD15FG1).

En la succión correspondiente al PMP (-1500 kPa ó pF 4,2), los lotes bajo LR15FG1 y SD15FG1 fueron los que mostraron una menor retención de agua en todas las profundidades estudiadas asociada principalmente a sus contenidos de arcilla levemente inferiores al resto de los tratamientos bajo SD (SD15FF1, SD10FG1 y SD15FG1) los que tuvieron mayores contenidos de agua y sin diferencias marcadas entre ellos.

Los resultados estadísticos obtenidos en el análisis de los contenidos de agua útil (AU) muestran una interacción significativa ( $p=0,0019$ ) entre los tratamientos y la profundidad de muestreo (Tabla 16).

**Tabla 16.** Contenidos medios de agua útil (%) para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FGF1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	11,3 <sup>#</sup> ± 0,6 C	11,2 ± 0,6 C	12,8 ± 0,6 AB	12,4 ± 0,7 BC	11,7 ± 0,7 BC	14,2 ± 0,7 A
5-10	10,9 ± 0,3 B	10,4 ± 0,3 B	11,3 ± 0,3 B	10,7 ± 0,4 B	10,3 ± 0,4 B	14,1 ± 0,4 A
10-18	10,3 ± 0,4 C	10,2 ± 0,4 C	11,6 ± 0,4 B	12,2 ± 0,4 B	12,5 ± 0,4 B	13,9 ± 0,4 A

Prof.: Profundidad de muestreo. Para cada profundidad, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p<0,10$ ). #: Error estándar de la media.

En las tres profundidades evaluadas, SD15FG2 presentó los mayores contenidos de AU (14%). Considerando los tratamientos de textura FA, las diferencias encontradas entre combinaciones en la capacidad de almacenamiento de humedad son mínimas, ya que todos los lotes presentaron contenidos de AU entre 11%-13% (0-5 cm), 10%-11% (5-10 cm), 10%-12% (10-18 cm) y 11%-12% para el promedio ponderado del epipedón.

Contrastando el efecto de los sistemas de labranza evaluados, en este trabajo se detectaron diferencias en la capacidad de almacenamiento de humedad a favor de los suelos bajo SD15FG1 respecto a LR15FG1, aunque el incremento fue de escasa magnitud en todas las profundidades evaluadas (entre 0,3% y 1,5% de AU).

Tampoco la secuencia de cultivos tuvo una influencia significativa en dicho parámetro, ya que el contenido de AU fue similar en SD15FF1, SD15FB1 y SD15FG1.

#### **4.3.6. Resistencia a la penetración**

La RP es un parámetro que presenta una buena correlación con el desarrollo de las raíces de las plantas, además de ser un método rápido y preciso para determinar la compactación. El modo más común de medirla es a través del uso de penetrómetros, los cuáles caracterizan la fuerza necesaria para insertar un cono de superficie conocida en el interior del suelo. Dado que está ampliamente documentado que el contenido de agua influye directamente sobre los valores que alcanza la RP (Lapen *et al.*, 2004; Fabrizzi *et al.*, 2005), en este estudio se determinaron los valores de humedad gravimétrica de los suelos al momento del muestreo, los que se utilizaron como covariada en el análisis estadístico de la RP.

No se detectó interacción significativa entre los factores tratamiento y profundidad de muestreo en el análisis de la RP ( $p=0,24$ ), ni efectos de la humedad gravimétrica ( $p=0,80$ ). Todos los tratamientos se comportaron de igual manera a las distintas profundidades (Tabla 17), presentando la profundidad de 0-5 cm una menor impedancia mecánica con respecto a 5-10 cm y 10-18 cm, que no se diferenciaron entre sí ( $p<0,0001$ ).

Los suelos presentaban en el momento de las mediciones agua retenida a potenciales mátricos superiores a CC y cercanos al potencial de  $-8,6$  kPa. Por ende los resultados obtenidos muestran el comportamiento de las capas más superficiales del suelo en estado húmedo, cuando todos los poros capilares y aquellos asociados al drenaje lento contenían agua (Tabla 17). En estas condiciones se registraron incrementos significativos de la RP en el epipedón de todos los suelos bajo SD respecto de LR, los que oscilaron entre el 52% y el 133%.

**Tabla 17.** Valores de resistencia a la penetración (RP, MPa) en el epipedón (0-18 cm) de los suelos para las distintas combinaciones evaluadas.

Prof. (cm)	Combinación					
	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2
0-5	0,18	0,35	0,30	0,54	0,50	0,37
5-10	0,34	0,68	0,42	0,71	0,73	0,62
10-18	0,30	0,64	0,50	0,65	0,53	0,65
0-18	0,27± 0,05 <sup>#</sup> C	0,56± 0,05 A	0,41± 0,05 B	0,63± 0,06 A	0,58± 0,06 A	0,55± 0,06 AB
HV (%)	25,8	29,6	28,8	28,7	26,7	30,8

Prof.: Profundidad de muestreo. Para la profundidad 0-18 cm, valores medios seguidos de letras distintas indican diferencias significativas entre combinaciones ( $p < 0,10$ ). <sup>#</sup>: Error estándar de la media. HV: Contenidos de humedad volumétrica del epipedón (0-18 cm).

Las mayores impedancias mecánicas en el epipedón (0-18 cm) se observaron en SD15FB1 (0,63 MPa), SD15FF1 (0,58 MPa), SD10FG1 (0,56 MPa) y SD15FG2 (0,55 MPa), las que no presentaron diferencias significativas entre si. La combinación SD15FG1 (0,41 MPa) no se diferenció estadísticamente de SD15FG2 y por último, el valor más bajo en la RP fue observado en los lotes bajo LR15FG1 (0,27 MPa). Al realizar el contraste entre sistemas de labranza (LR15FG1 y SD15FG1), se observa un incremento del 52% en la RP del último tratamiento, lo que resulta coherente con las observaciones cualitativas de las condiciones estructurales de los suelos descriptas a campo.

Fabrizzi *et al.* (2005), entre otros, citan que los mayores valores de resistencia mecánica en sistemas bajo SD continua se corresponden con los incrementos en la Dap en los mismos, dado que a medida que la Dap aumenta, las partículas del suelo se disponen de forma más apretada, incrementando así las fuerzas de fricción (Imhoff *et al.*, 2004). En este trabajo, sólo se observó una tendencia similar a la descrita, posiblemente asociada al acotado rango de humedad de los suelos observado al momento de los muestreos. Otra posible explicación sería que los incrementos determinados para la RP sean resultado de un endurecimiento (“hardening”) del horizonte superficial del suelo y no de un aumento en la Dap. Este proceso, atribuido a una reorganización de las arcillas seguida por endurecimiento (Utomo & Dexter, 1981), ha sido descrito en sistemas bajo SD en la región pampeana húmeda (Taboada *et al.*, 1998; Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2009). Por el contrario, bajo LR se detectó una correlación significativa entre Dap y RP ( $r: 0,53, p < 0,05, n: 15$ ). Dado los elevados contenidos de agua en el suelo en el momento de las determinaciones no es dable esperar valores de RP que resulten limitantes para el desarrollo radicular.

Sin embargo, mediciones efectuadas en suelos de textura FA con secuencias de cultivos invernales y estivales, y contenidos hídricos cercanos (LR15FG1: 14,2; SD10FG1: 16,2) o por debajo del PMP (SD15FG1: 7,7), mostraron muy altos valores de RP. En superficie, las combinaciones SD15FG1 (6,0 MPa) y SD10FG1 (5,8 MPa) presentaron un índice de cono que duplicó al observado en LR15FG1 (3,0 MPa), mientras que para la profundidad de 5-10 cm los valores detectados fueron 1,3 a 1,8 veces superiores en SD10FG1 (5,6 MPa) y SD15FG1 (7,8 MPa) respecto a LR (4,3 MPa). A mayor profundidad las diferencias entre tratamientos resultaron más marcadas, alcanzando una RP de 9,3 MPa en SD10FG1 y 8,0 MPa en SD15FG1, en comparación con los 3,6 MPa registrados bajo LR. En todos los casos la impedancia mecánica fue muy superior a 1,5 MPa, valor que Jorajuria *et al.* (1997) y Pilatti & de Orellana (2000) señalan como crítico para la elongación de raíces y el normal abastecimiento de agua y nutrientes e incluso superan ampliamente a los umbrales más altos (2,5 MPa) estimados por Hakansson & Lipiec (2000) y Hamza & Anderson (2005). Los resultados obtenidos ratifican la baja resistencia del sistema a la compactación generada por el tránsito típica de los suelos de la región semiárida (Amiotti, 1996; Amiotti *et al.*, 2012).

#### **4.4. Análisis multivariado**

##### **4.4.1. Análisis de componentes principales**

Para realizar el ACP se consideró la matriz de correlación con las variables físicas y químicas estandarizadas. Sobre la base de los resultados obtenidos en los análisis univariados, el número de muestras total y la bibliografía consultada (Quiroga, 1994; Wander & Bollero, 1999; Aparicio & Costa, 2007; Campitelli *et al.*, 2008) se seleccionaron 7 variables para el ACP. Debido a que las componentes redistribuyen la varianza total haciendo que las primeras acumulen la máxima posible, se contemplaron las CP con autovalores  $> 1$  (Quiroga, 1994). De esta manera se logró reconstruir un 74% de la varianza total de los datos con dos CP (Tabla 18), obteniéndose un coeficiente de correlación cofenética de 0,94. Este último valor se puede utilizar como una medida de la calidad de la reducción lograda, ya que calcula la correlación entre las distancias euclídeas en el espacio reducido y las mismas distancias en el espacio original de dimensión dada por el número de variables originales.

**Tabla 18.** Autovalores del análisis de componentes principales.

Lambda	Valor	Proporción	Prop. Acumulada
1	3,90	0,56	0,56
2	1,27	0,18	0,74
3	0,72	0,10	0,84
4	0,48	0,07	0,91
5	0,39	0,06	0,96
6	0,14	0,02	0,98
7	0,11	0,02	1,00

En el plano de las dos primeras componentes principales las 7 variables aparecen con un porcentaje de reconstrucción mayor al 50% (Tabla 19) por lo que se logró la representación gráfica de todas las propiedades medidas en un mismo plano (Fig. 21). El grupo de variables ubicadas en los cuadrantes I y IV (IE, COT, COP y NP) presentó correlaciones negativas con un segundo grupo de variables en el cuadrante II y III (Dap, CR y CDMP), resultados que coinciden con los informados por otros autores (Shukla *et al.*, 2006; Aparicio & Costa, 2007) (Tabla 20). La presencia de MO tiene un efecto protector frente a la compactación (Aparicio & Costa, 2007). Todas las variables contribuyeron para la formación de la CP1, mientras que para la definición de la CP2 tuvieron mayor importancia las propiedades NP, COP y la Dap.

**Tabla 19.** Correlación entre las variables y las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2).

Variables	CP1	CP2	% de reconstrucción*
COT (g kg <sup>-1</sup> )	0,82	- 0,22	72,1
COP (Mg ha <sup>-1</sup> )	0,74	0,54	83,9
NP (Mg ha <sup>-1</sup> )	0,78	0,54	90,0
Dap (Mg m <sup>-3</sup> )	- 0,77	0,54	88,4
CR (%)	- 0,73	0,52	80,3
CDMP (mm)	- 0,64	0,06	56,5
MO/a+L	0,73	0,28	61,1

\* % de reconstrucción en el plano de las componentes principales 1-2 = [(correlación variable - CP1)<sup>2</sup> + (correlación variable - CP2)<sup>2</sup>]\*100. COT: carbono orgánico total (g kg<sup>-1</sup>); COP: carbono orgánico particulado (Mg ha<sup>-1</sup>); NP: nitrógeno particulado (Mg ha<sup>-1</sup>); CR: compactación relativa (%); Dap: densidad aparente (Mg m<sup>-3</sup>); CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado (mm); MO/a+L: índice estructural.

De acuerdo al biplot obtenido (Fig. 21) se observa que las muestras correspondientes a las combinaciones SD10FG1 y SD15FG1 se agrupan principalmente en los cuadrantes II y III, mostrando una pérdida de EE y un aumento en la compactación. Estos tratamientos muestran, además, contenidos de COT, COP y NP menores que el promedio de los datos así como valores de IE más bajos.

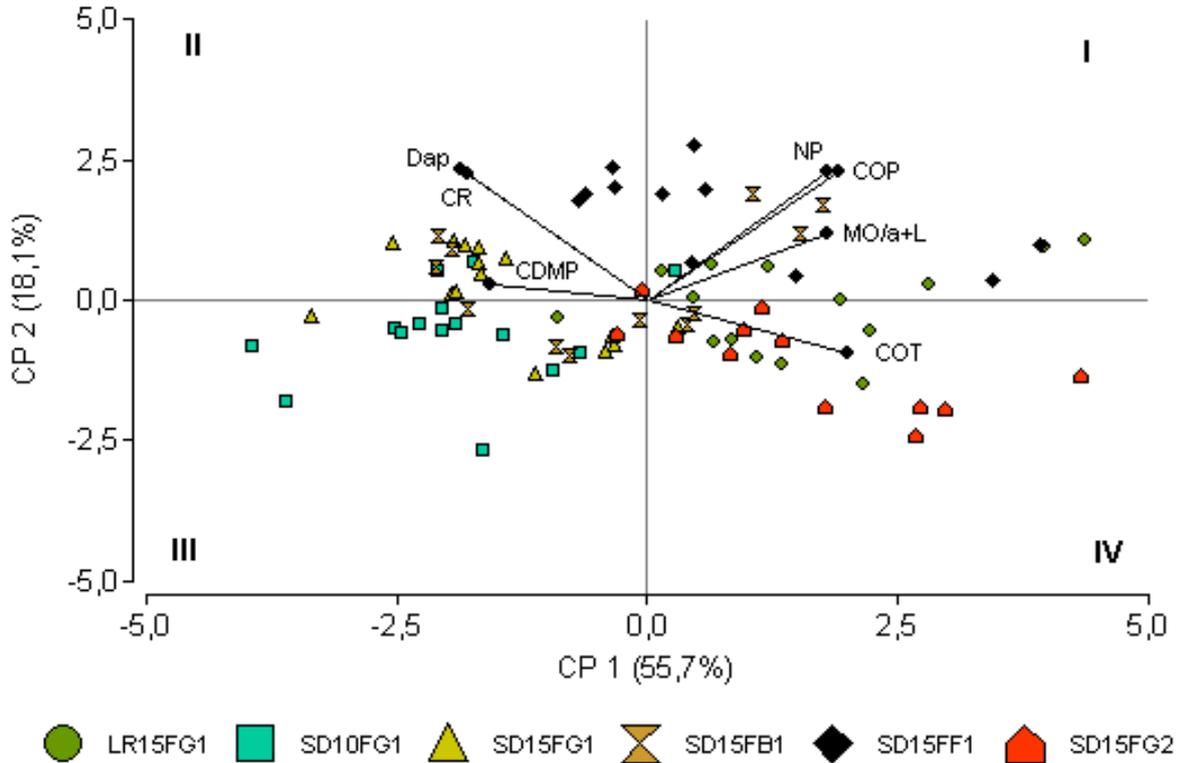
En los cuadrantes I y IV se ubican los tratamientos LR15FG1 y SD15FG2, los que poseen mayores contenidos de COT, COP y NP, acompañados de propiedades físicas más favorables.

La combinación SD15FF1 muestra un comportamiento tendiente a la LR y se distribuye principalmente en el cuadrante I, hacia donde aumentan los contenidos de las fracciones particuladas del carbono y el nitrógeno. También aparecen algunos puntos en el cuadrante II, correspondientes a las profundidades 5-10 cm y 10-18 cm de dos lotes donde la Dap es elevada. Por último, las muestras provenientes del tratamiento SD15FB1 no mostraron una distribución definida. Algunos puntos se encuentran cerca del centro de coordenadas donde se ubican los valores promedio de todos los datos. Otros correspondientes a la profundidad 0-5 cm, presentan elevados contenidos de COP, NP e índice estructural y otros cuatro muestreados en los 10-18 cm muestran elevadas Dap y CR. En concordancia con los resultados obtenidos en el ANOVA, el ACP realizado permitió observar un cierto agrupamiento de los datos, diferenciando los distintos sistemas de labranza (LR15FG1 vs SD15FG1) y la influencia de la textura del horizonte superficial (SD15FG1 vs SD15FG2), además del efecto de las secuencias de cultivo (SD15FF1 vs SD15FG1).

**Tabla 20.** Matriz de correlación de las variables consideradas en el análisis de componentes principales.

	COT	COP	NP	CR	Dap	CDMP	MO/a+L
COT	1,00						
COP	0,46	1,00					
NP	0,47	0,84	1,00				
CR	- 0,57	- 0,28	- 0,33	1,00			
Dap	- 0,73	- 0,36	- 0,32	0,80	1,00		
CDMP	- 0,43	- 0,35	- 0,49	0,43	0,42	1,00	
MO/a+L	0,58	0,54	0,62	- 0,42	- 0,35	- 0,29	1,00

Todas las correlaciones resultaron altamente significativas ( $p < 0,01$ , N: 81). COT: carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ); COP: carbono orgánico particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); NP: nitrógeno particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); CR: compactación relativa (%); Dap: densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ); CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado (mm); MO/a+L: índice estructural.



**Figura 21.** Biplot en el plano de las dos primeras componentes principales. COT: carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ); COP: carbono orgánico particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); NP: nitrógeno particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); CR: compactación relativa (%); Dap: densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ); CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado (mm); MO/a+L: índice estructural.

#### 4.4.2. Análisis discriminante

En el estudio de las componentes principales se observó una cierta tendencia al agrupamiento de las distintas combinaciones consideradas. Por esta razón, y con el fin de determinar aquellas variables que segreguen de manera óptima los 6 tratamientos considerados, se realizó un análisis discriminante canónico (AD). De las 7 variables utilizadas en el ACP, se observaron correlaciones altamente significativas entre COP y NP ( $r=0,84$ ,  $p<0,01$ ) y entre Dap y CR ( $r=0,80$ ,  $p<0,01$ ), por lo que finalmente se seleccionaron 5 propiedades que separaron adecuadamente los tratamientos: COT, COP, CR, CDMP y relación MO/a+L.

La Fig. 23 muestra todas las observaciones realizadas en el epipedón de los suelos (0-5 cm, 5-10 cm y 10-18 cm) correspondientes a las 6 combinaciones evaluadas ( $N=81$ ) en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2, los que conjuntamente explican un 94% de la variación total entre tratamientos (Tabla 21).

**Tabla 21.** Autovalores del análisis discriminante.

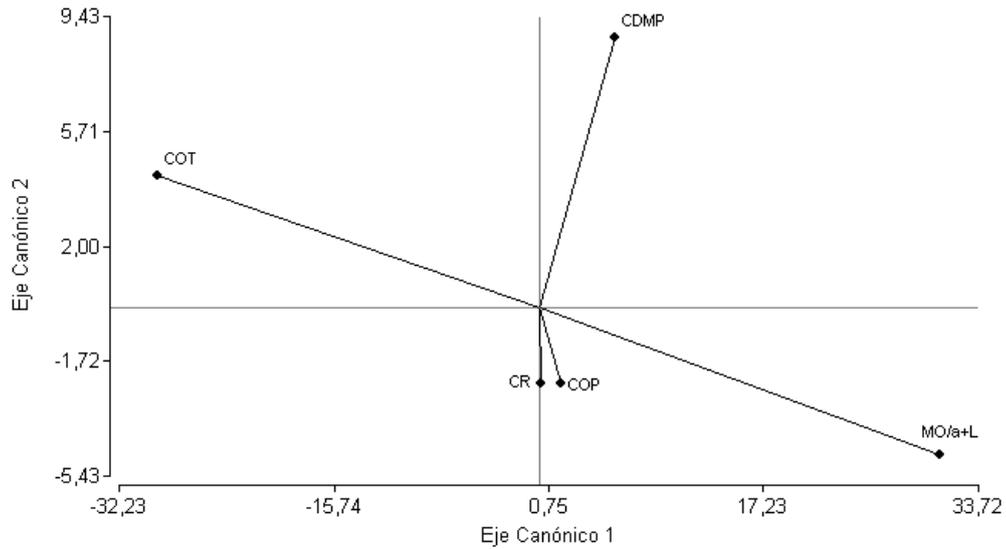
Lambda	Valor	Proporción	Prop. Acumulada
1	17,76	81,48	81,48
2	2,68	12,28	93,76
3	1,01	4,63	98,39
4	0,33	1,53	99,92
5	0,02	0,08	100,00

Una forma útil de obtener una medida de la importancia de una variable respuesta sobre un eje canónico es a través de la estandarización de los coeficientes de la combinación lineal correspondiente (Tabla 22). Estos coeficientes son útiles para juzgar la contribución de cada variable original en la explicación de la variabilidad entre grupos. De esta manera, puede verse que MO/a+L y COT son las variables más importantes para la discriminación sobre el eje 1 (Fig. 22), el cuál posee autovalor más elevado y explica el mayor porcentaje de la varianza (81%). La magnitud de los autovalores obtenidos en el AD es una medida de la importancia que posee cada uno de los ejes canónicos (O'Donovan *et al.*, 1997). Observaciones con valores altos para la relación MO/a+L aparecerán situadas a la derecha del gráfico de dispersión de observaciones en el espacio discriminante (espacio formado por los ejes canónicos) ya que el coeficiente es positivo (3,20), mientras que observaciones con altos contenidos de COT (coeficiente negativo: -3,05) se situarán a la izquierda del gráfico. Para la discriminación sobre el eje canónico 2, la variable más importante fue el CDMP, con coeficiente positivo (0,91) (Fig. 21).

**Tabla 22.** Coeficientes de las funciones discriminantes (datos estandarizados con las varianzas comunes)

	VC 1	VC 2
COT	-3,05	0,45
COP	0,18	-0,25
MO/a+L	3,20	-0,50
CR	0,03	-0,26
CDMP	0,61	0,91

COT: carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ); COP: carbono orgánico particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); MO/a+L: índice estructural; CR: compactación relativa (%); CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado (mm).



**Figura 22.** Variables en el plano conformado por los ejes canónicos 1 y 2. COT: carbono orgánico total ( $\text{g kg}^{-1}$ ); COP: carbono orgánico particulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); MO/a+L: índice estructural; CR: compactación relativa (%); CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado (mm).

Los atributos del suelo que poseen un peso relativamente mayor en la función discriminante son los que permiten una mejor separación de los grupos, por lo que resultan ser los más utilizados como indicadores de calidad (Villamil *et al.*, 2008). La primera y segunda funciones discriminantes canónicas obtenidas pueden expresarse de la siguiente manera:

$$F1 = -5,61 + 3,15 (\text{MO/a+L}) + 1,76 (\text{CDMP}) - 1,23 (\text{COT}) + 0,36 (\text{COP}) + 0,0004 (\text{CR})$$

$$F2 = 1,68 - 0,49 (\text{MO/a+L}) + 2,65 (\text{CDMP}) + 0,18 (\text{COT}) - 0,51 (\text{COP}) - 0,07 (\text{CR}).$$

Los centroides en el espacio discriminante o medias de las funciones por grupo (Tabla 23) muestran que la combinación SD15FG2 se separa marcadamente del resto de los tratamientos de textura franco-arenosa sobre el eje canónico 1, principalmente por sus elevados contenidos de COT, mientras que SD15FF1 muestra los mayores valores en la relación MO/a+L (Fig. 23). De igual manera se pueden interpretar diferencias entre grupos usando el eje canónico 2, donde se aprecia que LR15FG1, SD15FB1 y SD15FF1 se separan de los tratamientos bajo SD que consideran cultivos de verano en las secuencias (SD10FG1 y SD15FG1) por una mayor estabilidad estructural.

**Tabla 23.** Centroides de las distintas combinaciones en el espacio discriminante formado por los ejes canónicos 1 y 2.

Combinación	Eje 1	Eje 2
LR15FG1	0,74	-1,83
SD10FG1	-0,99	0,83
SD15FG1	3,69	2,62
SD15FF1	4,91	-1,57
SD15FB1	-1,02	-0,73
SD15FG2	-8,18	0,29

Cuando se realiza un AD es necesario estimar las probabilidades asociadas a la correcta clasificación de nuevas observaciones (Johnson & Wichern, 1998). En la tabla de clasificación cruzada que se presenta a continuación (Tabla 24), las filas representan los tratamientos al cuál realmente pertenecen las observaciones y en las columnas los grupos al que las mismas son asignadas al utilizar la función discriminante. De esta manera se observa que la totalidad de las muestras correspondientes a las combinaciones SD15FG1 y SD15FG2 fueron bien clasificadas, la tasa de error de clasificación en dichos grupos es 0%. En el resto de las combinaciones se observan que algunas muestras no fueron correctamente asignadas, por lo que se producen tasas de error del 7% al 33% y una tasa de error aparente promedio del 11%.

Los contrastes a posteriori realizados confirmaron la adecuada separación de los grupos descripta en el AD. El tratamiento SD15FG2 presentó mayores contenidos de COT ( $F=65$ ,  $p<0,0001$ ) y una mayor EE ( $F=168$ ,  $p<0,0001$ ) que SD15FG1. Por otra parte, ambas combinaciones no se diferenciaron en el índice estructural ( $F=2$ ,  $p>0,16$ ).

Al realizar el contraste entre LR15FG1 y SD15FG1 también se observaron diferencias asociadas al sistema de labranza, ya que los suelos bajo LR presentaron contenidos de COT más elevados ( $F=10$ ,  $p<0,01$ ), un mejor IE ( $F=9$ ,  $p<0,01$ ) y una mayor EE ( $F=279$ ,  $p<0,0001$ ) respecto a SD.

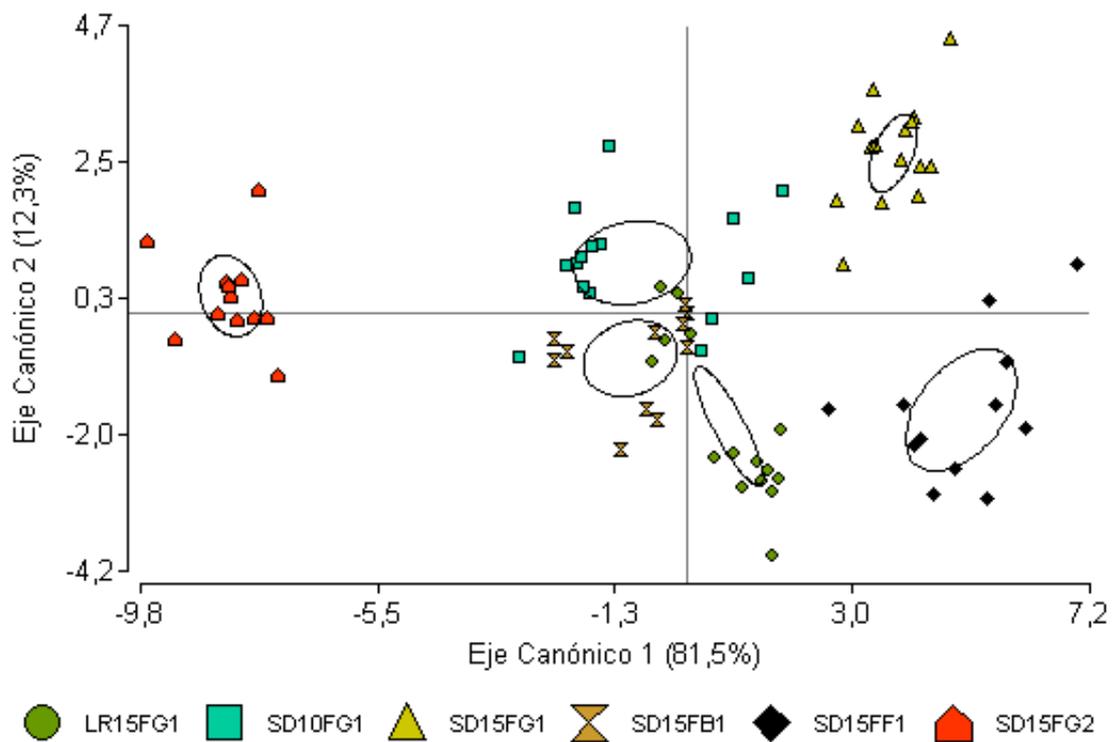
También las diferencias entre secuencias de cultivo resultaron significativas, ya que los lotes con cultivos de invierno (SD15FF1 y SD15FB1) presentaron valores de COT ( $F=6$ ,  $p<0,05$ ), EE ( $F=184$ ,  $p<0,0001$ ) y relación MO/a+L ( $F=6$ ,  $p<0,05$ ) más altos que SD15FG1.

Sobre la base de la elevada contribución relativa de las propiedades MO/a+L, CDMP y COT en las funciones discriminantes se obtuvo una adecuada clasificación de los tratamientos, lo que demostraría su utilidad como indicadores de calidad del suelo promisorios para la zona de estudio. De esta manera se puede afirmar que la introducción de cultivos de verano en las secuencias bajo SD de más de 10 años de implementación sobre suelos de textura FA tuvo un impacto negativo sobre las variables

evaluadas. En los lotes de textura más fina también se observa un cierto grado de deterioro, manifestado por un bajo índice estructural. Sin embargo, para arribar a una conclusión más precisa, hubiera sido deseable contar en la experiencia con un tratamiento bajo LR de similar textura, situación que no fue hallada en la región.

**Tabla 24.** Tabla de clasificación obtenida a partir del análisis discriminante.

Combinación	LR15FG1	SD10FG1	SD15FG1	SD15FB1	SD15FF1	SD15FG2	Error (%)
LR15FG1	<b>10</b>	1	0	4	0	0	33,3
SD10FG1	0	<b>14</b>	0	1	0	0	6,7
SD15FG1	0	0	<b>15</b>	0	0	0	0,0
SD15FB1	0	2	0	<b>10</b>	0	0	16,7
SD15FF1	1	0	0	0	<b>11</b>	0	8,3
SD15FG2	0	0	0	0	0	<b>12</b>	0,0



**Figura 23.** Representación de las observaciones de las seis combinaciones en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2 del análisis discriminante. Contornos corresponden a elipses de confianza del 95%.

## 5. SÍNTESIS DE RESULTADOS

La investigación realizada incluyó el contraste de diferentes tratamientos resultantes de la combinación de dos sistemas de labranza conservacionista (SD y LR), tres secuencias de cultivo (FF, FB y FG) y dos texturas diferentes (F a Fa y FA) en el horizonte superficial de suelos provenientes de lotes ubicados en establecimientos agrícolas de la región pampeana semiárida sur. Del análisis de los resultados obtenidos surge que:

- Al contrastar la aplicación de SD y LR sobre suelos con horizontes superficiales de textura franco arenosa y secuencias de cultivos de cosecha fina y gruesa:

- El pH, COP, NP, COT, relación COT/NT e IE resultaron menores en SD respecto a la LR, aunque en el caso de los tres últimos parámetros sólo se detectaron diferencias significativas en superficie (0-5 cm), presentando ambos sistemas similares valores de IE, relaciones COT/NT y contenidos de COT a mayor profundidad. En el caso de las variables NT, NP/NT y COR/NR, las diferencias a favor de la LR se extienden hasta los 10 cm. La relación C/N de la fracción joven de la MO fue más elevada en SD y no se encontraron cambios en el Pd, NR ni en las relaciones COP/COT y COP/COR entre sistemas de labranza.

- Asociada a la distribución de los residuos en el suelo, la actividad biológica se mostró marcadamente estratificada en SD, con valores para el desprendimiento de CO<sub>2</sub> en el espesor 0-5 cm un 258% más elevado respecto a LR. En las capas subyacentes las relaciones se invierten, observándose valores significativamente más altos bajo LR. También el índice de estratificación de la respiración microbiana (relación actividad biológica 0-5 cm/10-18 cm) resultó significativamente mayor en SD (9,4) respecto a LR (0,8). Sin embargo, la SD no ejerció control sobre la magnitud de la actividad global en el epipedón, ya que los valores de respiración microbiana resultaron similares en ambos sistemas de labranza para los 0-18 cm (SD15FG1: 118,0 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, LR15FG1: 129,3 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>).

- La compresión por el tránsito bajo SD produjo un desmejoramiento de la condición física del epipedón, respecto de lo observado para LR. Si bien en la superficie del suelo la Dap fue levemente mayor en los sistemas bajo SD (1,30 Mg m<sup>-3</sup> vs 1,34 Mg m<sup>-3</sup>) ésta aumentó significativamente en la subsuperficie, con la consecuente disminución de la Pt. La Dap promedio obtenida para la profundidad 5-10 cm bajo SD supera al valor umbral (Dap crítica), demostrando que la compresión por el tránsito produce en los suelos franco arenosos densificaciones importantes en esta porción del perfil. La mayor Dap observada

en los 10-18 cm, no respondería a procesos vinculados con la no inversión de la gleba, sino más bien debería ser tomadas como indicio de la persistencia de plowpanes bajo este sistema a pesar del tiempo transcurrido desde su implementación. En todas las profundidades evaluadas bajo SD se obtuvieron mayores valores de RP y CR, así como una EE más baja en comparación con LR. El estudio de la distribución por tamaño del espacio poroso del suelo reveló una disminución de los MP, significativa en las profundidades de 5-10 cm y 10-18 cm, y un leve aumento de la mesoporosidad y en el contenido de AU bajo SD. Para el porcentaje de poros  $< 0,2 \mu\text{m}$  no se detectaron diferencias entre ambas combinaciones hasta los 10 cm, aumentando la microporosidad en SD respecto a LR a mayor profundidad.

- No se detectó una correlación significativa entre la RP y la Dap bajo SD. Este comportamiento podría estar asociado al desarrollo del proceso “hardening”, ya descrito bajo estos sistemas en suelos de la región pampeana húmeda.

- En la implementación de distintas secuencias de cultivos bajo SD continua en suelos con horizontes superficiales de textura franco arenosa:

- La mayor frecuencia de gramíneas en la combinación SD15FF1 produjo un aumento del pH, COT, COP, NP y de las relaciones COP/COT, NP/NT, NP/NR, COP/COR y COR/NR respecto a las secuencias que incluyen especies estivales. El Pd aumentó en las secuencias FG debido a una menor extracción de este nutriente, asociada a los bajos rendimientos observados en la zona para los cultivos de verano. No se detectaron diferencias entre las secuencias de cultivos contrastadas en el caso del NT, COR, NR ni en las relaciones C/N y COP/NP.

- El incremento del COT y de las fracciones particuladas del C y del N bajo SD15FF1 promovieron una mayor actividad biológica en los 0-5 cm y contribuyeron a mejorar el estado de agregación del suelo. De este modo, los valores de Dap máx. resultaron más bajos y la Pt, EE y el IE más elevados en comparación con SD15FG1. En lo que respecta a la Dap y CR, sólo se detectaron diferencias a favor de SD15FF1 en la superficie, mientras que los porcentajes de MP y mP no se vieron afectados. Los  $\mu\text{P}$  fueron levemente superiores en los lotes bajo secuencias de cultivo invernales respecto a la combinación FG, a pesar de la similitud textural existente entre los tratamientos.

- El comportamiento del tratamiento con barbecho prolongado (SD15FB1) fue variable, de modo tal que los valores de algunos parámetros se asemejaron más a SD15FF1, en tanto que otros fueron similares a SD15FG1. En el caso de las propiedades

químicas, se detectó que SD15FB1 presentó, en general, valores intermedios (en el caso de COT, COP, NP y relaciones COP/COT, NP/NT) entre SD15FF1 y SD15FG1, similares (NT, COR) o levemente superiores a ambas combinaciones (pH, NR). En cuanto a las variables físicas, se observó una tendencia de los lotes con barbecho prolongado a presentar un cierto deterioro estructural en la superficie del suelo, manifestado por valores elevados de Dap, RP y CR y una baja Pt con menor proporción de macroporos respecto a las otras dos combinaciones. En la capa de 5-10 cm (más sensible a las labranzas) este tratamiento mostró menores valores de Dap (y siempre inferiores a la Dap crítica) y de CR, acompañados de una mayor macroporosidad respecto a las otras secuencias mencionadas, lo que es atribuido al menor tránsito. En el caso de EE y Pt, los resultados observados en las secuencias con barbecho fueron similares y superiores a los obtenidos en SD15FF1 y SD15FG1, respectivamente. En 10-18 cm, no se detectaron diferencias entre tratamientos en la Dap y CR mientras que la Pt fue similar a SD15FG1 e inferior a SD15FF1 y la EE similar a SD15FF1 y superior a SD15FG1.

- En suelos bajo SD continua con una misma secuencia (cultivos de cosecha fina y gruesa) y distinta textura del horizonte superficial:

- Se detectaron incrementos significativos de  $9,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  de COT,  $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de COP y  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de COR para el epipedón de los suelos de textura franco-franco arcillosa (SD15FG2) con respecto a aquellos de granulometría más gruesa (SD15FG1), resultado de la mayor capacidad de protección de la MO y las mejores condiciones de humificación que genera la fracción fina. También resultaron más elevados en los suelos de textura más fina los contenidos de Pd, NT y sus fracciones (NP y NR).

- No se detectaron diferencias entre ambos tratamientos en la actividad biológica ni en las relaciones C/N, COP/COT, NP/NT, COP/COR, NP/NR, COP/NP y COR/NR. La textura de los suelos afectó los contenidos de COT y NT pero no influyó sobre sus relaciones ni sobre la calidad de la materia orgánica.

- Los mayores contenidos de arcilla asociados a concentraciones más altas de MO en los suelos de textura más fina, tuvieron influencia positiva sobre la estructura y su estabilidad, contribuyendo a disminuir la Dap, la susceptibilidad a la compactación y la CR, además de aumentar la Pt y los contenidos de AU respecto a suelos de granulometría más gruesa. Sin embargo, el índice estructural calculado para el epipedón de suelos F-Fa fue bajo ( $\text{MO}/\text{a}+\text{L}=5$ ) y no presentó diferencias significativas con el tratamiento de textura más gruesa ( $\text{MO}/\text{a}+\text{L}=6$ ), lo que demostraría la alta susceptibilidad de los suelos de la región semiárida a la pérdida de su calidad física, aún en aquellos de

granulometría más fina. Asimismo, del análisis de la Dap crítica surge que el 40% y el 60% de los lotes de dicho tratamiento presentaron valores de Dap cercanos o superiores al umbral correspondiente en las profundidades de 5-10 cm y 10-18 cm, respectivamente.

- El contenido de humedad crítica a la cuál se produce el mayor deterioro físico (mayor Dap máx.) se alcanzaría con mayor frecuencia en las combinaciones SD15FG1 (HC: 26%), con menores contenidos de COT y mayores porcentajes de arena respecto a SD15FG2 (HC: 20%).

- Por último, la comparación de los resultados obtenidos para la propiedades evaluadas en profundidades diferenciales del epipedón muestra:

- En los 0-5 cm: Asociado al mayor disturbio y desarrollo radicular, los parámetros analizados mostraron aquí la mayor variabilidad. Sin embargo, algunas propiedades resultaron indicadores sensibles del efecto de los distintos sistemas de labranza y secuencias de cultivo evaluados. Las fracciones particuladas del C y N (relacionadas directamente con la disponibilidad de nutrientes para los cultivos) se mostraron marcadamente estratificadas y presentaron valores más elevados en las secuencias de cultivos invernales respecto al resto de las secuencias, y en LR en comparación con la SD. También la actividad de los microorganismos resultó sensible a la aplicación de LR y SD, particularmente en esta profundidad. Dentro de las propiedades físicas, la que mostró mayor sensibilidad a la aplicación de las distintas combinaciones fue la EE, que resultó hasta un 63% más elevada en LR respecto a los tratamientos bajo SD. Los valores del CDMP bajo este último sistema de labranza y particularmente los obtenidos en las rotaciones que incluyen cultivos estivales en texturas FA resultan muy elevados, mostrando una pérdida marcada de la EE. Esto impacta sobre la susceptibilidad a la erosión eólica, proceso que se vería además favorecido por los bajos rendimientos de los cultivos de verano en la región, que no logran una adecuada cobertura de rastrojos en la superficie en una época en la que los suelos están secos debido a la elevada evapotranspiración y los vientos de carácter erosivo son frecuentes.

- En los 5-10 cm: Los parámetros físicos evaluados mostraron densificación en esta capa en todos los suelos de textura FA, asociada al tránsito de las maquinarias agrícolas. Bajo LR, el CDMP resultó más elevado que en las otras profundidades y además, el 40% de los lotes mostró valores de Dap por encima del umbral (Dap crítica). Sin embargo, el deterioro de la estructura a esta profundidad resultó más marcado bajo SD continua (SD10FG1, SD15FG1 y SD15FF1) donde se observaron incrementos en la

Dap y en la CR y disminuciones en la Pt y en el porcentaje de MP respecto a LR. Además, el 70% de los lotes presentó densidades aparentes hasta un 7% superiores al umbral. Consecuencia del mayor período de barbecho y por lo tanto, del menor tránsito, el tratamiento SD15FB1 mostró un comportamiento diferente al resto de los lotes bajo SD, asemejándose a LR.

- En los 10-18 cm: Se detectó la persistencia de plowpanes bajo SD en tanto que la ausencia o disrupción mecánica de los mismos en LR se refleja en los valores obtenidos para los parámetros físicos, mientras que las variables químicas no mostraron diferencias importantes entre tratamientos.

## **6. CONCLUSIONES**

Las investigaciones realizadas acerca del impacto de distintos sistemas de labranza sobre los indicadores de calidad edáfica se han centrado principalmente en la región pampeana húmeda, comparando situaciones muy contrastantes como SD vs labranza convencional y/o situaciones prístinas. Estudios desarrollados para la zona subhúmeda y semiárida bajo manejos conservacionistas, y particularmente aquellos referidos a los efectos que poseen diferentes secuencias de cultivos agrícolas sobre el suelo, son poco abordados por la literatura.

Ante el paulatino avance de la adopción de la SD en la región pampeana semiárida sur, en esta Tesis se pretendió reflejar la realidad de campo trabajando sobre lotes en producción, con el fin último de anticipar el verdadero impacto de su implementación como sistema continuo en condiciones de aplicación no controladas.

La mayoría de los parámetros bioquímicos y físicos evaluados resultaron sensibles para detectar cambios en la calidad del suelo bajo los distintos tratamientos contrastados. Sin embargo, las propiedades IE, CDMP y COT del epipedón fueron las que tuvieron un mayor peso en las funciones discriminantes, por lo que se demuestra su utilidad como indicadores de calidad edáfica para la zona de estudio.

La aplicación de SD continua con secuencias de cultivos invernales y estivales, tuvo un efecto perjudicial más acentuado sobre la mayoría de los parámetros bioquímicos y físicos del suelo que el resto de los tratamientos bajo estudio. Los análisis multivariados realizados mostraron que SD10FG1 y SD15FG1 se segregan del resto de las combinaciones de textura franco arenosa por el desarrollo de procesos de compactación y una importante pérdida de EE asociados al tránsito, y por presentar menores contenidos de COT, COP y NP así como valores de IE más bajos. Este deterioro de las propiedades físicas y químicas no fue tan marcado en los lotes bajo SD que consideran sólo gramíneas en la secuencia de cultivos, los que presentaron valores de IE, COT y EE más elevados que SD15FG1. El comportamiento observado en los suelos correspondientes al tratamiento SD15FF1 se acerca a LR, sistema que mostró las mejores condiciones físicas y bioquímicas. Por otra parte, el mayor deterioro observado en 5-10 cm señala a esa profundidad como la más adecuada para realizar seguimientos temporales de variables que determinan modificaciones en la calidad edáfica.

A pesar de las mejores cualidades agrícolas que presentan los suelos con horizontes superficiales de textura F a Fa, inherentes a su granulometría, también en ellos existe riesgo de degradación física demostrada por los bajos valores registrados para el índice estructural y la cercanía de la Dap a los umbrales de Dap crítica.

Si bien el comportamiento del suelo bajo SD es altamente sitio dependiente, los resultados obtenidos permiten adelantar que los procesos de degradación descritos son extendidos en la región pampeana semiárida sur. Su implementación en forma continua por más de 8 años mostró importantes modificaciones estructurales y funcionales en los horizontes superficiales, y tal como se lo ha implementado, no siempre se comporta como un sistema conservacionista. En esta zona, por sus propiedades texturales y mineralógicas, los suelos presentan escasa capacidad para regenerar su estructura per se. Por otra parte, las características edafoclimáticas y la incidencia de plagas y patógenos limitan la productividad de los cultivos estivales, aspectos que se reflejan en lotes bajo SD continua por la baja cobertura lograda, condición que reduce la eficiencia del sistema para conservar el suelo y el agua.

Se requiere adaptar la tecnología a las características agroecológicas de la región, haciendo un mayor uso de cereales invernales y un análisis de la oportunidad de introducción del cultivo de verano en la rotación utilizando distintas especies (sorgo, moha y/o mijo), si se pretende evitar pérdidas de carbono orgánico y el consecuente deterioro de la estructura de horizonte superficial. Aunque esto podría tener contraindicaciones económicas, se debe considerar en el análisis la sustentabilidad del sistema, la que evidentemente está en riesgo con cultivos de bajos aportes como lo son el girasol y la soja. A futuro, y de continuar las tendencias observadas, debería replantearse la necesidad de introducir pasturas perennes en las rotaciones o incluso, discontinuar temporalmente la SD mediante la introducción de labranzas reducidas o verticales.

Finalmente, la persistencia de plowpanes aun en lotes con 15 años de SD continua, señala la necesidad de proceder a su disrupción antes de implementar el sistema, pues éste carece de efectividad para revertir compactaciones preexistentes por el supuesto incremento de la actividad biológica en los suelos de la región. El deterioro de las propiedades físicas en la profundidad 5-10 cm bajo SD se manifiesta en un incremento del espesor de la capa compacta, trasladando su límite superior muy cerca de la superficie. Esto afecta negativamente las características estructurales que por definición, deben cumplimentar los epipedones para clasificar como mólicos, condición que permitiría cuestionar la clasificación taxonómica de los suelos en el Orden Molisol (*L. mollis*: blando, mullido).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2012. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. [www.aapresid.gov.ar](http://www.aapresid.gov.ar) (verificado el 10/12/2012).
- Agostini, M; G Studdert & G Domínguez. 2010. Cambios en algunas propiedades físicas de un suelo del sudeste bonaerense asociados a distintos sistemas de cultivo. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Actas en CD-R.
- Álkorta, I; J Hernández-Allica; J Becerril; I Amezaga; I Albizu & C Garbisu. 2004. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead and arsenic. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 3: 71-90.
- Álvarez, C; M Taboada; C Bustingorri & F Gutiérrez Boem. 2006. Descompactación de suelos en siembra directa: Efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de Maíz. *Ciencia del Suelo* 24: 1-10.
- Álvarez, C; M Taboada; F Gutiérrez Boem; A Bono; P Fernández & P Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the rolling pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
- Álvarez, C. 2013. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: Caracterización, génesis y manejo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (LACS)*. Número 10, Junio 2013. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2013-10?OpenDocument&toc=1> (Verificado el 20/02/2014).
- Álvarez, M; M Osterrieth; A Becker; B Parra; J del Río & M Cantú. 2008. Estudio comparativo de la morfología de agregados, su rol como indicador en la calidad de molisoles de la región pampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Actas en CD-R.
- Álvarez, M; M Osterrieth & J del Río. 2012. Changes on aggregates morphology and roughness induced by different uses of Typical Argiudolls, Buenos Aires province, Argentina. *Soil Till. Res.* 119: 38-49.
- Álvarez, R; R Díaz; N Barbero; O Santanotoglia & L Blotta. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and CO<sub>2</sub>-C production from three tillage systems. *Soil Till. Res.* 33: 17-28.
- Álvarez, R; M Russo; P Prystupa; J Scheiner & L Blotta. 1998. Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampas. *Agron. J.* 90: 138-143.
- Álvarez, R & H Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yield in the Argentine Pampas. *Soil Till. Res.* 104: 1-15.
- Amiotti, N. 1996. Cambios en las propiedades de horizontes subsuperficiales inducidos por el laboreo del suelo: consecuencias agronómicas, aspectos genéticos y cartográfico-taxonómicos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. 314 pp.
- Amiotti, N; O Bravo; P Zalba & N Peinemann. 2007. Effect of landscape position on the acidification of loess-derived soils under *Pinus radiata*. *Austral Ecology* 32: 534–540.
- Amiotti, N.; M Blanco (exaequo); E Schmidt y S Díaz. 2010. Capítulo III: Variabilidad espacial de los suelos y su relación con el paisaje. Pp. 127-173. En: Paoloni, JD (compilador). *Ambientes y Recursos Naturales del Partido de Bahía Blanca: Clima, Geomorfología, Suelos y Aguas (Sudoeste de la provincia de Bs. As.)*. 1º Ed. Bahía Blanca, UNS, Edi-UNS. 240 pág.
- Amiotti, N; M Villamil & R Darmony. 2012. Agronomic and taxonomic consequences of agricultural use of marginal soils in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76 (2): 558-568.
- Andrade, F; H Echeverría; N González; S Uhart & N Darwich. 1996. Requerimientos de nitrógeno y fósforo de los cultivos de maíz, girasol y soja. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. *Boletín técnico* N° 134. 17 pp.
- Andriulo, A; C Sasal & M Rivero. 2001. Los sistemas de producción conservacionistas como mitigadores de la pérdida de carbono orgánico edáfico. Pp. 17-28. En: Panigatti, JL; D Buschiazzo & H Marelli (Ed.). *Siembra directa II*. INTA.

- Angers, D; M Bolinder; M Carter; E Gregorich; C Drury; B Liang; R Voroney; R Simard; R Donald; R Beyaert & J Martel. 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil Till. Res.* 41: 191-201.
- Aparicio, V & J Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96: 155-165.
- Apezteguía, H; H Salas; E Lovera & R Sereno. 2000. El efecto de labranzas y rotaciones sobre la conservación de la materia orgánica edáfica. 11th International Soil Conservation Organization Conference, ISCO 2000. Bs. As.
- Aragón, A; M García; R Filgueira & Y Pachepsky. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test. The relationship with organic carbon and water content. *Soil Till. Res.* 56: 197-204.
- Arshad, M; M Schnitzer; D Angers & J Ripmeester. 1990. Effects of till vs no-till on the quality of soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 22: 595-599.
- Arshad, M & S Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88: 153-160.
- Astier-Calderón, M; M Maass-Moreno & J Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36(5): 605-620.
- Baker, J; T Ochsner; R Venterea & T Griffis. 2007. Tillage and soil carbon sequestration-what do we really know? *Agr. Ecosyst. Environ.* 118: 1-5.
- Balesdent, J; C Chenu & M Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53: 215-230.
- Balzarini M; L González; M Tablada; F Casanoves; J Di Rienzo & C Robledo. 2008. Manual del Usuario. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Barber, S. 1980. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. Pp: 591-654. In: Khasawneh, FE; EC Sample & EJ Kampratlleds (Ed.). *The roles of phosphorus in Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA. Madison, Wisconsin, USA.
- Barrios Arosemena, M; L Picone; F García; K Fabrizzi & G Cendoya. 2000. Cambios en los contenidos de carbono y nitrógeno del suelo en sistemas bajo siembra directa en transición desde labranza convencional y pastura. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Actas en CD-R.
- Bayer, C; J Mielniczuk; T Amado; L Martín-Neto & S Fernández. 2000. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 54: 101-109.
- Benavides, L; S López; M Malter Terrada; M Barrios & A Buján. 2008. Variaciones de carbono orgánico total y particulado en siembra directa y labranza convencional después del cultivo de soja y sorgo. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta. Actas en CD-R.
- Blake, G & K Hartge. 1986. Bulk density. Pp: 363-375. In: Klute, A (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and mineralogical methods*. 2º Ed. Am. Soc. of Agronomy, Inc.; Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Blanco, M; N Amiotti; & J Aguilar Ruiz. 2003. Reconstrucción de la evolución geopedogenética en una toposecuencia del sudoeste pampeano. *Ciencia del suelo* 21: 59-70.
- Blanco-Canqui, H & R Lal. 2008. No-tillage and soil profile carbon sequestration: an on-farm assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 693-701.
- Bonel, B; H Morrás & V Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23: 1-12.
- Bossuyt, H; J Six & P Hendrix. 2002. Aggregate-protected carbon in no-tillage and conventional tillage agroecosystems using carbon-14 labeled plant residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1965-1973.
- Bravo, O. 2014. Factores y procesos pedogenéticos que regulan el almacenamiento de carbono orgánico en suelos de la Pampa Austral. Tesis Doctoral. UNS. 148 pp.

- Bray, R & L Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremer, E; H Janzen & A Johnson. 1994. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Can. J. Soil Sci.* 74: 131-138.
- Bremner, J & R Mulvaney. 1996. Nitrogen total and inorganic forms. In: Sparks, D (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods.* Pp: 869-919. SSSA Book Series N° 5, SSSA & ASA, Madison, WI, USA.
- Bullock, D. 1992. Crop rotation. *Critical Rev. Plan Sci.* 11 (4): 309-326.
- Buschiazzo, D & J Panigatti. 1996. Labranzas en la Región Semiárida Argentina. Consideraciones finales. Pp. 147-156. En: Buschiazzo, D; J Panigatti & F Babinec (Ed.). *Labranzas en la Región Semiárida Argentina.*
- Buschiazzo, D; A Quiroga & K Stahr. 1991. Patterns of organic matter accumulation in soils of the semiarid Argentinean Pampas. *Z. Pflanzener Bodenk.* 154: 437-441.
- Buschiazzo, D; J Panigatti & P Unger. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 49: 105-116.
- Buschiazzo, D; S Aimar & T Zobeck. 1999. Wind erosion in soils of the semiarid Argentinean Pampas. *Soil Sci.* 164: 133-138.
- Buyanovsky, G; M Islam & G Wagner. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 58: 1167-1173.
- Calviño, P; H Echeverría & M Redolati. 2002. Estratificación de fósforo en el suelo y diagnóstico de la fertilización fosfatada en trigo en siembra directa. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur (INPOFOS)* 14: 1-4.
- Campbell, C; V Biederbeck; R Zentner & G Lafond. 1991. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 363-376.
- Campbell, C; S Brandt; V Biederbeck; R Zentner & M Schnitzer. 1992. Effect of crop rotations and rotation phase on characteristics of soil organic matter in a Dark Brown Chernozemic soil. *Can. J. Soil Sci.* 72: 403-416.
- Campbell, C; B Mc Conkey; R Zentner; F Selles & D Curtin. 1996. Tillage and crop rotation effects on soil organic C and N in a coarse textured typic Haploboroll in southwestern Saskatchewan. *Soil Till. Res.* 37: 3-14.
- Campbell, C; R Zentner; E Gregorich; G Roloff; B Liang & B Blomert. 2000. Organic carbon accumulation in soil over 30 years in a semiarid southwestern Saskatchewan: Effects of crop rotations and fertilizers. *Can J. Soil. Sci.* 80: 179-192.
- Campitelli, P; A Aoki; O Gudelj; A Rubenacker; M Pasquero & R Sereno. 2008. Evaluación del efecto de uso y prácticas agrícolas sobre indicadores de calidad de suelo mediante el análisis de componentes principales. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Actas en CD-R.
- Carmona, D. 2005. Plagas emergentes en siembra directa. [www.agrositio.com](http://www.agrositio.com) (verificado el 15/04/2011).
- Carter, M. 1986. Microbial biomass as an index for tillage induced changes in soil biological properties. *Soil Till. Res.* 7: 29-40.
- Carter, M. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- Casas, R; M Ostinelli; G Cruzate & C Izaurralde. 2005. Impacto de la SD sobre la distribución en profundidad de la materia orgánica total y particulada en suelos de la región Pampeana húmeda Argentina. Jornadas Nacionales "Materia orgánica y sustancias húmicas". CERZOS-CONICET – UNS. Bahía Blanca. Actas en CD-R.
- Cocacevich, F; E Echeverría & L Aguirrezabal. 1998. Influencia del fósforo sobre el crecimiento aéreo y radical de plantas de trigo. *Ciencia del Suelo* 16: 94-98.

- Conant, R; P Dalla-Betta; C Klopatek & J Klopatek. 2004. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biol. Biochem.* 36: 945-951.
- Costantini, A; H De-Polli; C Galarza; R Pereyra Rosiello & R Romaniuk. 2006. Total and mineralizable soil carbon as affected by tillage in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 88: 274-278.
- Crespo, L; L Picone; Y Andreoli & F García. 2001. Poblaciones microbianas y contenido de carbono y nitrógeno del suelo en sistemas de siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 19: 30-38.
- CTIC. 1998. Crop Residue Management. Conservation Tillage Information Center, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Curtin, D; F Selles; H Wang; B McConkey & C Campbell. 1998. Carbon dioxide fluxes and carbon storage in conventional and no-till soil in semiarid Saskatchewan, Canada. XVI Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, Montpellier, Francia.
- Danielson, R & P Sutherland. 1986. Porosity. Pp: 443-460. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 1: Physical and mineralogical methods*. 2º Ed. Am. Soc. of Agronomy, Inc; Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Degens, B. 1997. Macro-aggregation of soil by biological bonding and binding mechanism and the factors affecting these: a review. *Aust. J. Soil Res.* 35: 431-459.
- De Leenher, L & M De Boodt. 1958. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. Pp. 290-300. *Proceeding of the International Symposium on Soil Structure*. Ghent, Bélgica.
- Denef, K & J Six. 2006. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 774-786.
- Derpsch, R. 2008. No tillage and conservation agriculture: A progress report. Pp. 7-39. In: Goddard, T; M Zoebish, Y Gan; W Ellis; A Watson & S Sombatpanit (Ed.). *No Till Farming Systems*. Special Publication N° 3, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok. 544 pág.
- Derpsch, R. 2009. Global overview of conservation agriculture adoption. IV World Congress on Conservation Agriculture. New Delhi, India.
- Derpsch, R; T Friedrich; A Kassam & L Hongwen. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3: 1-25.
- Dexter, A; G Richard; D Arrouays; E Czyz; C Jolivet & O Duval. 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144: 620-627.
- Díaz-Zorita, M. 1999. Efectos de seis años de labranzas en un Hapludol del noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del suelo* 17: 31-36.
- Díaz-Zorita, M & G Grosso. 2000. Soil water related properties and the compactability of soils from the Pampean region of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 121-126.
- Díaz-Zorita, M & J Grove. 2001. Rotaciones de cultivos en siembra directa y las propiedades de suelos en la pampa arenosa. *Siembra directa II*. Panigatti, JL; D Buschiazzi & H Marelli (Ed.). 377 pág.
- Díaz-Zorita, M; G Duarte & JH Grove. 2002. A review of no till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Díaz Zorita, M; M Barraco & C Álvarez. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 22: 11-18.
- Diez, A; E Zamuner; L Picone & A Berardo. 2000. Efecto de la aplicación de dosis única o fraccionada de fertilizante fosfatado sobre el fósforo del suelo. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Actas en CD-R.

- Di Rienzo, J; F Casanoves; M Balzarini; L González; M Tablada & C Robledo. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, UN de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Domínguez, G. 2004. MOP: su relación con dos sistemas de labranza y con el rendimiento de maíz en un molisol de Balcarce. Tesis MS, UN de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, Unidad Integrada Balcarce, Balcarce, Bs. As.
- Doran, J & T Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J; D Coleman; D Bezdicsek & B Stewart (Ed.). *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America. Spec. Publ. N° 35. Madison, WI, USA.
- Doran, J & A Jones. 1996. Methods for assessing soil quality. SSSA Spec. Publ. N° 49. SSSA, Madison, WI, USA.
- Doran, J; M Sarrantonio & M Liebig. 1996. Soil health and sustainability. *Adv. Agron.* 56: 1-54.
- Dou, F; A Wright & F Hons. 2007. Depth distribution of soil organic C and N after long term soybean cropping in Texas. *Soil Till. Res.* 94: 530-536.
- Duval, M; J Galantini; J Iglesias & H Kruger. 2013. El cultivo de trigo en la Región Semiárida Bonaerense: impacto sobre algunas propiedades químicas del suelo. *RIA* 39: 178-134.
- Echeverría, H; C Navarro & F Andrade. 1992. Nitrogen nutrition of wheat following different crops. *J. Agric. Sci.* 118: 157-163.
- Echeverría, H & J Ferrari. 1993. Relevamiento de algunas características de los suelos agrícolas del SE de la provincia de Bs. As. EEA-INTA Balcarce. Boletín técnico N° 112. 18 pág.
- Echeverría, H & H Sainz Rozas. 2006. Capítulo 4: Nitrógeno en el suelo. En: Echeverría, H & F García (Ed.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA, Argentina. 540 pág.
- Eiza, M; N Fioriti; G Studdert & H Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo* 23: 59-67.
- Eiza, M; G Studdert; N Fioriti & G Domínguez. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en molisoles de Balcarce. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy. Actas en CD-R.
- ERS. 2009. In: [http://www.ers.usda.gov/media/135319/eib70\\_reportssummary.pdf](http://www.ers.usda.gov/media/135319/eib70_reportssummary.pdf). (Verificado el 5/12/2013).
- Essington, M & D Howard. 2000. Phosphorus availability and speciation in long-term no- till and disk-till soil. *Soil Sci.* 165: 144-152.
- Fabrizzi, K; A Morón & F García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.
- Fabrizzi, K; F García; J Costa & L Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81: 57-69.
- Falotico, J; G Studdert & H Echeverría. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del suelo* 17: 9-20.
- FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de Tierras y aguas 8.
- FAO. 2012. Basic Principles of Conservation Agriculture. In: <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html> (verificado el 15/02/2014).
- Ferreras, L; J Costa & F García. 1999. Temperatura y contenido hídrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranza. *Ciencia del suelo* 17: 39-45.
- Ferreras, L; J Costa; O García & C Pecorari. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 31-39.

- Ferreras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & F García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25: 159-172.
- Filip, Z. 2002. International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters. *Agr. Ecosyst. Environ.* 88: 169-174.
- Francis, G & TL Knight. 1993. Long-term effects of conventional and no-tillage on selected soil properties and crop yields in Canterbury, New Zealand. *Soil Till. Res.* 26: 193-210.
- Franzluebbers, A; F Hons & D Zuberer. 1994. Long term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1639-1645.
- Franzluebbers, A; R Haney; F Hons & D Zuberer. 1996. Active fractions of organic matter in soils with different texture. *Soil Biol. Biochem.* 28:1367–1372.
- Franzluebbers, A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66: 95–106.
- Franzluebbers, A. 2004. Tillage and residue management effects on soil organic matter. Pp. 227-268. In: Magdoff, F & R Weil (Ed.). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- Franzluebbers, A. 2009. Linking soil organic carbon and environmental quality through conservation tillage and residue management. Pp 263-289. In: Lal, R & R Follett (Ed.). *Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect*, 2º Ed. SSSA Spec. Pub. N° 57. Madison, USA.
- Galantini, J & R Rosell. 1997. Organic fractions, N, P, S changes in Argentine semiarid Haplustoll under different crop sequences. *Soil Till. Res.* 42: 221-228.
- Galantini, J; R Rosell; G Brunetti & N Senesi. 2002. Dinámica y calidad de las fracciones orgánicas de un Haplustol durante la rotación trigo-leguminosas. *Ciencia del Suelo* 20: 17-26.
- Galantini J; N Senesi; G Brunetti & R Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143–152.
- Galantini, J. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. Capítulo IV parte 2. Pp. 95-106. En: Marbán, L y S Ratto (Ed.). *Manual "Tecnología en análisis de suelos: Alcance a laboratorios agropecuarios"*. AACCS.
- Galantini, J & R Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.
- Galantini, J; J Iglesias; C Maneiro & C Kleine. 2007a. Efectos de largo plazo sobre la materia orgánica del suelo. Pp. 11-15. En: *Revista Técnica Especial: "La Siembra directa en los sistemas productivos del sur y sudoeste bonaerense"*. Galantini, J (Ed.). AAPRESID, CIC, CERZOS y UNS. 85 pág.
- Galantini, J; M Landriscini & C Hevia. 2007b. Contenido y calidad de la materia orgánica particulada del suelo. Pp. 36-40. En *Revista Técnica Especial: "La siembra directa en los sistemas productivos del sur y sudoeste bonaerense"*. Galantini, J (Ed.). AAPRESID, CIC, CERZOS y UNS. 85 pág.
- Galantini, J & L Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* 25: 41-55.
- Galantini, J; J Iglesias; M Landriscini, L Suñer & G Minoldo. 2008. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. Pp. 71-95. En: Galantini, J (Ed.). *Estudios de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina*. Edi-UNS. Bahía Blanca, Argentina.
- Galantini, J; M Duval; J Iglesias & J Martínez. 2013. Sistemas de labranza en el SO bonaerense: dinámica y balance de carbono. *Jornada Nacional "Impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades químicas del suelo: efectos sobre los balances de C"*. Bahía Blanca. Trabajo en CD-R.

- García, F. 2011. Siembra directa, rotaciones y fertilidad para una agricultura sostenible con énfasis en las condiciones de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 1: 14-21.
- Gil-Sotres, F; C Trasar-Cepeda; MC Leirós & S Seoane. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37: 877-887.
- Giuffré, L; O Heredia; N Arrigo; M Conti & J Storti. 1995. Variación espacial y temporal del fósforo extractable en un ciclo de maíz sembrado bajo dos sistemas de labranza: convencional y directo. *Agronomía Costarricense* 19: 57-60.
- Giuffré, L; O Heredia; C Pascale & M Carabajales. 1997. Formas de fósforo en el suelo y su relación con las rotaciones y labranzas. *Rev. Fac. Agr. Bs. As.* 17: 281-287.
- Golchin, A; J Oades; J Skjemstad & P Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32: 1043-1068.
- Gómez, M; H Kruger & M Sagardoy. 1996. Actividad biológica en un suelo de la zona semiárida bonaerense cultivado con la secuencia soja-trigo bajo tres prácticas culturales. *Ciencia del Suelo* 14: 37-41.
- González Uriarte, M. 2010. Capítulo II: Geomorfología aplicada a la gestión ambiental. Pp. 89-125. En: Paoloni, JD (compilador). *Ambientes y Recursos Naturales del Partido de Bahía Blanca: Clima, Geomorfología, Suelos y Aguas (Sudoeste de la provincia de Bs. As.)*. 1º Ed. Bahía Blanca, UNS, Edi-UNS. 240 pág.
- Greenland, A. 1981. In: McKeague, JA (Ed.). *Manual on soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science, Ottawa.
- Gregorich, E; M Carter; J Doran; C Pankhurst & L Dwyer. 1997. Biological attributes of soil quality. Pp. 81-113. In: Gregorich, EG & MR Carter (Ed.). *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
- Gupta, S & R Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: 65-100.
- Gutiérrez Boem, F; C Álvarez; M Cabello; P Fernández; A Bono; P Prystupa & M Taboada. 2006. Retención de fósforo en suelos labreados y no labreados de la Pampa Ondulada. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta. Actas en CD-R.
- Hall, A; C Rebella; C Ghera & J Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. Pp. 413-450. In: Pearson, CJ (Ed.). *Field Crop Ecosystems. Ecosystems of the World* 18. Elsevier, Amsterdam.
- Hakansson, I & J Lipiec. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.* 53: 71-85.
- Hamza, M & W Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Han, G; G Zhou; Z Xu; Y Yang; J Liu & K Shi. 2007. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biol. Biochem.* 39: 418-425.
- Hassink, J. 1994. Effect of soil texture on the size of the microbial biomass and on the amount of C and N mineralized per unit of microbial biomass in Dutch grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* 26: 1573-1581.
- Havlin, J; D Kissel; L Maddux; M Claassen & J Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 448-452.
- Haynes, R. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Adv. Agron.* 85: 221-268.
- Hedley, M; J Stewart & B Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.

- Heenan, D; K Chan & P Knight. 2004. Long-term impact of rotation, tillage and stubble management on the loss of soil organic carbon and nitrogen from a Chromic Luvisol. *Soil Till. Res.* 76: 59-68.
- Hendrix P; A Franzluebbers & D McCracken. 1998. Management effects on C accumulation and loss in soils of the southern Appalachian Piedmont of Georgia. *Soil Till. Res.* 47: 245-251.
- Hill, P. 2001. Use of continuous no-till and rotational tillage systems in the central and northern Corn Belt. *J. Soil Water Conserv.* 56: 286–292.
- Hobbs, P; K Sayre & R Gupta. 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philos. Trans R. Soc. Lond B. Biol. Sci.* 363: 543-555.
- Iglesias, J; J Galantini & L Santiago. 2007. Cambios en la distribución y orientación de diferentes tamaños de poros. Pp. 24-27. En: *La Siembra directa en los sistemas productivos del sur y sudoeste bonaerense*. AAPRESID. 85 pág.
- Iglesias, J; G Minoldo; M Landriscini; J Galantini & A Miglierina. 2008. Rotación de cultivos en la zona semiárida. Efectos de largo plazo sobre algunas propiedades del suelo. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis. Actas en CD-R.
- Imhoff, S; M Pilatti; P Ghiberto & A Pires da Silva. 2004. Propiedades físicas de suelos de Santa Fé: funciones de edafotransferencia. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Actas en CD-R.
- Jenkinson, D. 1988. Soil organic matter and its dynamics. Pp. 564-607. In: Wild, A. (Ed.). *Russel's soil conditions and plant growth*. 11th Ed. Longman. New York, USA.
- Johnson, R & D Wichern. 1998. *Applied multivariate statistical analysis*. 4<sup>th</sup> Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Jorajuria, D; L Draghi & A Aragon. 1997. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium Trifolium* grassland. *Soil Till. Res.* 41: 1-12.
- Karayel, D. 2009. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean. *Soil Till. Res.* 104: 121-125.
- Karlen, D; M Mausbach; J Doran; R Cline; R Harris & G Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Kassam, A; T Friedrich; F Shaxson & J Pretty. 2009. The spread of Conservation Agriculture: Justification, sustainability and uptake. *Int. J. Agr. Sustain.* 7: 292-320.
- Kay, B & A Vanden Bygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118.
- Kettler, T; D Lyon; J Doran; W Powers & W Stroup. 2000. Soil quality assessment after weed-control tillage in a no-till wheat-fallow cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 339–346.
- Kiessling, R; J Galantini; J Iglesias; H Kruger & S Venanzi. 2007. Efectos de corto plazo sobre el espacio poroso en sistemas mixtos. En: *La siembra directa en los sistemas productivos del S y SO Bonaerense*, Galantini *et al.*, 2007 (Eds.). 25-30 pág.
- Kiessling, R; J Galantini; J Iglesias & H Kruger. 2010. Efecto del sistema de labranza y la fertilización nitrogenada sobre el carbono y nitrógeno edáfico en el suroeste bonaerense. XXII Congreso Argentino del Ciencia del Suelo. Rosario. Actas en CD-R.
- Kiessling, R. 2012. Cambios en algunas propiedades químicas y físicas del suelo en sistemas productivos del sudoeste bonaerense: efecto del sistema de labranza, nivel de fertilización nitrogenada y pastoreo directo. Tesis Magíster. Universidad Nacional del Sur. 120 pág.
- Klute, A. (Ed.). 1986. *Methods of Soil Analysis*. Am. Soc. of Agronomy. Wisconsin, USA.
- Koutika, S; N Dassonville; S Vanderhoeven; L Chapuis-Lardy & P Meerts. 2008. Relationships between C respiration and fine particulate organic matter (250-50 µm) weight. *Eur. J. Soil Biol.* 44: 18-21.
- Kruger, H. 1996. Compactación en Haplustoles del Sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del suelo* 14: 104-106.

- Kruger, H; R Agamennoni & M Ripoll. 2005. Siembra Directa de trigo en el Sur de la Región Semiárida Pampeana. Boletín Técnico N° 14. EEA H. Ascasubi-INTA. 14 pág.
- Krupinsky, J; S Merrill; D Tamaka; M Liebig; M Lares & J Hanson. 2007. Crop residue coverage of soil influenced by crop sequence in a no-till system. *Agron. J.* 99: 921-930.
- Kutílek, M. 2004. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res.* 79: 175-184.
- Lal, R. 2000. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century. *Soil Sci.* 165: 192-207.
- Lal, R. 2003. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Crit. Rev. Plant Sci.* 22: 151–184.
- Lal, R; D Reicosky & J Hanson. 2007. Editorial: Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Till. Res.* 93: 1-12.
- Lampurlanés, J & C Cantero-Martínez. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron. J.* 95: 526-536.
- Lapen, D; G Topp; M Edwards; E Gregorich & W Curnoe. 2004. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration–water content relationships in tillage research. *Soil Till. Res.* 79: 51-62.
- Larson W & F Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. Pp. 37-51. In: Doran, JW; DC Coleman; DF Bezdieck & BA Stewart (Ed.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- Lattanzi, A; H Marelli; O Signorile; J Aragón & S Distefano. 2004. La siembra directa: presente y futuro. Información recopilada para INTA Expone 2004 en la Pampa Húmeda.
- Leguía, H; E Alessandria; J Sánchez; J Zamar; L Pietrarelli & M Arborno. 2008. Recuperación del suelo: prácticas agroecológicas en sistemas agrícolas extensivos de Córdoba, Argentina. *LEISA. Revista de Agroecología* 24(2): 17-20.
- Lipiec, J; I Hakansson; S Tarkiewicz & J Kassowski. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Till. Res.* 19: 307-317.
- López, F; M Duval; J Martínez & J Galantini. 2014. Cobertura en el sudoeste bonaerense en suelos bajo siembra directa. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Actas en CD-R.
- Magrin, G; M Travasso & G Rodríguez. 2005. Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change* 72: 229-249.
- Mallants, D; B Mohanty; A Vervoort & J Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technol.* 10: 115-131.
- Mandolesi, M; M Ron; P Vidal & H Forján. 2002. Efectos de las rotaciones en siembra directa sobre el carbono orgánico en un suelo del centro sur bonaerense. INTA. Chacra Experimental Integrada Barrow.
- Martens, D. 2001. Nitrogen cycling under different soil management systems. *Adv. Agron.* 70: 143–192.
- Martínez, E; J Fuentes; V Pino; P Silva & E Acevedo. 2013a. Chemical and biological properties as affected by no-tillage and conventional tillage systems in an irrigated Haploxeroll of Central Chile. *Soil Till. Res.* 126: 238–245.
- Martínez, J; M Landriscini & J Galantini. 2013b. Eficiencia del uso del nitrógeno y del agua para trigo en suelos del Sudoeste Bonaerense. Pp. 35-43. En: *Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en los ambientes frágiles del S y SO Bonaerense.* Galantini, J (Ed.). CIC, UNS, CERZOS-CONICET, AAPRESID. 121 pág.
- Martino, D. 2001. Secuestro de carbono atmosférico: ¿un nuevo ingreso para los agricultores del Cono Sur? Pp. 55-66. En: Díaz Rossello, R (Coordinador). *Siembra Directa en el Cono Sur.* PROCISUR. Montevideo.

- Matus, F & C Maire. 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agric. Téc.* 60: 112-126.
- McVay, K; D Radeliffe & W Hargrove. 1989. Winter legumes effects on soil properties and nitrogen fertilizer requirements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1856-1862.
- Mc Vay, K; J Budde; K Fabrizzi; M Mikha; C Rice; A Schlegel; D Peterson; D Sweeney & C Thompson. 2006. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 434-438.
- Mele, P & M Carter. 1993. Effect of climatic factors on the use of microbial biomass as an indicator of changes in soil organic matter. Pp. 57-63. In: Mulongoy, K & R Merckx (Ed.). *Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Merrill, S; J Krupinsky; L Tanaka & R Anderson. 2006. Soil coverage by residue as affected by ten crop species under no-till in the northern Great Plains. *Soil Water Cons. Soc.* 61:7-13.
- Micucci, F & M Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max Merrill*) root abundance in conventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86:152-162.
- Micucci, F; K Álvarez; C Bustingorri & M Taboada. 2006. Estimación de la compactabilidad de los suelos pampeanos a partir de variables de fácil determinación. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta. Actas en CD-R.
- Micucci, F; C Álvarez; C Bustingorri & M Taboada. 2008. Funciones de edafotransferencia para estimar la compactabilidad de suelos pampeanos. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Actas en CD-R.
- Migliarina, A; J Iglesias; M Landriscini; J Galantini & R Rosell. 2000. The effects of crop rotations and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil Till. Res.* 53: 129-135.
- Millán, G; M Vásquez; A Terminiello & D Santos Sbuscio. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 28: 131-140.
- Morrás, H; B Bonel & R Michelena. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Actas en CD-R.
- Needelman, B; M Wander; G Bollero; C Boast; G Sims & D Bullock. 1999. Interaction of tillage and soil texture: biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1326-1334.
- Nelson, D & L Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 961-1010. In: Sparks, D *et al.* (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 3*. SSSA. Book Series 5. SSSA and ASA, Madison, WI.
- Noellemeyer, E; A Quiroga & D Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *J. Arid Env.* 65: 142-155.
- Norfleet, M; C Dizler; W Puckett; R Grossman & J Shau. 2003. Soil quality and its relationship to pedology. *Soil Sci.* 168: 149-155.
- Olivera, Y; M Robertson & C Weeks. 2010. A new look at an old practice: Benefits from soil water accumulation in long fallows under Mediterranean conditions. *Agric. Water Manag.* 98: 291 - 300.
- O'Donovan, J; D McAndrew & A Thomas. 1997. Tillage and nitrogen influence weed population dynamics in barley (*Hordeum vulgare L.*). *Weed Technol.* 11: 502-509.
- O' Sullivan, M; J Dickson & D Campbell. 1987. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *Eur. J. Soil Sci.* 38: 137-148.
- Passioura, J. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant Cell Environ.* 25: 311-318.
- Paustian, K; H Collins & E Paul. 1997. Management controls on soil carbon. Pp. 15-49. In: Paul, E; K Paustian; E Elliot & C Cole (Ed). *Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North America*. CRC Press Lewis Publishers, div. of CRC Press, Boca Raton, Florida.

- Pecorari, C; J Guerif & P Stengel. 1990. Fitolitos en suelos pampeanos: Influencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8: 135-141.
- Picone, L; I Capozzi; E Zamuner; H Echeverría & H Sainz Rosas. 2007. Transformaciones de fósforo en un Molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Ciencia del Suelo* 25: 99-107.
- Pidgeon, J & B Soane. 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley monoculture system. *J. Agric. Sci. Camb.* 88(2): 431-442.
- Pilatti, M & J de Orellana. 2000. The ideal soil: II Critical values of an "ideal soil" for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *J. Sust. Agricult.* 17: 89-111.
- Pieri, C. 1995. Long-term soil management experiments in semi-arid Francophone Africa. In: Lal, R & B Stewart (Ed.). *Soil Management: experimental basis for sustainability and environmental quality*. Lewis Publishers/CRC. Florida, USA. 266 pág.
- Porter, K; O Jones; H Torbert & P Unger. 1997. Crop rotation and tillage effects on organic carbon sequestration in the semiarid southern Great Plains. *Soil Sci.* 162: 140-147.
- Power, J; W Wilhelm & J Doran. 1983. Recovery fertilizer nitrogen by wheat as affected by fallow method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1449-1503.
- Power, J & J Doran. 1988. Role of crop residue management in nitrogen cycling and use. Pp. 101-113. In: Hargrove, WL. (Ed.). *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. ASA Special Publication N° 51. Am. Soc. of Agron. Inc.; Crop Science Soc. of Am., Inc.; Soil Science Society of America, Inc.; Madison, Wisconsin, EEUU.
- Power, J. 1990. Legumes in crop rotations. Pp 178-204. In Francis, CA; CB Flora & LD King (Ed.). *Sustainable agriculture in temperate zones*. J. Wiley & Sons, New York, EEUU.
- Puget, P & L Drinkwater. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 771-779.
- Puget, P & R Lal. 2005. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil Till. Res.* 80: 201-213.
- Quiroga, A. 1994. Influencia del manejo sobre las propiedades físicas de los suelos. Su relación con la granulometría y contenido de materia orgánica. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. UNS, Bahía Blanca, Argentina. 145 pág.
- Quiroga, A; DE Buschiazzo & N Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinean pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Quiroga, A; O Ormeño & N Peinemann. 1998a. Efectos de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos. Pp. 57-63. En: Panigatti; JL; H Marelli; D Buschiazzo y R Gil (Ed.). *Siembra Directa, SAGPyA-INTA. Edic. Hemisferio Sur*, Bs. As. 333 pág.
- Quiroga, A; D Buschiazzo & N Peinemann. 1998b. Management discriminant properties in semiarid soils. *Soil Sci.* 163: 591-597.
- Quiroga, A; D Buschiazzo & N Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Till. Res.* 52: 21-28.
- Quiroga, A; M Díaz-Zorita & D Buschiazzo. 2001. Sunflower productivity as related to soil water storage and management practices in semiarid regions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 2851-2862.
- Quiroga, A. 2002. Indicadores de calidad de suelos en Molisoles de la región semiárida pampeana. Relación con el manejo y productividad de los cultivos. Tesis Doctoral. UNS, Bahía Blanca, Argentina.
- Quiroga, A; R Fernández & D Funaro. 2005. Materia orgánica en Molisoles de la región semiárida pampeana. Influencia sobre propiedades físicas y productividad. Jornadas Nacionales "Materia orgánica y sustancias húmicas". Bahía Blanca, Bs. As.
- Quiroga, A; D Funaro; E Noellemeyer & N Peinemann. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 90: 63-68.

- Quiroga, A; R Fernández; D Funaro & N Peinemann. 2008. Materia orgánica en Molisoles de la región semiárida pampeana. Influencia sobre propiedades físicas y productividad. Pp. 97-116. En: Galantini, J (Ed.). Estudio de las Fracciones Orgánicas en Suelos de Argentina. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Radford, B; B Bridge; R Davis; D McGarry; U Pillai; J Rickman; P Walsh & D Yule. 2000. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. *Soil Till. Res.* 54: 155-170.
- Rasmussen, K & M Arshad. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality. Special issue: tillage and soil quality. *Soil Till. Res.* 53: 3-14.
- Rasmussen, K. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil Till. Res.* 53: 3-14.
- Revelli, G; R Gagliardi; O Sbodio & E Tercero. 2010. Propiedades fisicoquímicas en suelos predominantes del noroeste de Santa Fe y sur de Santiago del Estero, Argentina. *Ciencia del Suelo* 28: 123-130.
- Reynolds, W; C Drury; X Yang; C Fox; C Tan & T Zhang. 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Till. Res.* 96: 316-330.
- Riedell, W; T Schumacher; S Clay; M Ellsbury; M Pravecek & PD Evenson. 1998. Corn and soil fertility responses to crop rotation with low, medium, or high inputs. *Crop Sci.* 38: 427-433.
- Rivero, E & G Cruzate. 2008. Materia orgánica, nitrógeno y fósforo: Mapas de contenido y disponibilidad en distintos suelos de la Republica Argentina. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Actas en CD-R.
- Rossi, S; A Rollán & O Bachmeier. 2008. Adsorción de fósforo en suelos de la región pampeana argentina. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Actas en CD-R.
- Roldán, M; G Studdert; C Videla; L Picone & S San Martino. 2012. Fracciones de carbono orgánico por tamaños de agregados en dos suelos bajo manejos contrastantes. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Actas en CD-R.
- Rotenberg, D; A Wells; E Chapman; A Whitfield; R Goodman & L Cooperby. 2007. Soil properties associated with organic matter-mediated suppression of bean root rot in field soil amended with fresh and composted paper mill residuals. *Soil Biol. Biochem.* 39: 2936-2948.
- Ruffo, M & A Parsons. 2004. Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *Informaciones agronómicas del Cono Sur* 21: 13-20.
- Rydberg, T; G Gustafson & W Boonstra. 2007. Farming in prosperous way down- a systems ecology approach. In: Brown, MT (Ed). *Emergy Synthesis: Theory and applications of the emergy methodology*. Proceedings of a conference held at Gainesville, FL, September 1999. The Center for Environmental Policy, University of Florida. Gainesville. EEUU.
- Sagardoy, M; H Gómez; F Montero; C Zoratti & A Quiroga. 2001. Influencia del sistema de siembra directa sobre los microorganismos del suelo. En: Panigatti; J; D Buschiazzi & H Marelli (Ed.). *Siembra Directa II*. INTA. Bs. As. Argentina. 377 pp.
- Saldungaray, M; Adúriz, M & V Conti. 2012. Caracterización del sector agropecuario de los partidos de Bahía Blanca y Coronel Rosales. Informe elaborado por docentes de las asignaturas Gestión y Extensión Agropecuaria y Economía de la Empresa Agropecuaria. Depto. de Agronomía-UNS.
- Sánchez, M; O Heredia; N Bartoloni; C González & N Arrigo. 2006. Secuencias de cultivos y rotaciones: efectos en las fracciones de carbono del suelo. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy. Actas en CD-R.
- Sasal, M; A Andriulo & M Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Sasal, M; M Castiglioni & M Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.

- Schmidt, E; N Amiotti & O Bravo. 2008. Comportamiento de indicadores químicos y biológicos de calidad de suelos bajo labranza reducida y siembra directa continua en la región semiárida sur. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Actas en CD-R.
- Schmidt, E; M Villamil & N Amiotti. 2013. Effects of no-till and reduced tillage on soil physical and biochemical properties in the semiarid pampean region, Argentina. ASA, CSSA & SSSA International Annual Meetings, Florida.  
<http://scisoc.confex.com/scisoc/2013am/webprogram/Paper80408.html>.
- Schoeneberger, P; D Wysocki; E Benham & W Broderson (Ed). 2002. Field Book for describing and sampling soils. Version 2.0. NRCS, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Scian, B. 2010. Capítulo I: Clima- Bahía Blanca y Sudoeste Bonaerense. Pp. 27-67. En: Paoloni, JD (Compilador). Ambientes y Recursos Naturales del Partido de Bahía Blanca: Clima, Geomorfología, Suelos y Aguas (Sudoeste de la provincia de Bs. As.). 1º Edición Bahía Blanca, Universidad Nacional del Sur, EdiUNS. 240 pág.
- Selles, F; B Mc Conkey & C Campbell. 1999. Distribution and forms of P under cultivator and zero tillage for continuous and fallow-wheat cropping systems in the semiarid Canadian prairies. Soil Till. Res. 51: 47-59.
- Shukla, M; R Lal & M Ebingerb. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. Soil Till. Res. 87: 194-204.
- Silenzi, J; A Moreno & L Lucero. 1987. Variaciones temporales de la estabilidad estructural de un suelo no disturbado. Ciencia del Suelo 5:1-7.
- Soil Science Society of America. 1994. Chapter 38: Carbon mineralization. Pp 835-863. In: Methods of Soil Analysis. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties.
- Soane, B & C van Ouwerkerk. 1994. Soil compaction problems in World agriculture. Pp 1-21. In: Soane, B & C vanOuwerkerk (Ed.). Soil Compaction in Crop Production. Elsevier Science.
- Soane, B. 1990. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. Soil Till. Res. 16: 179-201.
- Soil Science Society of America. 1996. Glossary of Soil Science Terms. Madison, WI, USA.
- Soil Survey Staff - USDA. 2010. Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. USDA-NRCS, Washington, DC.
- Soracco, C; L Lozano; G Sarli; P Gelati & R Filgueira. 2010. Anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. Soil Till. Res. 109: 18-22.
- Steinbach, H & R Álvarez. 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? Informaciones Agronómicas del Cono Sur (INPOFOS). 33: 7-12.
- Stengel, P; J Douglas; J Guerif; R Goss; R Monnier & R Cannel. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drill. Soil Till. Res. 4: 35-53.
- Strudley, M; T Green & J Ascough II. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. Soil Till. Res. 99: 4-48.
- Studdert, G & H Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1496-1503.
- Studdert, G; L Carabaca & H Echeverría. 2000. Estimación del nitrógeno mineralizado para un cultivo de trigo en distintas secuencias de cultivos. Ciencia del Suelo 18: 17-27.
- Studdert, G & H Echeverría. 2002. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn. Actas en CD-R.
- Studdert, G; G Domínguez; M Eiza; C Videla & HE Echeverría. 2005. La fracción particulada de la materia orgánica y su relación con la fertilidad nitrogenada en el sudeste bonaerense. Jornadas Nacionales "Materia orgánica y sustancias húmicas". Bahía Blanca, Bs. As.

- Suñer, L; J Galantini & R Rosell. 1999. Formas de fósforo y su relación con la textura en suelos de la región semiárida argentina. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile.
- Suñer, L; J Galantini; C Franco & R Rosell. 2004. Evolución del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Entre Ríos. Actas en CD-R.
- Suñer, L; J Galantini; P Varela & R Rosell. 2007. Estratificación de las formas de fósforo en siembra directa y su relación con la disponibilidad para los cultivos. Pp. 28-31. En: Galantini, J (Ed.). La siembra directa en los sistemas productivos del sur y sudoeste bonaerense. AAPRESID.
- Suñer, L & J Galantini. 2013. Importancia del equilibrio de las formas de fósforo edáfico. Pp. 67-73. En: Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en los ambientes frágiles del S y SO Bonaerense. Galantini, J (Ed.). CIC, UNS, CERZOS-CONICET, AAPRESID. 121 pág.
- Taboada, M; F Micucci; D Cosentino & R Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* 49: 57-63.
- Taboada, M & F Micucci. 2002a. Respuesta de raíces de soja a impedancias en Molisoles y Vertisoles bajo labranza convencional y siembra directa. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn. Actas en CD-R.
- Taboada, M & F Micucci. 2002b. Fertilidad física de los suelos. Facultad de Agronomía - Universidad de Bs. As. (Ed.). Argentina.
- Taboada, M; O Barbosa & D Cosentino. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
- Tisdale, S; W Nelson; J Beaton & J Havlin. 1993. *Soil fertility and fertilizers*. 5 ed. Macmillan Pub. Co., New York, EEUU.
- Tisdall, J & J Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil. Sci.* 33: 141-163.
- Utomo, W & A Dexter. 1981. Age hardening of agricultural top soils. *J. Soil Sci.* 32: 335-350.
- Van der Bygaart, A; R Protz & A Tomlin. 1999. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 79: 149-160.
- Van Veen, J; J Ladd & M Amato. 1985. Turnover of carbon and nitrogen through the microbial biomass in a sandy soil and a clay soil incubated with [<sup>14</sup>C(U)] glucose and [<sup>15</sup>N] (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> under different moisture regimes. *Soil Biol. Biochem.* 17:747-756.
- Van Veen, J & P Kuikman. 1990. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochem.* 11: 213-233.
- Vidal, C & J Costa. 2000. Evaluación de algunas propiedades físicas en sistemas de labranza reducida y siembra directa. *RIA* 29 (1): 61-68.
- Viglizzo, E & E Jobbágy (Ed.). 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Ediciones INTA, Bs. As. 102 pp.
- Villamil, M; F Miguez & G Bollero. 2008. Multivariate analysis and visualization of soil quality data for no-till systems. *J. Environmental Quality* 37: 2063-2069.
- Vomocil, J & W Flocker. 1961. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 4: 242-246.
- Wagner, L; N Ambe & D Ding. 1994. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 37: 1121-1125.
- Walley, F; T Yates; J van Groenigen & C van Kessel. 2002. Relationship between soil nitrogen availability indices, yield, and nitrogen accumulation of wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1549-1561.

- Wander, M. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. Pp 67-102. In: Magdoff, F & RR Weil (Ed.) Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press, Boca Raton, Florida, EUA.
- Wander, M & G Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 961-971.
- Weil, R & F Magdoff. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. Pp 1-43. In: Magdoff, F & RR Weil. (Ed.). Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture. CRC Press, Boca Raton, Fl., USA.
- West, T & W Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. Soil Sci. Soc. Am. J 66: 1930–1946.
- Whalley, W; R Dumitru & AR Dexter. 1995. Biological effects of soil compaction. Soil Till. Res. 35: 53-68.
- Wicks, G. 1997. Survival of downy brome (*Bromus tectorum*) seed in four environments. Weed Sci. 45: 225–228.
- Yin, C; K Jones; D Peterson; K Garrett; S Hulbert & T Paulitz. 2010. Members of soil bacterial communities sensitive to tillage and crop rotation. Soil Biol. Biochem. 42: 2111-2118.
- Yiridoe, E; T Vyn; A Weersink; D Hooker & C Swanton. 2000. Farm-level profitability analysis of alternative tillage systems on clay soils. Can. J. Plant Sci. 80: 65–73.
- Zamuner, E; L Picone & H Echeverría. 2008. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. Soil Till. Res. 99: 131-138.
- Zhang, H; K Hartge & H Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 239-245.