



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Magíster en Ciencias Agrarias

ROBERTO JÜRGEN KIESSLING

**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**

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2012



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Magíster en Ciencias Agrarias

ROBERTO JÜRGEN KIESSLING

**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**

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2012

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Magíster 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 LAHBIS, Departamento de Agronomía, y Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS, UNS-CONICET), durante el período comprendido entre el 13 de mayo de 2008 y el 09 de agosto de 2012, bajo la dirección de Dr Juan Alberto Galantini, Investigador Independiente de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) y docente del posgrado del Departamento de Agronomía.

Roberto Jürgen Kiessling

D.N.I. 24.336.565

Departamento de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Agradecimientos

- ✚ Al Dr Juan A. Galantini por su creatividad, amistad y apoyo permanente que posibilitaron la realización de esta tesis.

- ✚ A la Ing. Agr. Ms Sc. María de las Mercedes Ron por su invaluable apoyo.

- ✚ A la Bqca. Ms Sc Ana María Miglierina por sus enriquecedores consejos.

- ✚ Al Ing. Agr. Julio O. Iglesias por su compañerismo y la constante ayuda que me brindó en el estudio de la física del suelo.

- ✚ A mis compañeros del Laboratorio de Humus y Biodinámica del Suelo: Ing. Agr. María Rosa Landriscini, Gabriela Minoldo, Rodrigo Fernández, Lic. Liliana Suñer y la Dra. Graciela Zanini.

- ✚ A mis compañeros del LANAIS N¹⁵ Lic. Juan Carlos Gasparoni, Lic. Alejandra Barrios, Cecilia Costantino y Luciano Baraldi.

- ✚ A la Estación Experimental Bordenave del INTA, en especial al Dr. Hugo Krüger, que nos permitió trabajar sobre sus ensayos de labranzas.

- ✚ A la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), institución que me otorgó la beca para llevar adelante el estudio.

- ✚ A mis padres, Juan y Erica, quienes posibilitaron mi desarrollo personal.

Dedico esta tesis a mi familia.

RESUMEN

La frecuencia, intensidad y tipo de labranza afectan las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos. Estos cambios pueden reflejarse en la disponibilidad de nutrientes, la producción de cultivos y, más tardíamente, en la sustentabilidad del sistema productivo. Los objetivos de este trabajo fueron, en un Haplustol éntico con distintos sistemas de labranza: 1) Determinar el contenido, distribución y calidad de las fracciones orgánicas en los 20 cm superficiales del suelo. 2) Evaluar el contenido y la distribución de las diferentes formas de P edáfico. 3) Monitorear la distribución del espacio poroso, así como su relación con los contenidos de las diferentes fracciones orgánicas. 4) Determinar los cambios en la distribución del espacio poroso en suelos con pastoreo animal directo y comparar con lotes de producción en siembra directa (SD) de la región. Se utilizó un ensayo de sistemas de labranza de la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave del INTA, con un diseño experimental formado por 4 bloques completos aleatorizados, con sistema de labranza (labranza convencional, LC, vertical, LV, y SD) y dosis de fertilización (30 y 60 kg N ha⁻¹) dispuestos como factores principales, y manejo ganadero (pastoreo directo y no pastoreo) como tercer factor. Se analizaron el carbono orgánico total (COT), particulado (COP) y asociado a la fracción mineral (COM), las formas orgánicas (Po), inorgánicas (Pi) y extractable (Pe) del fósforo (P), así como la densidad aparente (DA), la porosidad total (PT) y la distribución de los diferentes tamaños de poros. No se observaron diferencias en COT, COP y COM entre sistemas de labranza en los 0-20 cm, aunque sí un cambio en la distribución. La SD acumuló los residuos de los cultivos en superficie, provocando un aumento de las tres fracciones orgánicas en los 0-5 cm respecto a LC y LV. Por debajo, se observó un aumento del COP y COT en los 5-10 cm en LC, y en los 15-20 cm en LV, asociado también a la profundidad de incorporación de los residuos. El aumento en la dosis de fertilización con N provocó un

VIII

aumento de la fracción más lábil, COP, en la capa superficial del suelo. Respecto al P en el suelo, el efecto más notorio entre los distintos sistemas de labranza fue la estratificación que se produjo en SD. Todas las formas de P fueron mayores en superficie que en profundidad, mientras que en LC la distribución fue más uniforme en los 0-20 cm. Las diferencias entre sistemas de labranza en los 0-20 cm se observaron en el Po de la fracción gruesa, que fue significativamente mayor en SD que LC. El contenido de P en la fracción gruesa fue más sensible para detectar los cambios de corto plazo, mostrando diferencias en el Po y en el Pi relacionadas con la cantidad de residuos aportados al suelo, revelando que existe una rápida mineralización de las formas orgánicas del P en esta fracción del suelo. Cuando se estudio el impacto del pisoteo animal sobre la porosidad del suelo, el mismo provocó un aumento en la DA y disminución de la PT mayor en LC que en SD, asociado principalmente a una mayor pérdida de macroporosidad. Otro efecto del pisoteo fue el aumento relativo de la cantidad de microporos en LC, mientras que en SD no hubo cambios. En ningún caso la DA alcanzó niveles críticos como para el desarrollo del sistema radical, por lo que se concluyó que es factible la inclusión de la ganadería en SD, bajo las condiciones ensayadas. Al relacionar los parámetros físicos estudiados con las fracciones orgánicas en el suelo, se observó que el COP resultó la fracción que mejor se relacionó con la PT del suelo, y que los macroporos resultaron ser más sensibles a los cambios de todas las fracciones de C, siendo el COP el que explicó mejor dichas variaciones. Estas relaciones fueron más marcadas en SD que en LC, debido a que las labranzas generan aumentos en la porosidad *per se*. Los sistemas de labranza no produjeron cambios significativos en el contenido de las fracciones orgánicas, pero si en la distribución y dinámica. El pastoreo modificó la macroporosidad, la cual fue regenerada naturalmente bajo SD y reestablecida por las labranzas bajo LC. En este ultimo sistema de labranza, los cambios fueron más marcados y existió una dependencia del laboreo mecánico.

SUMMARY

Tillage frequency and intensity affect soil chemical, physical and biological properties. These changes can be reflected in nutrient availability, crop production and therefore in the sustainability of the productive systems. The aim of this work was to study the effect of tillage systems in an Entic Haplustol with different systems from farming: Specific objectives were: 1) to determine the content, distribution and quality of the organic fractions in the top 20 cm of the soil. 2) to evaluate the content and the distribution of different forms of soil phosphorus. 3) To monitor the distribution of the soil pore space as well as its relation with the contents of the different organic fractions. 4) To determine changes in pore size distribution under direct grazing and to compare this distribution with that in productive fields of the region under no-till. A field experiment carried out in Bordenave Experimental Station (INTA) was used. The design was of 4 randomized complete blocks. Main factors were a) tillage systems: no till (SD), conventional (LC) and vertical tillage (LV), and b) nitrogen fertilization rates (30 and 60 kg N ha⁻¹). The third factor was livestock grazing (direct and check). Analytical determinations included total organic carbon (COT); particulate organic carbon (COP) and organic carbon associated to the mineral fraction (COM), organic (Po), inorganic (Pi) and extractable (Pe) phosphorus (P), bulk density (DA), total porosity (PT) and pore size distribution. Although no differences in COT, COP and COM were found between tillage systems, the vertical distribution of these variables was affected. SD accumulated crop residues on the surface, causing an increase of the three organic fractions in the 0-5 cm layer with respect to LC and LV. Underneath, an increase of COP and COT in the 5-10 cm in LC, and in the 15-20 cm in LV was observed. This was associated to the depth of residue incorporation. N fertilization increased the labile organic carbon fraction (COP) in the topsoil. With respect to soil P, the most evident difference among tillage systems was the stratification of all forms of soil P that takes place under SD,

whereas under LC the distribution was more uniform in the 0-20 cm Po in the coarse fraction (0-20 cm) was significantly greater in SD than LC. This variable was more sensitive to detect short term changes Po and Pi in the coarse fraction was related to the amount of residues contributed to the soil, revealing that there is a fast mineralization of P organic forms in this fraction. As regards the effect of cattle treading on soil porosity, it caused an increase in DA and a decrease of PT, which was greater in LC than in SD and was mainly associated to a greater loss of macroporosity. Another effect of treading was that it increased the amount of micropores in LC, whereas in SD there were no changes. In no case did DA reach critical levels that could affect the development of the root system. Therefore, it was concluded that it is feasible to include cattle in SD under the experimental conditions. When the physical parameters were related to the soil organic fractions in the ground, it was found that COP was the variable which was better related to PT. Also, the macropores turned out to be more sensitive to the changes of carbon fractions C, being COP the one that better explained these variations. These relations are stronger in SD than in LC, because tillage generate increases in porosity *per se*. Tillage systems did not produce significant changes in the content of the organic fractions, but they affected their the distribution and dynamics. Grazing modified macroporosity, which is naturally regenerated under no-till and reestablished by tillage in LC. In the latter changes more are marked and depend on mechanical tillage.

Índice de contenidos

RESUMEN	VII
SUMMARY	IX
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Materiales y métodos	6
Sitios de estudio	6
Estudio de las propiedades químicas	9
Estudio de las propiedades físicas.....	11
Análisis estadístico.....	14
CAPÍTULO I	17
EFFECTO DEL SISTEMA DE LABRANZA Y LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL CARBONO Y EL NITRÓGENO DEL SUELO.	17
Introducción	17
Resultados y discusión.....	25
Atributos físicos utilizados para la expresión e interpretación de resultados	25
CARBONO ORGÁNICO	31
<i>En el suelo (COT)</i>	31
<i>Carbono orgánico asociado a la fracción mineral del suelo (COM)</i>	32
<i>Materia orgánica grosera (MOG)</i>	33
<i>Carbono orgánico particulado (COP)</i>	34
<i>Relación COP/COT</i>	36
NITRÓGENO	37
<i>Nitrógeno total (Nt)</i>	37
<i>Relación carbono/nitrógeno</i>	38
<i>Nitrógeno en la materia orgánica particulada (N-MOP)</i>	39
<i>Relación carbono/nitrógeno en la fracción gruesa</i>	40
CAPÍTULO II.....	43
EFFECTO DEL SISTEMA DE LABRANZA Y LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE LAS DISTINTAS FORMAS DE FÓSFORO DEL SUELO	43
Introducción	43
Resultados y discusión.....	52
<i>Potencial hidrógeno (pH)</i>	56
<i>Fósforo extraíble (Pe)</i>	56
<i>Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi) y Po+Pi</i>	60
Formas de fósforo en la fracción gruesa del suelo.....	64
<i>Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi) en la fracción gruesa del suelo y Po+Pi</i>	64
CAPÍTULO III.....	68
EFFECTO DEL PISOTEO ANIMAL SOBRE LA DINÁMICA DEL ESPACIO POROSO EN SUELOS CON DISTINTOS SISTEMAS DE LABRANZA.....	68
Introducción	68
Resultados y discusión.....	71
CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	86
Anexo I.....	104
Anexo II	105

INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción de granos es más que una forma de vida de muchos agricultores o el fundamento de importantes ingresos para muchos países: es una de las principales fuentes de alimentos para la población del mundo. Existen diferentes ideas sobre la escasez de alimentos. Algunas personas creen que la producción de alimentos se está limitando, y otros piensan que el problema es la distribución de alimentos entre la población del mundo. Con el fin de maximizar la producción mundial de alimentos es sumamente relevante optimizar el uso de los recursos necesarios para producir granos. En este sentido, es muy importante el uso eficiente de insumos renovables, tales como herbicidas, insecticidas, fungicidas, fertilizantes, semillas, etc. y los no renovables, como la tierra y los combustibles fósiles. El mal uso de cualquiera de los recursos podría generar una disminución de la eficiencia en la producción de alimentos o provocar problemas de contaminación ambiental. En el caso de los suelos, su mal uso puede derivar en la pérdida parcial o total de su capacidad productiva, cuando se producen procesos erosivos, salinización, compactación, con la consecuente disminución del potencial productivo. En este sentido, las distintas prácticas relacionadas con los sistemas de laboreo del suelo, impactan de manera distinta sobre la conservación de este recurso.

La frecuencia, intensidad y tipo de labranza afectan las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos (Rasmussen y Collins, 1991). Éstas tienen un efecto importante sobre la cantidad, calidad y distribución de la materia orgánica (MO) del suelo y de los nutrientes en la profundidad laboreada. Este cambio puede reflejarse, en la disponibilidad de nutrientes, la producción del cultivo y, por lo tanto, en la sustentabilidad del sistema productivo.

En las regiones semiáridas, las labranzas conservacionistas, y en particular la siembra directa (SD), cumplen con el objetivo de mantener una cobertura protectora para minimizar la

erosión del suelo y, principalmente, mejorar el manejo de las escasas precipitaciones mediante el aumento de la infiltración y la reducción de la evaporación del agua almacenada. La estratificación de la MO, del nitrógeno (N) y del fósforo (P) producida por la SD o la labranza reducida ha sido observada tanto en nuestro país como en el exterior (Unger, 1991; Krüger, 1996; Galantini *et al.*, 1996; Holanda *et al.*, 1998). Existe un aumento superficial de C y N mineralizables (Salinas García *et al.*, 1997), acumulación del P fácilmente disponible y modificación del pH. A su vez, ocurre una reducción del contenido de carbono orgánico (CO) en profundidad que puede afectar negativamente la diversidad microbiana del suelo, con la consiguiente reducción de procesos catalíticos desarrollados por los microorganismos (Dengens *et al.*, 2000). Estos cambios también generan serios interrogantes en cuanto a la disponibilidad de los nutrientes y a la modalidad del muestreo (Bullock, 2000).

Para el estudio de la MO del suelo frecuentemente se recurre a la separación de las formas más activas o lábiles de las más estables. Los métodos basados en diferencias de calidad y empleando principios físicos (tamaño) han permitido una visión más realista de los cambios que ocurren en el suelo (Dalal y Meyer, 1986; Christensen, 1987; Elliott y Cambardella, 1991; Bonde *et al.*, 1992, Cambardella y Elliott, 1993; Galantini, 2001).

El uso generalizado de este tipo de fraccionamiento se debe a que el impacto en el corto plazo de las diferentes prácticas agronómicas (rotación de cultivos o labranzas) sobre la MO total del suelo, es pequeño. Las diferencias se localizan fundamentalmente en las fracciones lábiles, como la biomasa microbiana y la MO particulada (MOP), que sufren cambios drásticos. Las formas lábiles de la MO han demostrado ser indicadores sensibles para detectar el efecto de las prácticas de manejo sobre la calidad de la MO (Haynes y Beare, 1996; Haynes, 2000).

La MO es la reserva de nutrientes móviles como N y S, aunque es fuente de otros elementos como el P. Éste tiene muy baja movilidad y sólo una pequeña parte del total se encuentra

disponible para las plantas (García, 2001; Giuffré, 2005). Este P disponible para las plantas en la solución del suelo, está en equilibrio con la fracción de P orgánico e inorgánico (Suñer *et al.*, 2000; Galantini, 2005). En este equilibrio, la MO tiene influencia directa e indirecta, ya que modifica las principales propiedades del suelo (Johnston, 1987; Cheshire y Mundie 1990). De particular relevancia para los ambientes semiáridos es el hecho de que un buen suministro de P se asocia con un buen desarrollo radical que genera un mayor poder de exploración del suelo en busca de nutrientes y agua. Una deficiencia de P retarda el crecimiento general de la planta (Takahashi y Anwar, 2007). En este sentido, la acumulación del P en la superficie del suelo, provocada por las aplicaciones de fertilizante entre los 3 y 5 cm de profundidad, y la no incorporación con labranzas de los rastrojos que son fuente del mismo, genera interrogantes acerca del desarrollo radical de las plantas en los sistemas productivos en SD.

Además de la relación con la disponibilidad de nutrientes, la MO del suelo tiene influencia sobre las propiedades físicas; juega un papel fundamental en la formación de los agregados, es decir, el balance entre la fase sólida y la gaseosa del suelo (Oades, 1988). Los agentes cementantes persistentes son los responsables de la formación de agregados de tamaño menor a 250 μm o microagregados (Tisdall y Oades, 1982). Por otro lado, la unión de éstos lleva a la formación de macroagregados, en los cuales se hallan involucrados agentes cementantes temporarios, compuestos de naturaleza lábil y de elevada susceptibilidad a la degradación (carbohidratos, proteínas, etc.). Es por ello que la formación de estos macroagregados se relaciona positivamente con el contenido de MOP en el suelo (Dormaar, 1983).

Se ha comprobado que las labranzas pueden provocar diferencias en la distribución del tamaño de poros (Iglesias *et al.*, 1996), lo que tiene fuerte impacto sobre la actividad de la biomasa microbiana y la disponibilidad de nutrientes, así como sobre la conductividad

hidráulica saturada y la dinámica del agua edáfica (Logsdon *et al.*, 1990; Elliott y Efetha, 1999).

Además, el aumento de la resistencia mecánica de los horizontes superficiales en SD puede disminuir el desarrollo de raíces, favoreciendo el menor consumo de agua y la menor producción de materia seca (Ferrerías *et al.*, 2000; Krüger *et al.*, 2003). El pisoteo animal en sistemas agrícola-ganaderos puede magnificar los efectos descriptos (Arranz *et al.*, 2004).

Las referencias citadas dan cuenta del interés en estudiar el efecto de los diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades químicas y físicas del suelo y su evolución en el tiempo. En nuestro país, y en la región semiárida bonaerense, esto cobra relevancia particular debido al aumento de la superficie cultivada con SD que se produjo en los últimos años.

De acuerdo con lo desarrollado en los párrafos precedentes, se plantearon las siguientes hipótesis de trabajo:

1. Las labranzas y la dosis de fertilización con N modifican el contenido, la distribución y la calidad de las fracciones orgánicas más que la cantidad de materia orgánica total.
2. La SD provoca una estratificación de los elementos poco móviles como el P, con mayores contenidos en superficie, así como la relación entre las formas orgánicas e inorgánicas del mismo, en especial en los tamaños de partícula más dinámicos.
3. El pisoteo animal afecta diferencialmente la porosidad del suelo según el sistema de labranza, modificando la cantidad y distribución de los distintos tamaños de poros.

La primer hipótesis será desarrollada en el capítulo I, la segunda en el capítulo II y la tercera en el capítulo III de esta tesis.

Para la verificación de las hipótesis planteadas se propone el siguiente objetivo general:

Estudiar el efecto de diferentes sistemas de labranza, dosis de N y pastoreo animal sobre algunas propiedades químicas y físicas de suelos del SO bonaerense, con planteos agrícola-ganadero.

Los objetivos específicos se plantean en cada capítulo de la tesis.

Materiales y métodos

Sitios de estudio

Sobre las parcelas del ensayo de sistemas de labranza, pertenecientes a la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave del INTA, Partido de Puan, Provincia de Buenos Aires ($63^{\circ} 01' 20''$ O y $37^{\circ} 51' 55''$ S), se realizaron los diferentes muestreos para estudiar los cambios en las fracciones orgánicas, las formas de P y la dinámica del espacio poroso. El sitio está ubicado en la región semiárida pampeana.

El clima es continental templado, con una temperatura media anual de 15°C . La precipitación media anual es 674 mm (1928-2007), concentrada en otoño y primavera; con una estación seca a fines del invierno y otra semiseca a mediados del verano. En el período 1998-2007, el promedio de las precipitaciones superó los valores medios históricos, alcanzando los 754 mm anuales. En la Figura 1 se observa la distribución de las precipitaciones mensuales promedio, entre 1928 y 2007, y las ocurridas en los años 2004 y 2006.

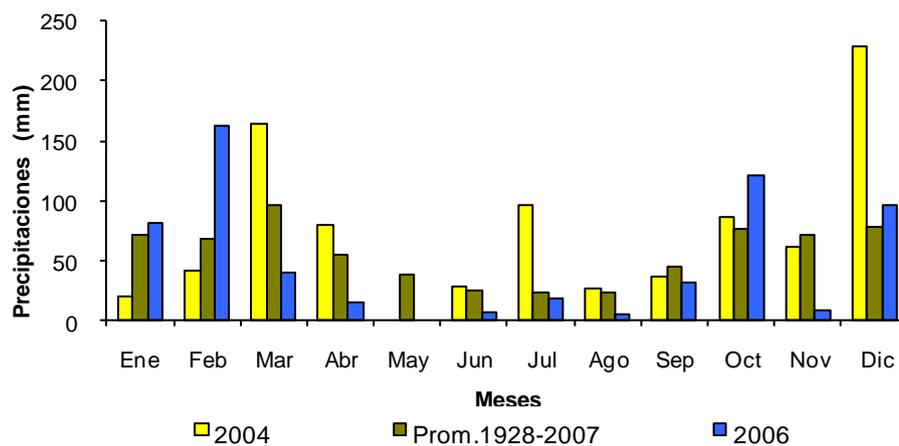


Figura 1: Distribución mensual de las precipitaciones promedio, entre 1928 y 2007, y las ocurridas en los años 2004 y 2006.

Los suelos son Haplustoles énticos, serie Darregueira, y poseen una profundidad que varía entre los 0,80 a 1,20 m, determinada por un manto calcáreo. La serie Darregueira es un suelo oscuro cuya secuencia de horizontes es: A-AC-C-2C-tosca. Es un suelo genético, presentando una capa arenosa Holocena, además es un suelo bien drenado. El horizonte A, es neutro, se extiende hasta los 25-30 cm, es de textura areno franco, y de color negro parduzco en húmedo. Cuando el suelo está seco es ligeramente duro, pero en húmedo es friable, siendo moderadamente pobre en materia orgánica. La transición hacia el horizonte AC es claro y suave. Éste es de textura franco arenoso. Le sigue un horizonte C cuyo material originario es de textura areno franco, de color pardo oscuro en húmedo (Gómez *et al.*, 1981). Las características del perfil modal se describen en la Tabla 1 del Anexo I (Gómez *et al.*, 1981).

El manejo del suelo previo a la instalación del ensayo incluyó agricultura de trigo (*Triticum aestivum*) y avena (*Avena sativa*), con ocasionales períodos de campo natural. En el período 1984-1997 se manejó con una secuencias de trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum*) y trigo (2 años x 2 años) bajo labranza con rastra de discos de tiro excéntrico, arado de cinceles, cultivador de campo o barra escardadora.

Las parcelas del ensayo de sistemas de labranzas fueron iniciadas en 1998, se llevó a cabo una rotación con mijo (*Panicum miliaceum*), trigo, avena y soja (*Glicine max*), con la siguiente secuencia: mijo (1998)- trigo (1999)- avena (2000)- trigo (2001)- avena/soja (2002)- trigo (2003)- avena/soja (2004)- trigo (2005)- avena/soja (2006).

El diseño general del ensayo (Figura 2) fue de 4 bloques divididos. En cada bloque se aleatorizaron 9 combinaciones de dos factores: **sistemas de labranza y fertilización**, con tres niveles cada uno.

Los sistemas de labranza fueron convencional (LC), vertical (LV) y siembra directa (SD). Para la LC se utilizaron arados y rastras de discos como herramientas de preparación del suelo, y a una profundidad de labor de 12-15 cm (en el 2004 la profundidad efectiva fue de

10 cm debido a la dureza del suelo a mayor profundidad por el estado seco del mismo). Para la LV se empleó arado de cincel a la profundidad de 25 cm (labor primaria). En SD se hicieron barbechos químicos previos a las siembras de los cultivos, utilizando al glifosato como principal herbicida para controlar las malezas. El momento de inicio del barbecho en relación a la siembra de los cultivos en los distintos años se resume a continuación: a) para avena, en enero (siembra en febrero); b) para soja, en octubre (siembra a mediados de noviembre), y c) para trigo, en abril (siembra en junio).

La fertilización se practicó sólo sobre el cultivo de trigo. Los niveles incluyeron a) testigo (sin agregado de fertilizante), b) fertilizado con 80 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP) y 34 kg ha⁻¹ de urea granulada (U) y c) 80 kg DAP ha⁻¹ y 99 kg ha⁻¹ de U. El DAP se aplicó a la siembra y las dosis de U, calculadas para completar una dosis total de 30 y 60 kg N ha⁻¹, se aplicaron en macollaje.

El diseño descrito anteriormente de bloques completos al azar se amplió para incluir un tercer factor en franja (*manejo ganadero*), con dos niveles: con y sin pastoreo durante el cultivo de avena.

La avena fue sembrada a una densidad aproximada de 220 plantas m⁻², en el mes de febrero.

El pastoreo directo se realizó entre los meses de mayo y octubre, según la disponibilidad de materia seca. Se realizó con animales de 300 kg de peso (vaquillonas), excepcionalmente con vacas de cría, con altas cargas instantáneas (superiores a 200 animales ha⁻¹) y la duración del mismo varió entre 6 y 8 horas. Se practicaron tres pastoreos en dicho período.

En las subparcelas sin pastoreo directo, el material vegetal fue cortado mecánicamente y retirado de las mismas, para evitar que la acumulación superficial de material vegetal muerto afecte los resultados de las variables a estudiar (sistemas de labranza, fertilización y pisoteo animal).

El tamaño de las parcelas fue de 5 x 35 metros, divididas por el manejo ganadero (Figura 2).

Estudio de las propiedades químicas

Se realizó exclusivamente en la franja sin pastorear, por lo tanto el diseño se redujo a 4 bloques completos al azar. Se incluyeron 5 de los 9 tratamientos: SD (30 y 60 kg de N ha⁻¹), LV (30 kg de N ha⁻¹) y LC (30 y 60 kg de N ha⁻¹). Se descartaron los 3 tratamientos sin fertilizante para estudiar, en los restantes, el efecto simple del suministro diferencial de N. Dada que la cantidad de parcelas y el grado de detalles planteado en las determinaciones (profundidades y variables estudiadas) superaban ampliamente las posibilidades y los requisitos de esta tesis, LV sólo se evaluó a la dosis menor de N, para poder comparar los tres sistemas de labranza.

LC	LC	LC	LV	LV	LV	SD	SD	SD
0 N	30 N	60 N	0 N	30 N	60 N	0 N	30 N	60 N
			Sin pastoreo					
			Con pastoreo					

Figura 2: Diseño general del ensayo, representado por el formato de un bloque.

Se utilizaron muestras extraídas sobre el cultivo de avena, durante el mes de octubre a las profundidades de 0-5, 5-10 y 10-15 cm, en los años 2004 y 2006. En el segundo muestreo (año 2006) se realizaron, además, extracciones a 0-1, y 15-20 cm de profundidad. En cada unidad experimental (UE) se tomaron 3 muestras compuestas (5 submuestras) que fueron analizadas en forma individual, totalizando 480 muestras para los dos años de estudio. Los resultados de las 3 muestras se promediaron para tener un dato único por UE.

Todas las muestras fueron secadas al aire y tamizadas, usando una malla de 2000 μm . Sobre ellas se determinaron:

1. Carbono orgánico (CO): método de combustión (1500°C) analizador automático LECO C Analyser, perteneciente al LANAIS-15N (CONICET-UNS, Bahía Blanca).
2. Nitrógeno total (Nt): método de Kjeldahl (Bremner, 1996).
3. pH (potenciométrico relación suelo- agua 1:2,5).
4. Fósforo extractable (Pe): método de Bray y Kurtz (1945).
5. Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi): método de Saunders y Williams (1955).

Paralelamente, se realizó el fraccionamiento por tamizado en húmedo (Galantini, 2005), obteniéndose una fracción gruesa (FG, 100-2000 μm) y una fracción fina (FF, 0-100 μm).

Sobre la fracción gruesa del suelo se determinaron:

- 1 Carbono orgánico particulado (COP): método de combustión (1500°C) analizador automático LECO C Analyser, perteneciente al LANAIS-15N (CONICET-UNS, Bahía Blanca).
- 2 Nitrógeno total particulado (N-MOP): método de Kjeldahl (Bremner, 1996).
- 3 Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi): método de Saunders y Williams (1955).

Teniendo en cuenta el porcentaje de la fracción fina, los contenidos determinados (COPd y N-MOPd) en la fracción gruesa y expresados en g kg^{-1} se refirieron al suelo entero de la siguiente forma:

$$\text{COP} = \text{COPd} \times (100 - \text{FF}) / 100$$

$$\text{N-MOP} = \text{N-MOPd} \times (100 - \text{FF}) / 100$$

donde FF es el porcentaje de la fracción fina (Galantini, 2005).

El COM se estimó por diferencia entre el COT y el COP.

Para expresar los resultados en cantidad por hectárea, sean de carbono, N o P, en el suelo o sus fracciones, se utilizaron los valores de densidad aparente obtenidos en cada profundidad.

Las cantidades en los 0-1 cm se obtuvieron utilizando la densidad en 0-5 cm.

En el año 2004 se determinó la materia orgánica grosera (MOG, Andriulo *et al.*, 1990), que corresponde al material orgánico o vegetal que no atravesó la malla de 2000 μm al momento de tamizar el suelo seco al aire. Dicho material se pesó y se expresó como porcentaje del peso total de la muestra.

Estudio de las propiedades físicas

Para evaluar el efecto del pisoteo animal sobre las propiedades físicas del suelo, se utilizaron los tratamientos SD y LC, con 30 kg de N ha^{-1} , en la franja pastoreada del diseño original (Figura 2). Se tomaron muestras no disturbadas en el cultivo de avena en dos momentos, antes y después del pastoreo directo, en las profundidades 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm (2 tratamientos, 4 bloques, 4 profundidades y 5 repeticiones por UE), durante los ciclos 2004 y 2006. Los resultados de las 5 repeticiones se promediaron para tener un dato único por UE.

Los momentos de muestreo fueron mayo y octubre, en ambos años.

El efecto acumulado del pisoteo animal en 3 ciclos de pastoreo de avena (desde el inicio del ensayo hasta mayo de 2006), se estudió ampliando el muestreo en ese momento para incluir la franja no pastoreada. De este modo se contrastaron 2 manejos ganaderos (pastoreo directo y por corte). Con este fin se tomaron muestras adicionales en las parcelas sin pastoreo directo, con el mismo método y esquema de muestreo que en las pastoreadas,

En todos los casos se extrajeron muestras sin disturbar con cilindros de acero de 5 cm de altura.

Los resultados del estudio realizado en las parcelas experimentales, en relación al efecto del pisoteo animal sobre las propiedades físicas edáficas, se compararon con los obtenidos en

lotes de producción bajo SD pertenecientes a productores que integran la regional Bahía Blanca de AAPRESID. Se seleccionaron 5 lotes pertenecientes a diferentes establecimientos en los que se desarrollaban sistemas mixtos (agrícola-ganaderos) con una antigüedad mayor a 10 años en SD. Todos se encontraban ubicados en la zona cercana a las sierras del Sistema de Ventania. Los suelos se caracterizan por tener una textura más fina (2-6% de fracción gruesa, 100-2000 μm) que los pertenecientes al ensayo de labranzas, en la EEA Bordenave (25-30% de fracción gruesa, 100-2000 μm), y son clasificados como Hapludoles. Al momento del muestreo estaban sembrados con avena para ser pastoreados directamente por animales. El muestreo de suelos se realizó en el año 2005 durante el ciclo del cultivo de avena y en dos momentos: antes (mes de abril) y después (mes de octubre) del ciclo de pastoreos. En ambas fechas, se tomaron muestras no disturbadas, a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (5 repeticiones en cada profundidad) utilizando cilindros de acero de 5 cm de altura.

La siembra de los lotes se efectuó entre los meses de febrero y marzo del 2005. El pastoreo se realizó con animales de 300 kg aproximado de peso, con cargas de 30 animales ha^{-1} y la duración del mismo fue de 7 días. Durante el ciclo se realizaron tres pastoreos en cada sitio.

Estudio del espacio poroso:

1. Determinación de la retención de humedad a diferentes tensiones (0, 33 y 1500 kPa) y realización de las curvas de retención hídrica (Richards, 1947; Klute, 1986).
2. Determinación de la densidad aparente (DA) por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986),
3. Cálculo de la porosidad total (PT) y distribución de diferentes tamaños de poros en las diferentes profundidades. El diámetro efectivo de poros capaces de retener agua a una

determinada presión se estimó a partir de la curva de retención de agua, como derivación de la ecuación de alza capilar, de la siguiente forma:

$$D = (30 \times 10^{-6}) / h \quad (\text{Hassink } et al., 1993)$$

donde:

D: diámetro efectivo de poros (expresado en metros).

30×10^{-6} : constante.

h: altura de la columna de agua (expresada en metros) que genera una presión dada.

Para la clasificación del tamaño de poros se utilizó el sistema empleado por Iglesias *et al.* (1996) y Kay y Vanden Bygaart (2002). Los mencionados autores, dividen los poros en tres clases en base a sus diferencias funcionales (macro, meso y micro poros), relacionados con el flujo de agua, con su almacenamiento y con el agua no disponible, respectivamente. Los macroporos (MP), mayores de 9 μm , son los que permiten el flujo primario de agua durante la infiltración y el drenaje, por lo tanto con mayor control sobre la aireación del suelo. Los mesoporos (mP) poseen un diámetro equivalente entre 9 y 0,2 μm correspondiendo a los límites de Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Ellos son particularmente importantes para el almacenamiento de agua. Aquellos poros con diámetro equivalente menor a 0,2 μm son los microporos (μP) y se caracterizan por retener el agua en forma no disponible para las plantas.

Análisis estadístico

Análisis de la varianza (ANOVA) y comparación de medias

Estudio de las propiedades químicas

Para la evaluación de las propiedades químicas en las profundidades de 0-1 y 15-20 cm, sólo extraídas en el año 2006, el modelo estadístico aplicado fue de 4 bloques completos al azar porque se muestreo sólo la franja no pastoreada en cada bloque (Figura 2). A diferencia del diseño de tratamientos original, las 5 combinaciones seleccionadas de los factores “sistemas de labranza” y “fertilización”, conformaron un factorial incompleto. Por lo tanto, se realizó el ANOVA para un factor.

En cuanto al estudio de las variables en las muestras extraídas a 0-5, 5-10 y 10-15 cm, en los dos años (2004 y 2006), el modelo estadístico aplicado fue de 4 bloques completos al azar, con parcela dividida para incluir la medida repetida en el tiempo. Este tipo de análisis se considera adecuado en el caso de experimentos sencillos con sólo dos repeticiones en el tiempo (Steel y Torrie, 1992).

Por lo tanto se realizó el ANOVA para dos factores: a) principal: 5 combinaciones de sistemas de labranza y fertilización y b) año de muestreo. Cuando no se registró interacción significativa año-tratamientos, los efectos de las combinaciones ensayadas se analizaron sobre el promedio de los dos años.

Para todas las profundidades se compararon grupos de tratamientos mediante contrastes ortogonales. Estos se plantearon “a priori” de acuerdo con las hipótesis a poner a prueba, reflejadas en la selección de combinaciones del diseño original. El número de contrastes realizados fue el total permitido para contrastes ortogonales. La Tabla 1 presenta los contrastes efectuados y los coeficientes empleados.

Tabla 1: Contrastes efectuados y coeficientes utilizados en las comparaciones.

Efecto	Contraste	LC30	LC60	LV30	SD30	SD60
Dosis de N	1	2	-3	2	2	-3
LV vs (LC-SD 30N)	2	1	0	-2	1	0
SD vs LC promedio de dosis	3	1	1	0	-1	-1
Interacción SL x Dosis N	4	1	-1	0	-1	1

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

En el Contraste 1 se examinó el efecto de las dosis de N. En el contraste 2 se estudió el impacto de la labranza vertical. En el contraste 3 se compararon SD y LC en un promedio de las dos dosis de N. El contraste 4 se diseñó para detectar posibles interacciones entre los sistemas de labranza más contrastantes (SD y LC) y las dosis de N. Mediante estos contrastes se calcularon efectos principales e interacciones dentro de factoriales incompletos (Petersen, 1994). El análisis se completó con la comparación individual de medias por diferencia mínima significativa de Fisher al 5%. Estas se realizaron sobre promedios de 4 observaciones (bloques) para las profundidades de 0-1 y 15-20 cm y de 8 observaciones (4 bloques x 2 años) para las profundidades restantes.

Estudio de las propiedades físicas

Para la evaluación de las propiedades físicas dentro de la franja pastoreada, el modelo estadístico aplicado fue de 4 bloques divididos. Se tomaron las medidas repetidas como dos factores en franja: según momentos del año (antes y después del pisoteo) y según año de muestreo (2004 y 2006) y se incluyeron junto con el sistema de labranza en un ANOVA triple. En el caso de interacciones significativas se realizaron ANOVA dobles y simples. Estos posibilitaron la comparación directa de las dos medias involucradas según factor, sin necesidad de recurrir a la aproximación de cuadrados medios del error. El análisis de bloque dividido se considera más preciso que el de parcela dividida para experimentos en que la

estructura de las repeticiones en el tiempo es comparativamente más compleja (Little y Hills, 1978).

Para comparación entre parcelas pastoreadas y no pastoreadas, en el tercer muestreo, el modelo estadístico aplicado fue de 4 bloques divididos, para incluir el factor manejo ganadero.

Respecto al análisis estadístico del estudio en campos de productores, se compararon las variables antes y después del pastoreo, mediante una prueba t de medias apareadas. Cada lote de producción estudiado representó una repetición. Se utilizó la prueba a una cola porque la hipótesis nula era que la densidad aparente y los macroporos son menores después del pastoreo y las otras variables se incrementan.

Análisis de regresión

También se realizaron análisis de correlación para detectar el grado de asociación de distintas variables y regresiones para describir efectos seleccionados.

Para todos los análisis estadísticos se utilizó EXCEL y el software INFOSTAT/p (Di Rienzo *et al.*, 2008).

CAPÍTULO I

EFECTO DEL SISTEMA DE LABRANZA Y NIVEL DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL CARBONO Y EL NITRÓGENO DEL SUELO.

Introducción

El calentamiento global, debido al aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO₂), constituye una gran preocupación en la actualidad. Se ha estimado que las prácticas agrícolas contribuyen con alrededor del 25 % del total de CO₂ emitido por la acción del hombre (Duxbury, 1994). En este sentido, el suelo puede actuar como fuente de emisión o como reservorio del CO₂ atmosférico. El CO₂ fijado en la biomasa vegetal, a través del proceso de fotosíntesis, puede ser almacenado en el suelo como carbono orgánico (CO) cuando los restos de plantas y animales son incorporados al suelo. Por el contrario, algunas prácticas de manejo, como la labranza, pueden aumentar la emisión de CO₂ desde el suelo debido a la ruptura de los agregados del suelo y a la oxidación de su CO (Beare *et al.*, 1994; Jastrow *et al.*, 1996). La emisión de CO₂ desde el suelo a la atmósfera es el primer mecanismo de pérdida de C del suelo (Parkin y Kaspar, 2003) y proporciona un indicador prematuro de cambios en el nivel de C del suelo (Fortin *et al.*, 1996; Grant, 1997). La reducción en las labranzas es considerada una de las prácticas más efectivas para reducir la emisión de CO₂ y secuestrar el C atmosférico, fijándolo en el suelo (Lal y Kimble, 1997; Curtin *et al.*, 2000; Al-Kaisi y Yin, 2005). La utilización de siembra directa (SD) y el aumento en la intensidad de cultivo pueden aumentar el C almacenado en el suelo (Lal *et al.*, 1995; Paustian *et al.*, 1995).

El balance entre los aportes de C al suelo y las pérdidas modifican el contenido de materia orgánica (MO) del suelo, motivo por el cual éste es quizás el indicador más importante de la calidad del suelo y puede ser estimado por medio de la cuantificación de su contenido en CO (Tisdall y Oades 1982; Rasmussen *et al.*, 1998; Six *et al.*, 1999). La concentración de CO varía considerablemente de un suelo a otro en función de su textura y del ambiente en que se desarrollaron, pudiendo ser menores que 10 g kg^{-1} en suelos de textura arenosa, o mayores a 35 g kg^{-1} en suelos de pradera (Rasmussen *et al.*, 1998; Stevenson y Cole, 1999; McVay y Rice, 2005). Los niveles de MO del suelo pueden ser expresados de diferentes maneras, siendo las más frecuentes la concentración y el contenido. La primera expresa la cantidad de MO (en peso) en relación a una cantidad de suelo, también en peso; mientras que el contenido de MO lo refiere a un volumen de suelo, para lo cual es necesario la utilización de la DA como medida de transformación (Nelson y Sommers, 1996). Debido a que los distintos sistemas de labranza pueden tener diferencias entre sus densidades aparentes (Schjonning y Rasmussen, 2000), la interpretación de resultados como concentración de MO podría conducir a conclusiones distintas a las obtenidas considerando los contenidos. Algunos autores sugieren que, para poder comparar concentraciones, el muestreo de suelo debería realizarse sobre masas equivalentes, lo que supone muestreos a distintas profundidades (Balesdent *et al.*, 2000). Sin embargo, uno de los supuestos básicos para la comparación de masas equivalentes es que el cambio de masa del suelo durante el período analizado es despreciable o semejante entre los tratamientos comparados. La diferente susceptibilidad a los procesos erosivos en SD y LC hace difícil que este supuesto se cumpla en suelos sujetos a erosión significativa (Galantini e Iglesias, 2007). Dichos autores concluyeron que la comparación de las cantidades de MO entre sistemas de labranza es una medida más realista que la comparación de masas equivalentes.

La MO en el suelo se encuentra en un continuo estado de transformación, aunque desde el punto de vista conceptual es importante fijar límites precisos. Es posible definir varios compartimentos discretos con una relación negativa entre tamaño y velocidad de descomposición (Smith *et al.*, 1998), siendo las fracciones más abundantes las que se descomponen más lentamente. La disponibilidad para los microorganismos de cada uno de estos compartimentos dependerá de su composición química, de su relación C:N, de su estado de humificación y de su posición dentro de la matriz del suelo (Goldchin *et al.*, 1995).

La necesidad de modelos conceptuales para representar la dinámica de la MO en el suelo ha impulsado a la aplicación de diferentes técnicas de fraccionamiento. En este sentido, el fraccionamiento debería ser función de las características químicas de la MO, como la composición y la reactividad, así como de los aspectos físicos asociados a su ubicación en el ambiente edáfico, su tamaño o su densidad.

El fraccionamiento implica la separación de la MO total en diferentes partes consideradas funcionalmente homogéneas en relación a sus propiedades físico-químicas y velocidad de ciclado (Galantini, 2005). Básicamente podemos clasificar los métodos de separación de la MO total en químicos, bioquímicos y físicos.

Los métodos químicos se utilizan principalmente para obtener las sustancias húmicas (SH), las que consisten en una mezcla heterogénea de compuestos que no pueden ser descritos por una molécula definida. Sin embargo, conociendo su composición y características, se puede definir una estructura general de su molécula típica, aspectos que están relacionados con su funcionalidad y reactividad en el suelo. En base a las diferencias de solubilidad en soluciones ácido-base es posible separar, al menos, las siguientes fracciones: ácido húmico (AH), ácido fúlvico (AF) y huminas (Rosell *et al.*, 1971; Schnitzer, 1982; Swift, 1996). Los AH y los AF forman complejos órgano-minerales, modificando positiva y significativamente la estabilidad de los agregados del suelo y mejorando su estructura (Piccolo y Mbagwu, 1990). La relación

AH:AF ha permitido caracterizar grandes grupos de suelos en diferentes regímenes climáticos (Kononova, 1966). Sin embargo, los métodos químicos de fraccionamiento no han demostrado ser particularmente útiles en el seguimiento de la dinámica de la MO en el suelo. Esto es debido, en parte, a su compleja naturaleza y a la enorme cantidad de compuestos orgánicos presentes en los suelos, así como a la estabilidad de las SH (Coleman *et al.*, 1989). Algunos estudios han encontrado que, utilizados en forma conjunta con métodos de fraccionamiento físico, pueden aportar información complementaria sobre aspectos estructurales y funcionales de las fracciones orgánicas en el suelo (Galantini y Rosell, 1997; Galantini *et al.*, 2002). La fracción lábil de las SH, el AF, ha sido utilizada con éxito para evaluar el efecto de diferentes manejos en suelos de la región semiárida pampeana (Galantini y Rosell, 1997; Zalba y Quiroga, 1999).

Los métodos físicos de fraccionamiento de la MO, se basan en el rol jugado por los minerales edáficos en su estabilización y ciclado. En este sentido, se los pueden considerar químicamente menos destructivos y sus resultados directamente relacionados con la estructura y función de la MO *in situ*. En los últimos años se han propuesto nuevos modelos conceptuales en los que se consideran fracciones con velocidad de transformación más rápida. Paralelamente, se comenzaron a aplicar diferentes técnicas de fraccionamiento, en especial en base a propiedades físicas, tal como tamaño o densidad, para cuantificar estos compartimentos orgánicos. El objetivo fue separar aquellas fracciones de la MO más dinámicas y más sensibles a cambios en el corto plazo debidos al sistema de producción. Las fracciones obtenidas han sido nombradas en base a las propiedades o características de fraccionamiento. Se han empleado términos como: MO joven y vieja (Janssen, 1984; Andriulo *et al.*, 1990); libre y ligada (Guerif, 2001), liviana y pesada (Janzen *et al.*, 1992), particulada (MOP) y asociada a la fracción mineral (MOM) (Elliott y Cambardella, 1991;

Cambardella y Elliott, 1993); activa, lenta y pasiva (Parton *et al.*, 1987); residuos, biomasa microbiana y MO estabilizada (Jenkinson y Rayner, 1977).

El fraccionamiento físico por tamaño de partícula, permite separar en base al tamaño, el que está asociado al grado de transformación del material orgánico en el suelo. Una completa dispersión de los agregados es un requisito indispensable para separar las partículas. Una dispersión incompleta dará sobreestimaciones de las fracciones de mayor tamaño por inclusión de agregados ricos en sustancias húmicas.

Partiendo de la muestra de suelo original, el tamizado por 2 mm permite separar los residuos mayores (restos de raíces, tallos, etc.) y que no serán incluidos en los análisis posteriores. Esta fracción ha sido denominada MO grosera (MOG, Andriulo *et al.*, 1990) y puede brindar información muy importante en casos particulares (SD, sistemas forestales, etc.). Los tamaños de separación más utilizados han sido 50 (Cambardella y Elliott, 1993), 100 (Andriulo *et al.*, 1990; Galantini *et al.*, 2002) y 200-250 μm (Amelung y Zech, 1999).

Los AH de suelos en suspensiones acuosas varían su diámetro y forma con el pH, pudiendo llegar a superar los 50 μm (Senesi *et al.*, 1996). Es decir, que los complejos órgano-minerales y los microagregados deficientemente dispersados pueden superar los 50 μm de diámetro. En estos casos, utilizar el límite de 50 μm puede ser una importante fuente de error, sobreestimando la cantidad de MOP. Por otro lado, muchos residuos orgánicos recientes pueden tener tamaño menor a 200 μm , subestimando el contenido de la MO más dinámica. El tamiz con abertura de malla de 100 μm (140 mesh) representaría un valor de equilibrio para ambos errores. El material que queda retenido en el tamiz o fracción gruesa contiene las arenas y la MO semitransformada, joven o MOP. La variabilidad natural de la MO debida a características de sitio, principalmente suelo y clima, hacen difícil la extrapolación de los resultados de los fraccionamientos (Galantini, 2001; Leifeld y Kögel-Knabner, 2005). Para comparar situaciones diferentes puede ser útil aplicar índices, tales como la relación MO

total/ fracción granulométrica <100 μm (Quiroga *et al.*, 2001) y la relación MOP/MO total (Galantini *et al.*, 2002).

La MOP presenta una relación C/N relativamente alta (Bayer *et al.*, 2002; Leifeld y Kögel-Knabner, 2005) y un reciclado más rápido que la MOM. El seguimiento de la variación del contenido de MOP, o de alguna fracción similar (ej. fracción liviana) puede dar indicios tempranos de los efectos producidos por las prácticas de manejo (Quiroga *et al.*, 1999; Fabrizzi *et al.*, 2003; Galantini y Rosell, 2006). Esta fracción de la MO cumple un importante rol en el funcionamiento del suelo al incrementar la capacidad de almacenamiento de agua, moderar o reducir la compactación (Carter, 2002), proveer a los microorganismos del suelo sustrato de rápida descomposición, y constituir un reservorio de nutrientes, principalmente N, de rápida disponibilidad para las plantas (Hevia *et al.*, 2003, Galantini *et al.*, 2007a). La alta relación encontrada entre el C y el N, y entre la MOP y el N potencialmente mineralizable (Fabrizzi *et al.*, 2003; Domínguez, 2004), como así también aquella encontrada entre la MOP y el rendimiento de los cultivos, estaría indicando que una parte importante del N mineralizable sería aportado por la MOP (Galantini *et al.*, 2002). Esto permite suponer que la MOP podría ser utilizada como un buen indicador en la predicción del N mineralizable desde el suelo, pudiendo ser utilizado en el diagnóstico de las necesidades de fertilización de los cultivos (Fabrizzi *et al.*, 2003).

La MO es uno de los componentes del suelo que más alteraciones sufre, debido a las prácticas de manejo. Las labranzas rompen los macroagregados por acción física directa y provocan la pérdida de MO por exposición de las fracciones protegidas dentro de sus estructuras y por la sobre oxigenación del suelo (Franzluebbers, 2005). En los suelos que son laboreados regularmente y con baja reposición de C, la oxidación de los compuestos orgánicos ocurre a tasas suficientemente altas, como para causar una baja en el contenido de MO y un cambio en su composición (Oades, 1984). La reducción en la intensidad de las

labranzas genera un incremento de la MO y secuestro de C (Sainju *et al.*, 2008). La adopción de SD podría reducir los efectos provocados por el laboreo, provocando aumento y acumulación de MO (Cambardela y Elliott, 1993; Galantini *et al.*, 2004) y una reducción en la tasa de mineralización del C (West y Post, 2002).

El sistema de labranza también puede influir sobre otras variables, como la temperatura y el contenido hídrico del suelo (Curtin *et al.*, 2000; Al-Kaisi y Yin, 2005), los cuales pueden afectar los flujos de C (Bajrachayra *et al.*, 2000; Parkin y Kaspar, 2003; Amos *et al.*, 2005). Por ejemplo, la remoción del suelo aumenta su desecación respecto al no labrado. Éste último tiene una temperatura menor y mayor humedad, debido a la acumulación de residuos vegetales en superficie y por el menor disturbio (Curtin *et al.*, 2000; Al-Kaisi y Yin, 2005).

El efecto más notorio al eliminar las labranzas, es la redistribución y la estratificación de la MO dentro de la capa arable. El grado de estratificación, tanto como la relación entre las diferentes fracciones orgánicas, pueden ser utilizados como indicadores de calidad del ambiente (Franzluebbers, 2002; Galantini *et al.*, 2004). Los residuos vegetales superficiales y subsuperficiales son esenciales para aumentar los contenidos de MO. En este sentido, el aumento de la intensidad de producción supone un aumento de la eficiencia de uso del agua y de la radiación solar disponible para el crecimiento. Todas las prácticas que favorezcan el desarrollo de los cultivos y el aporte de C al suelo, como la aplicación de nutrientes para optimizar el rendimiento, una rotación adecuada con cultivos diversos y de buen volumen de rastrojos, así como la inclusión de pasturas en la secuencia de cultivo, junto con la implementación del sistema de SD, favorecerán el aumento de la MO en el suelo.

En las regiones semiáridas las labranzas conservacionistas, y la SD en particular, cumplen con el objetivo de mantener una cobertura protectora para minimizar la erosión del suelo, y mejorar el manejo de las escasas precipitaciones mediante el aumento de la infiltración y por la menor evaporación del agua almacenada.

En los últimos años se ha registrado un aumento de la superficie cultivada con SD en la Región Semiárida Bonaerense. La información generada sobre el tema en los sistemas productivos del área es aún escasa y poco detallada.

Para la verificación de la hipótesis planteada para este capítulo, se proponen los siguientes objetivos:

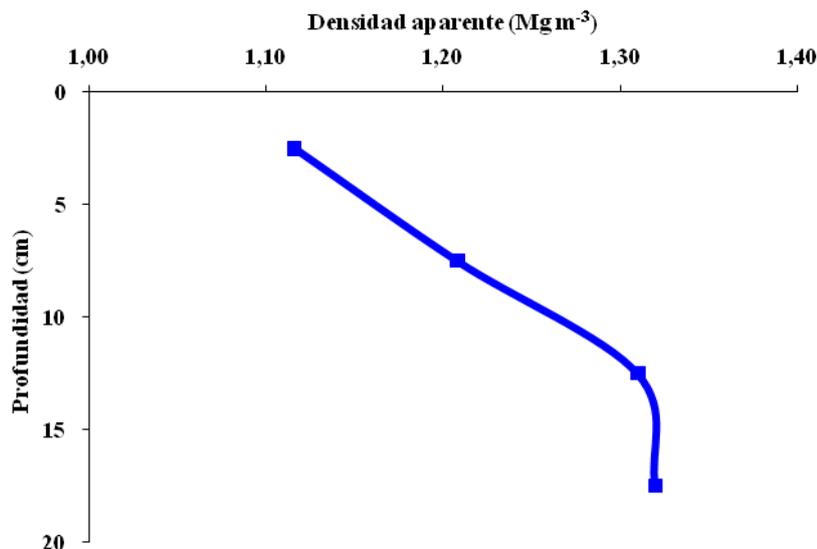
- Determinar el efecto acumulado de tres sistemas de labranza (LC, LV y SD) durante 6 y 8 años sobre el contenido, la distribución vertical y la calidad de las fracciones de C y N orgánico en los 20 cm superficiales del suelo
- Estudiar cómo la aplicación de diferentes dosis de N afectan el contenido y la dinámica del C y del N en las fracciones del suelo.

Resultados y discusión

Atributos físicos utilizados para la expresión e interpretación de resultados

La cantidad de fracción fina (FF) estuvo en un rango de 71,6 a 77,1%, sin diferencias significativas por bloques, tratamientos o años, en cada profundidad (Tablas 1 y 2, Anexo II). El promedio es aproximadamente 15% mayor que el valor máximo informado por Galantini (1994) para 27 suelos de la EEA Bordenave. La escasa dispersión de la variable en el sitio de ensayo (CV: 3,5%) indica homogeneidad textural y permite atribuir las diferencias encontradas exclusivamente a los factores ensayados.

La DA no fue limitante para el desarrollo radicular en todo el perfil estudiado (Griffith *et al.*, 1977), y presentó similar homogeneidad entre tratamientos y años, aumentando linealmente con la profundidad en el estrato de 0-15 cm (Figura 3). Esto último coincide con lo reportado por otros autores trabajando en ensayos comparativos de labranzas, que no fueron sometidos al pisoteo animal (Domínguez, 2004; Eiza *et al.*, 2005; Diovisalvi *et al.*, 2008). Sin embargo, los valores de DA, en SD fueron de 2 a 4% mayores que en LC. Dicha tendencia afecta las diferencias entre los tratamientos cuando los resultados de las variables químicas estudiadas se expresan en cantidad, versus las comparaciones expresadas en concentración. En adelante se utilizará mayormente la cantidad de la variable estudiada como forma de expresión, dado que representa una visión más realista (Galantini e Iglesias, 2007). Los resultados expresados en concentración se incluyen en el Anexo II.



Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden a los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. La profundidad 15-20 cm corresponde al muestreo realizado sólo en el año 2006.

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30 y 60: kg N ha⁻¹.

Figura 3: Densidad aparente (Mg m⁻³) en las distintas profundidades. Valores promedio de los tratamientos LC 30, LC 60, LV 30, SD 30 y SD 60. Franjas sin pisoteo animal.

Variables C y N orgánicos

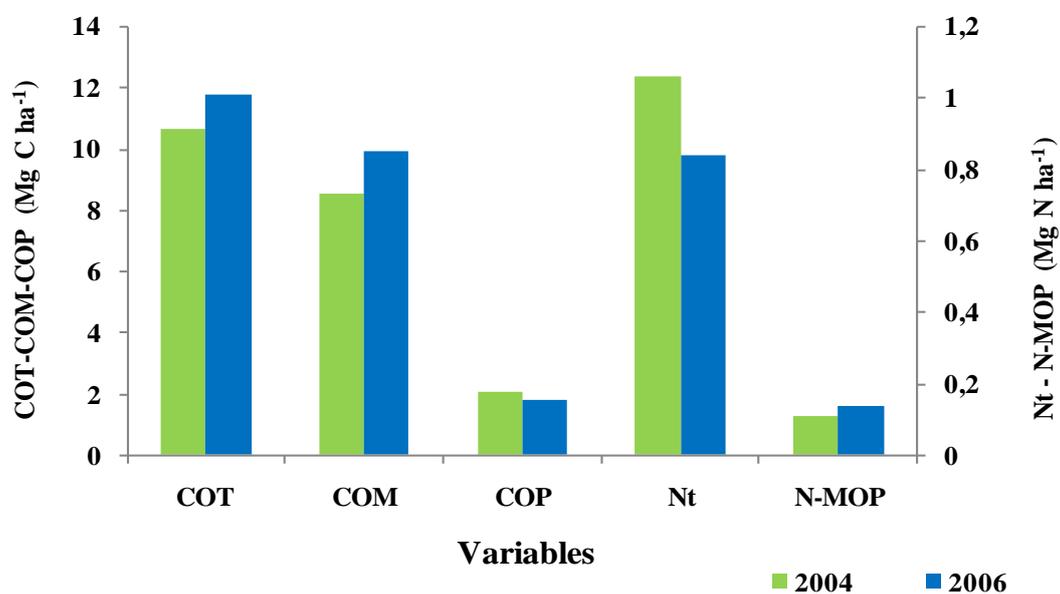
El análisis de varianza no detectó efectos significativos de la interacción entre los tratamientos y los años de estudio en ninguna variable o profundidad (Tabla 2). En el estrato más superficial, el año impactó significativamente todas las variables registrándose en 2006 valores mayores de COT, COM, N-MOP, C/N (en el suelo), y menores de COP, COP/COT, Nt, C/N (en la fracción gruesa) (Figura 4). En la profundidad 0-15 cm hubo un efecto similar a excepción del COP (Tabla 2). En 10-15 cm sólo hubo diferencias entre años para las variables de N orgánico y sus relaciones (Tabla 2). En forma similar, en 0-5 cm los tratamientos de labranza y fertilización afectaron significativamente la mayoría de las variables coincidiendo con lo informado en la bibliografía (Kern y Johnson, 1993; Franzluebbbers y Arshad, 1996; Franzluebbbers, 2002; Halvorson *et al.*, 2002b; Galantini y Rosell, 2006), mientras que en los dos estratos inferiores sólo el COP y su relación con el

COT mostraron un efecto consistente. La tendencia descrita se verificó en las profundidades adicionales ensayadas en 2006 (Tabla 2).

El carácter dinámico de las variables estudiadas se refleja en su variación intermuestreo (efecto año). Es importante destacar la incidencia del aporte de residuos de los cultivos antecesores. Mientras que el rendimiento medio del cultivo de trigo en el año 2003 (antecesor del muestreo en 2004) tuvo un promedio de 3141 kg ha^{-1} , en el año 2005 (antecesor del muestreo en 2006) el mismo fue de 1063 kg ha^{-1} (Venanzi *et al.*, 2008). El hecho de que el efecto sólo se verifique en algunas variables y profundidades sugiere que la velocidad de transformación de las fracciones orgánicas es lenta y/o muy dependiente de las variaciones meteorológicas que modifican no sólo la producción de los cultivos sino también la actividad biológica relacionada en estos procesos (Bayer *et al.*, 2005).

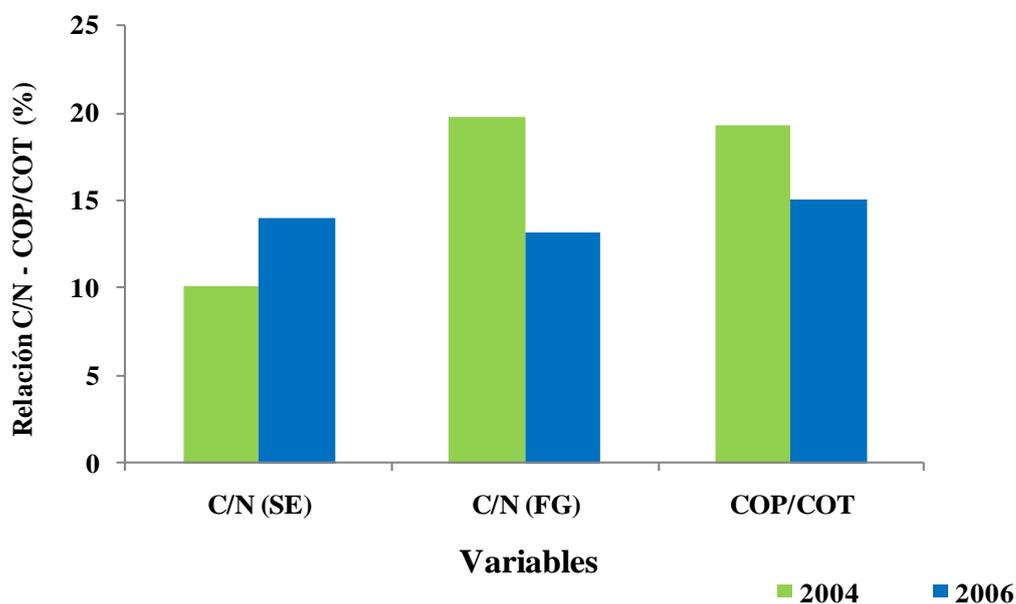
La comparación de grupos de medias reveló un escaso efecto de la dosis de N y ninguna interacción significativa de este factor con los sistemas de labranza. En cambio, el contraste entre los sistemas más disímiles (SD vs LC) fue significativo en todas las profundidades para al menos dos variables (Tabla 3). En cuanto a la LV, el bajo número de contrastes significativos, se explica por el hecho de que los valores para LV -sistema intermedio entre SD y LC- se comparan con el promedio de los dos sistemas más diferentes. Esta situación se franquea mediante la comparación de medias individuales que se en muestran en las Tablas 4 a la 12.

A)



COT: carbono orgánico total; COM: carbono orgánico asociado la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; Nt: nitrógeno total; N-MOP: nitrógeno en la materia orgánica particulada.

B)



COP/COT: relación COP/COT; C/N (SE): relación C/N en el suelo entero; C/N (FG): relación C/N en la fracción gruesa del suelo.

Figura 4: Efecto del año sobre: A) variables de C y N orgánicos en los 0-5 cm, y B) relaciones entre variables de C y N en los 0-5 cm.

A continuación se detallan los resultados de cada variable.

Tabla 2: Nivel de probabilidad para cada una de las propiedades y variables analizadas en los años y profundidades estudiadas.

	COT	COM	COP	COP/COT	Nt	N-MOP	C/N SE	C/N FG
Años 2004 y 2006 (n=8)								
Prof. 0-5 cm								
Año	<0,001	<0,001	0,042	<0,001	<0,001	0,015	<0,001	<0,001
Bloque	<0,001	<0,001	0,113	0,938	0,002	0,379	0,006	0,468
Tratamiento	<0,001	0,019	<0,001	0,001	0,005	<0,001	0,194	0,270
Tratamiento x Año	0,372	0,191	0,959	0,898	0,118	0,444	0,109	0,280
C:V_(%)	5,13	4,90	20,46	16,86	6,78	22,89	6,92	25,08
Prof. 5-10 cm								
Año	<0,001	<0,001	0,156	0,361	0,002	0,007	<0,001	0,007
Bloque	0,001	0,002	0,031	0,088	0,008	0,474	0,493	0,172
Tratamiento	0,379	0,833	0,001	<0,001	0,108	0,323	0,067	0,029
Tratamiento x Año	0,108	0,367	0,097	0,101	0,173	0,614	0,125	0,205
C:V_(%)	4,49	4,31	14,61	13,65	9,03	29,83	10,03	25,20
Prof. 10-15 cm								
Año	0,684	0,453	0,209	0,179	0,001	0,002	0,006	0,015
Bloque	0,024	0,060	0,013	0,023	0,171	0,444	0,755	0,323
Tratamiento	0,546	0,577	0,069	0,040	0,823	0,400	0,208	0,098
Tratamiento x Año	0,138	0,157	0,095	0,245	0,157	0,168	0,097	0,092
C:V_(%)	9,15	9,20	34,88	30,35	11,13	28,15	14,86	38,06
Prof. 0-15 cm								
Año	<0,001	<0,001	0,558	0,015	0,007	<0,001	<0,001	<0,001
Bloque	<0,001	<0,001	0,051	0,189	0,003	0,505	0,368	0,763
Tratamiento	0,663	0,739	0,102	0,477	0,989	0,107	0,155	0,104
Tratamiento x Año	0,214	0,097	0,107	0,076	0,429	0,181	0,455	0,141
C:V_(%)	4,07	4,38	14,20	13,27	6,94	15,56	9,34	20,83
Año 2006 (n=4)								
Prof. 0-1 cm								
Bloque	0,003	0,006	0,062	0,117	0,031	0,524	0,021	0,989
Tratamiento	<0,001	0,015	<0,001	<0,001	<0,001	0,025	0,362	0,035
C.V.(%)	6,20	5,81	22,50	15,67	17,71	13,97	9,73	10,55
Prof. 15-20 cm								
Bloque	0,094	0,096	0,160	0,114	0,002	0,190	0,803	0,009
Tratamiento	0,566	0,738	0,059	0,047	0,192	0,093	0,105	<0,001
C.V.(%)	9,37	8,61	37,13	27,52	27,46	19,22	16,45	22,34

COT: carbono orgánico total; COM: carbono orgánico asociado la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; COP/COT: relación COP/COT; Nt:nitrógeno total; N-MOP: nitrógeno en la materia orgánica particulada; C/N SE: relación C/N en el suelo entero; C/N FG: relación C/N en la fracción gruesa del suelo.

NS: no significativo ($p>0,05$)

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden a los muestreos realizados en los años 2004 y 2006 (n=8). Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006 (n=4).

Tabla 3: Significancia de los efectos sobre COT, COM, COP, COP/COT, Nt N-MOP, C/N SE y C/N FG en los contrastes planteados a priori.

Efecto	COT	COM	COP	COP/COT	Nt	N-MOP	C/N SE	C/N FG
Años 2004 y 2006 (n=8)								
Prof. 0-5 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	0,029	NS	0,006	0,045	NS	NS	NS	NS
SD vs LC	<0,001	0,026	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,033	NS
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Prof. 5-10 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SD vs LC	NS	NS	<0,001	<0,001	0,012	NS	0,018	0,003
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Prof. 10-15 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,049	NS
SD vs LC	NS	NS	0,028	0,010	NS	NS	NS	NS
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Prof. 0-15 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SD vs LC	NS	NS	NS	NS	NS	0,036	0,046	0,023
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Año 2006 (n=4)								
Prof. 0-1 cm								
Dosis de N	0,015	NS	0,046	NS	NS	0,048	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	0,004	NS	0,003	0,001	0,027	0,003	NS	NS
SD vs LC	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	0,008	<0,001	NS	0,007
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Prof. 15-20 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	NS	NS	0,008	0,006	NS	NS	NS	<0,001
SD vs LC	NS	NS	NS	NS	0,038	NS	0,043	0,015
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

COT: carbono orgánico total; COM: carbono orgánico asociado la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; COP/COT: relación COP/COT; Nt: nitrógeno total; N-MOP: nitrógeno en la materia orgánica particulada; C/N SE: relación C/N en el suelo entero; C/N FG: relación C/N en la fracción gruesa del suelo.

NS: no significativo ($p > 0,05$)

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden a los muestreos realizados en los años 2004 y 2006 (n=8). Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006 (n=4).

CARBONO ORGÁNICO

En el suelo (COT)

La SD generó un cambio en la distribución del COT respecto de LC, provocando un aumento superficial significativo de 1,84 Mg CO ha⁻¹ con respecto a LC (0-5 cm), en promedio de las dosis de N (Tabla 4), Estas diferencias no se registraron en 5-15cm, ni se detectaron al analizar en forma conjunta la profundidad 0-15 cm.

En 0-1 cm (2006) el COT fue 30% superior bajo SD. En 0-1 cm se observó el único efecto significativo por dosis de N, con un incremento de 6,5 kg de CO ha⁻¹ kg N⁻¹ en promedio de los distintos sistemas. Estos cambios en superficie están vinculados con el mayor aporte de materia seca al aumentar la dosis de N aplicado como fertilizante, que es el nutriente más deficitario en estos suelos (Loewy y Seewald, 1980; Ron y Loewy, 2000).

Respecto a la comparación de LV con los otros dos sistemas a la dosis de 30 kg N ha⁻¹, el COT tuvo valores similares a LC y significativamente inferiores a SD en 0-5 cm. A profundidad mayor no se registraron diferencias significativas en esa dosis de N. En 5-10 cm LV presentó COT intermedio entre LC y SD. Por debajo de los 10 cm, y hasta los 20 cm, esta variable tuvo valores superiores que SD y LC, aunque sin diferir significativamente. Esto indicaría que dicho sistema de labranza también genera un cambio en la distribución del COT dentro del perfil, favoreciendo la incorporación profunda de los residuos vegetales.

Tabla 4: Distribución del carbono orgánico total (COT, Mg ha⁻¹) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	2,17	2,19	2,14	2,77	2,92	0,23
0-5	10,46	10,50	10,47	12,16	12,48	0,85
5-10	11,15	11,06	10,84	10,20	10,77	1,06
10-15	10,72	11,50	11,88	10,91	11,18	1,60
0-15	32,33	33,06	33,19	33,27	34,43	2,99
15-20	9,55	9,25	10,24	9,39	9,41	1,38

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006 (n=8). Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006 (n=4). Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Carbono orgánico asociado a la fracción mineral del suelo (COM)

El COM varió con los tratamientos de labranza en forma similar al COT, con una superioridad significativa de 1 Mg CO ha⁻¹ (Tabla 5), bajo SD con respecto a LC (0-5 cm), en promedio de las dosis de N. Estas diferencias no se registraron a mayor profundidad. En 0-1 cm (2006) el COM fue 11% superior bajo SD. Estos resultados coinciden con los de Halvorson *et al.* (2002a) que también encontraron aumentos de la fracción más estable de C en la capa superficial del suelo, como consecuencia de la no remoción del mismo bajo SD.

A la dosis de 30 kg N ha⁻¹, el COM en LV tuvo valores similares a LC y significativamente inferiores a SD en 0-5 cm. A mayor profundidad no se registraron diferencias significativas en esa dosis de N, repitiéndose las tendencias observadas para el COT.

Tabla 5: Distribución del carbono orgánico asociado a fracción mineral del suelo (COM, Mg ha⁻¹) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	1,88	1,91	1,88	2,07	2,16	0,18
0-5	8,85	8,90	8,86	9,74	9,96	0,80
5-10	9,74	9,74	9,63	9,37	9,80	0,88
10-15	9,93	10,76	11,05	10,40	10,54	1,49
0-15	28,52	29,40	29,54	29,51	30,30	2,76
15-20	9,17	8,81	9,56	9,04	9,07	1,21

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006 (n=8). Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006 (n=4). Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Materia orgánica grosera (MOG)

En el año 2004 se determinó la MOG. En la Tabla 6 se la expresa como porcentaje de la masa de suelo muestreado. Los sistemas de labranza que menor remoción del suelo producen (SD y LV) fueron eficientes en mantener este material en los 0-5 cm. Esta fracción de los residuos, que no forma parte de la cobertura del suelo, representa el material orgánico en menor estado de descomposición (principalmente raíces).

En el muestreo realizado en 2006 no se detectó esta fracción de la MO, debido al bajo aporte de residuos de los cultivos de trigo del año 2005, que al momento del muestreo habían alcanzado un estado avanzado de degradación (Venanzi *et al.*, 2008).

Tabla 6: Materia orgánica grosera (MOG, %) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-5	0,18	0,86	1,46	1,47	1,47	0,20
5-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10-15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N.ha⁻¹.año⁻¹.

Carbono orgánico particulado (COP)

En promedio de las dosis de N se observaron efectos significativos de los sistemas de labranza (SD vs LC) en todas las profundidades, excepto en 15-20 cm. En 0-15 cm las parcelas bajo SD tuvieron 0,22 Mg COP ha⁻¹ más que las de LC (Tabla 7). Esta diferencia a favor de la SD fue el cuádruple en 0-5 cm, mientras que un efecto inverso de menor magnitud se observó en 5-10 y 10-15 cm. La acumulación superficial hallada en SD se vio magnificada en el año 2006, al estudiar la capa de 0-1 cm.

Los efectos descriptos en las distintas capas, se compensan al analizar los 0-15 cm, coincidiendo estos resultados con los obtenidos por Halvorson *et al.* (2002a), quienes trabajando en zonas semiáridas de los Estados Unidos, no encontraron diferencias significativas de COP entre SD y LC, cuando la secuencia de cultivos era poco intensa (trigo-barbecho).

El COP bajo LV no se diferenció significativamente del promedio de SD y LC a la dosis de 30 kg N ha⁻¹, asimilándose a los valores de LC, con la excepción de la profundidad 15-20 cm en 2006 (Tabla 3). En la comparación individual el COP fue mayor en SD que en LV en los 0-1 y 0-5 cm, y lo opuesto ocurrió por debajo de los 5 cm (Tabla 7).

La no remoción del suelo en SD provoca que los rastrojos de los cultivos permanezcan en superficie. Estos son la fuente principal de aporte de carbono y el COP representa la fracción

más sensible para detectar estos aportes. Mediante las labores de preparación de la cama de siembra (LC y LV), estos residuos son incorporados al suelo. El cincel lo hace a mayor profundidad que las rastras, herramienta que es más frecuentemente utilizada en LC. En ambos casos la profundidad efectiva de labor puede variar con la humedad del suelo (Andriulo *et al.*, 1988).

En 0-1 cm (2006) el incremento de la dosis de N, en promedio de los sistemas de labranza, afectó favorablemente el COP a una tasa de 3,33 kg COP ha⁻¹ kg N⁻¹.

En el caso de la SD, el menor aporte de material por debajo de la superficie -solo raíces- (Baker *et al.*, 2007) y el mayor contenido de humedad en el suelo (Bhattacharyya *et al.*, 2006) que mejora las condiciones para la humificación de esos residuos, podrían ser las causas del menor contenido COP en profundidad.

Tabla 7: Distribución del carbono orgánico particulado (COP, Mg ha⁻¹) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	0,29	0,28	0,26	0,70	0,76	0,16
0-5	1,61	1,61	1,61	2,43	2,52	0,31
5-10	1,41	1,32	1,21	0,84	0,98	0,25
10-15	0,79	0,74	0,83	0,51	0,64	0,23
0-15	3,81	3,67	3,65	3,78	4,14	0,39
15-20	0,38	0,44	0,68	0,35	0,34	0,25

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006 (n=8). Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006 (n=4). Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Relación COP/COT

La proporción del COP en el COT es más importante que su cantidad absoluta (Loveland y Webb, 2003). El COP representó alrededor de un 11,3 % del COT, en la profundidad 0-15 cm (Tabla 8). En los estratos superficiales la relación COP/COT fue entre 30 y 100% mayor en SD que en LC. Estos resultados están en línea con los informados por Fabrizzi *et al.*, 2003; Eiza *et al.*, 2005; Domínguez *et al.*, 2009. Lo opuesto se observó entre los 5 y 15 cm. A la dosis de 30 kg N ha⁻¹, LV se asemejó a LC hasta los 15 cm, superando a los otros dos sistemas de labranza en 15-20 cm.

La diferencia entre sistemas de labranza por profundidad puede atribuirse a que en SD, el material orgánico “joven” en las profundidades 5-10 y 10-15 cm proviene sólo de las raíces de los cultivos, mientras que en LC y LV proviene, además, de los residuos incorporados con el laboreo (Baker *et al.*, 2007).

Tabla 8: Distribución de la relación COP/COT (%) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV 30N	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N		30N	60N	
0-1	13,2	12,4	12,1	25,4	25,4	4,3
0-5	15,3	15,2	15,3	20,1	20,2	2,7
5-10	12,5	11,7	10,9	8,2	9,0	1,7
10-15	7,1	6,5	6,8	4,6	5,7	1,6
0-15	11,6	11,1	11,0	11,0	11,6	1,0
15-20	3,9	4,6	6,2	3,7	3,6	1,9

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden al promedio de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Los sistemas de labranzas que no producen remoción del suelo (SD) almacenan los residuos sobre la superficie, a diferencia de la LC y LV que los incorporan con las labranzas. Dicha acumulación superficial generó un aumento de las formas más lábiles del carbono orgánico (MOG y COP) y, al cabo de 6 y 8 años de implementados los sistemas, provocó también valores más altos de las fracciones más estables (COM) y, por lo tanto del COT. En cambio, los sistemas de labranza que incorporan los residuos con las labores, tuvieron valores mayores de COT y COP por debajo de los 5 cm, diferenciándose entre si en la profundidad de incorporación. Mientras que en LC, el uso de rastras generó un aumento de estas dos fracciones entre los 5-10 cm, en LV los valores fueron superiores entre los 10-20 cm.

NITRÓGENO

Nitrógeno total (Nt)

En los 0-15 cm no se encontraron diferencias entre sistemas de labranza ni efecto del nivel de fertilización nitrogenada sobre esta variable (Tabla 9), coincidiendo con lo reportado por Halvorson *et al.*, 2002a. Sin embargo, y de manera similar a lo hallado para el COT, se observaron cambios al separar dicha muestra en segmentos de menor tamaño. En los 0-5 cm, la cantidad de Nt en SD fue mayor que en LC. En la siguiente profundidad evaluada (5-10 cm) se vio el proceso inverso, mientras que por debajo (10-15 cm) no se encontró ningún efecto. Esto se explica a través de las variaciones en profundidad de calidad y cantidad de residuos según sistemas de labranza ya descritas para el COT y el COP. Estos resultados coinciden con los de Angers *et al.* (1997), quienes encontraron que diferentes sistemas de labranza alteraban la distribución de la MOS en el perfil del suelo más que la capacidad total de almacenamiento de CO o nitrógeno (N).

Tabla 9: Distribución del nitrógeno total (Mg ha^{-1}) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	0,18	0,17	0,16	0,23	0,22	0,04
0-5	0,92	0,88	0,93	1,01	1,03	0,08
5-10	1,00	1,02	0,99	0,87	0,89	0,14
10-15	0,95	0,91	0,93	0,95	0,90	0,11
0-15	2,87	2,81	2,85	2,83	2,82	0,30
15-20	0,67	0,61	0,70	0,90	0,70	0,21

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha^{-1} año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Relación carbono/nitrógeno

En general hubo escasa variabilidad en la relación C/N (Tabla 10). En la profundidad 0-15 cm C/N fue 0,6 puntos mayor en SD que en LC para los dos años de muestreo en forma conjunta. El mismo efecto se verificó en 0-5 y 5-10 cm. En 10-15 cm la mayor C/N a la dosis de 30 kg N ha^{-1} correspondió a LV. La estabilidad de la relación C/N se debe a que el COT y el Nt variaron en forma muy similar. Las diferencias obtenidas por efecto de la SD son del mismo orden de magnitud que las reportadas entre la condición cuasi prístina y el suelo cultivado en un lote del SO bonaerense (Ron *et al.*, 2011). Los valores mayores para las situaciones en que el suelo se encuentra menos disturbado reflejan menor grado de humificación (Tan, 2003).

Tabla 10: Distribución de la relación C/N del suelo entero, en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	11,8	12,7	13,2	12,7	13,6	1,9
0-5	11,6	12,0	12,0	12,5	12,4	0,8
5-10	11,4	11,1	11,1	12,0	12,5	1,1
10-15	11,4	12,8	12,9	12,0	12,5	1,4
0-15	11,5	12,0	12,0	12,2	12,5	0,6
15-20	14,4	15,2	15,1	10,9	13,5	3,5

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden al promedio de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Nitrógeno en la materia orgánica particulada (N-MOP)

En promedio de las dosis de N, se observaron efectos significativos de los sistemas de labranza (SD vs LC) en el contenido de N-MOP en los 0-15 cm (Tabla 3). En esta profundidad las parcelas bajo SD tuvieron 38 kg N-MOP ha⁻¹ más que las de LC (Tabla 11). Esta diferencia a favor de la SD fue de 53 kg ha⁻¹ en 0-5 cm. En la capa de 0-1 cm (año 2006) se encontró un incremento mucho mayor de N-MOP (alrededor del 100%). A esta profundidad y a la dosis de 30 kg N ha⁻¹, el N-MOP bajo SD fue 20 kg ha⁻¹ mayor que para los otros dos sistemas. En 0-5 cm se encontró un gradiente SD>LV>LC. Wright y Hons (2005) encontraron resultados similares, indicando que el N de la FG del suelo fue más sensible para detectar diferencias entre sistemas de labranza (SD>LC), y que las mismas eran más importantes en las capas más superficiales del suelo.

Como era esperable, el COP y el N-MOP estuvieron asociados significativamente para el conjunto de los datos, siendo los valores de N-MOP superiores en general para el año 2006 (Figura 4 A). Con objeto de aportarle valor predictivo a la determinación del COP, se ajustaron regresiones de N-MOP en función del COP para cada año, obteniéndose ecuaciones

cuyas pendientes difirieron en forma altamente significativa (Figura 5). Lo expuesto indica diferencias en la calidad de la MOP, en cuanto a su concentración de N. Ésta se asume menor en los residuos del trigo previo al 2004, dados los mayores rendimientos obtenidos en esa campaña, 2800-3500 kg ha⁻¹, en comparación con 800-1400 kg ha⁻¹ logrados en 2005 (Venanzi *et al.*, 2008). Esto hace que, si bien en promedio de los dos años de estudio cada Mg de COP estaría asociado a 45 kg de N, según la calidad del residuo aportado, se observó una variación entre 34,5 y 55,1 kg de N por cada Mg de COP, siendo mayor el aporte de N cuando el cultivo antecesor tuvo un menor rendimiento.

Tabla 11: Distribución del nitrógeno total particulado (N-MOP, kg ha⁻¹) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	19,0	18,9	18,3	40,1	42,4	7,6
0-5	100,1	98,0	123,0	151,5	152,4	21,5
5-10	106,1	102,8	111,3	89,1	92,7	25,0
10-15	92,0	69,3	87,1	67,3	92,1	36,1
0-15	298,2	270,1	321,4	307,9	337,2	50,3
15-20	81,5	61,9	66,3	98,0	83,5	33,1

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Relación carbono/nitrógeno en la fracción gruesa

La relación C/N en la FG del suelo en ambos años fue menor que 25, indicando que el N no sería limitante para la actividad biológica (Tabla 12), con valores que fueron menores en SD respecto a LC en los 0-15 cm. En el primer cm de profundidad (estudiado sólo en 2006), la relación fue significativamente mayor en SD respecto a LC y LV. Esto es debido a que los

rastreros de las gramíneas (principales especies utilizadas en la rotación de estos ensayos) tienen una alta relación C/N, y en SD son mantenidos sobre la superficie. Al ser incorporados, se observó una mayor relación en LC, en los 5-10 y 10-15 cm. y en LV en 15-20 cm, consistente con la profundidad de incorporación de los residuos de cada sistema de labranza. No se observaron efectos significativos del aumento de la dosis de N.

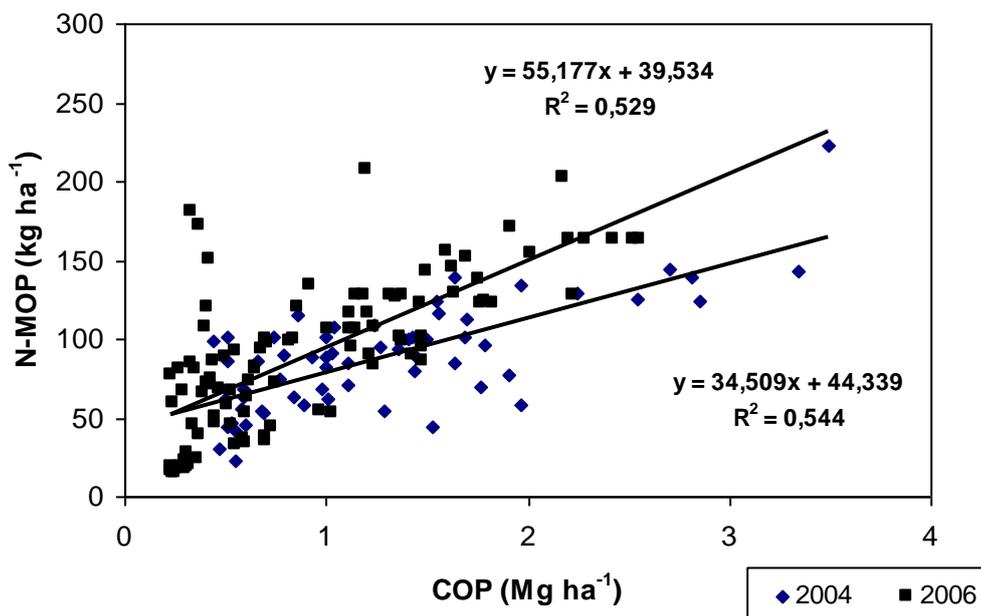


Figura 5: Relación entre el COP y el N-MOP. Datos de todos los sistemas de labranza. Valores de 2004 y 2006.

Tabla 12: Distribución de la relación C/N de la fracción gruesa del suelo, en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	15,3	14,7	14,4	17,5	17,9	2,6
0-5	18,2	17,8	13,3	16,5	16,9	5,3
5-10	14,2	13,2	11,6	9,8	10,8	2,7
10-15	8,5	12,3	9,7	8,2	8,9	3,4
0-15	13,6	14,4	11,5	11,5	12,2	2,6
15-20	4,8	7,7	10,3	4,5	4,0	2,2

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden al promedio de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Por lo desarrollado en este capítulo, se obtuvieron evidencias para no rechazar la hipótesis planteada, que postulaba que las fracciones labiles, tanto en su distribución así cómo en su calidad, serían más afectados por el sistema de labranza y la dosis de fertilización con N, que el contenido total de CO.

CAPÍTULO II

EFECTO DEL SISTEMA DE LABRANZA Y NIVEL DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE LAS DISTINTAS FORMAS DE FÓSFORO DEL SUELO

Introducción

Estimaciones recientes indican que, si bien en la última década se ha triplicado el consumo de fertilizantes en la Argentina, el balance de nutrientes (aporte por fertilización, menos extracción con los granos y forrajes) sigue siendo negativo en la mayor parte del país (García *et al.*, 2006). Para el caso del fósforo (P), la reposición es ligeramente superior al 50% de lo exportado por los granos, dando lugar a un paulatino empobrecimiento de los suelos (García *et al.*, 2006).

En el crecimiento de las plantas, el P se asocia con un aumento en el desarrollo de las raíces, lo que indica un mayor poder de exploración del suelo en busca de nutrientes y agua. A nivel celular, el P forma parte de enzimas, ácidos nucleicos, proteínas y está involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía.

La concentración de P en las plantas varía entre 0,1 y 0,4%, y una deficiencia de este elemento retarda el crecimiento general de la planta (Takahashi y Anwar, 2007). El P es más abundante en los tejidos en activo crecimiento. Cuando las plantas tienen acumulada cerca del 25% de su materia seca total, ya han acumulado en sus tejidos hasta el 75% de sus requerimientos en P. Esto significa que los máximos requerimientos ocurren durante los primeros estadios de crecimiento del cultivo (Satorre *et al.*, 2003). Existen marcadas diferencias en los requerimientos de distintos cultivos extensivos (Tabla 13).

Tabla 13: Requerimientos y contenido de P en los diferentes cultivos.

Cultivo	kg P absorbido Mg ⁻¹ de grano	kg P extraído Mg ⁻¹ de grano	Índice de Cosecha
Maíz	4	3	0,75
Trigo	5	3,75	0,75
Soja	8	6,7	0,84
Girasol	5	4	0,80

García *et al.*, 2006

Se sabe que la capacidad del suelo para proveer P es muy variable, debido a que sólo parte del P total se encuentra disponible para las plantas. Si bien los contenidos de P total del suelo son relativamente altos y variables en la Región Pampeana (200 a 800 µg g⁻¹, Giuffré, 2005) sólo una pequeña fracción que varía comúnmente entre 5 a 20 µg g⁻¹, está disponible para los cultivos (García *et al.*, 2006).

Básicamente, podemos distinguir 3 fracciones de P que interactúan en el suelo: P orgánico (Po), inorgánico (Pi) y el de la solución del suelo. Este último está en equilibrio con las otras dos formas y es aquel que pueden tomar las plantas. Teniendo en cuenta las formas de P y la velocidad de ciclado de cada una de ellas, es posible esquematizar los equilibrios que se producen en el suelo (Figura 6).

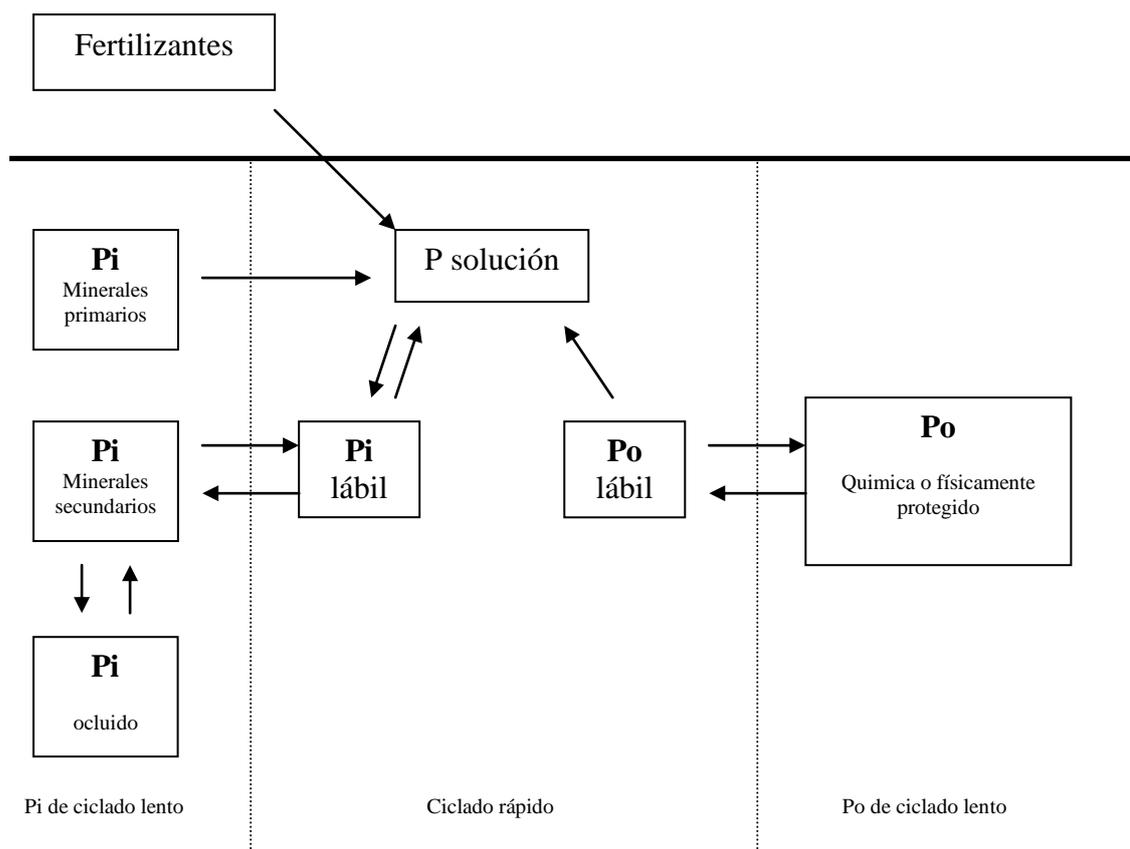


Figura 6; Equilibrio de las diferentes formas de fósforo en el sistema suelo-planta (adaptado de Tiessen *et al.*, 1994).

De la Figura 6, se pueden inferir la interacción de cada uno de los compartimentos y la dinámica del sistema. La aplicación de un fertilizante fosforado inorgánico inicialmente determina un aumento en la concentración de la solución del suelo aunque posteriormente el fósforo puede seguir las vías descritas en la Figura 6 (adsorción, precipitación o transformación a las formas orgánicas). La concentración de P en la solución del suelo depende de la solubilización y precipitación de los fosfatos unidos al Ca, Fe y Al, de la desorción o adsorción a los coloides del suelo y de la mineralización e inmovilización del fósforo orgánico (Lombi *et al.*, 2004).

Fósforo orgánico

Esta fracción forma parte de la materia orgánica como fitatos, ácidos nucleicos y fosfolípidos (Tiessen *et al.*, 1994). Constituye entre el 15 y el 80% del fósforo total del suelo (Tabla 14) (Halstead y McKercher, 1975). En la Argentina, se reportan valores dentro del mismo rango (Tabla 15). Normalmente el contenido de Po de los suelos minerales disminuye bruscamente con la profundidad del perfil. Generalmente los contenidos de Po son mayores en suelos arcillosos que en arenosos, aunque estos últimos poseen mayor capacidad para mineralizarlo (Tiessen *et al.*, 1982).

Tabla 14: Valores de Po en suelos del mundo. Datos de Halstead y McKercher (1975).

Lugar	Po (mg kg ¹)	% del P total
Australia	40-900	-
Canadá	80-710	9-54
Dinamarca	354	61
Inglaterra	200-920	22-74
Nueva Zelanda	120-1360	30-77
Nigeria	160-1160	-
Escocia	200-920	22-74
Estados Unidos	4-85	3-52

Po: fósforo orgánico; P total: fósforo total

Tabla 15: Po como porcentaje del P total (Pt) según zona y orden de suelos (Argentina).

Provincia/zona	Orden del suelo	Po como % del Pt	Referencia
Buenos Aires /SE	Molisoles	78 - 83	Diez <i>et al.</i> (2000); Picone <i>et al.</i> (2003)
Buenos Aires /SO	Molisoles	15 - 35	Suñer (2007)
Entre Ríos	Vertisoles y Alfisoles	41 - 74	Picone y Zamuner (2002)
Misiones/S	Ultisoles y Oxisoles	18 - 28	Picone y Zamuner (2002)

SE: sudeste; SO: sudoeste; Po: fósforo orgánico; Pt: fósforo total.

La mayor parte del Po deriva de la incorporación de los residuos, y una menor proporción proviene de la síntesis de origen microbiano a partir de los fosfatos inorgánicos presentes en la solución del suelo. Los hongos poseen mayor habilidad para solubilizar fósforo tricálcico respecto a las bacterias (Fernández *et al.*, 2005). Estas últimas pueden perder esta capacidad cuando se realizan sucesivas transferencias de cultivos bacterianos, lo que no ocurre en el caso de los hongos (Kucey, 1983, citado en Fernández *et al.*, 2005).

Existen formas de Po de labilidad diferente, dependiendo de las características de las fracciones orgánicas (Oehl *et al.*, 2004; Zalba y Peinemann, 2002) Las fracciones más lábiles de Po se mineralizan a formas inorgánicas, a través de la hidrólisis por la reacción con fosfatasas ácidas muy específicas, sintetizadas en mayor proporción por las raíces y microorganismos del suelo (Oberson *et al.*, 1996). De acuerdo con la literatura son diversas las cantidades anuales de Po mineralizado neto. Las mismas variaron entre 0,5 y 20 kg P ha⁻¹ año⁻¹ en las regiones templadas (Chater y Mattingly, 1980; Stewart y Sharpley, 1987) y entre 67 y 157 kg P ha⁻¹ año⁻¹ en suelos de regiones tropicales donde la mayor temperatura del suelo estimula la actividad microbiana (Mueller-Harvey *et al.*, 1985). Estudios realizados con suelos incubados mostraron evidencias de mineralización del Po, a través de la disminución de las formas orgánicas lábiles de P (Giuffré *et al.*, 1998).

Picone *et al.* (2003) encontraron que en una pastura mixta fertilizada con distintas dosis de P, el contenido de la biomasa microbiana fue de 29 mg P kg⁻¹ en los primeros 15 cm de suelo, y representó el 5% del P orgánico total. Tendió a aumentar con la dosis de P aplicada, desde 22 mg P kg⁻¹ (testigo) hasta 37 mg P kg⁻¹, con la dosis de 200 kg P ha⁻¹. En el corto plazo, los microorganismos pueden ser un destino muy importante del P aplicado, cuando se agrega una fuente de carbono fácilmente disponible como fue observado por Mestelán (1997) en un ensayo en invernáculo

La significación del P orgánico en la nutrición de los cultivos ha sido probada relacionando su contenido con el rendimiento de los cultivos. Los mayores efectos han sido notados en suelos tropicales donde, aparentemente, el P orgánico puede ser la mayor fuente para el requerimiento de los cultivos. Estudios realizados en África reportaron una buena correlación entre rendimiento del trigo y el P orgánico total (Friend y Birch, 1960). Se asumió que una proporción constante del P orgánico total era mineralizado, y que éste fue la principal fuente de P para la planta. En Ultisoles, las variaciones en el contenido de la fracción orgánica lábil y extraíble con NaHCO_3 , explicaron el 80% de la variabilidad del P inorgánico lábil (P-resina) (Tiessen *et al.*, 1983). También en suelos Ultisoles, esta fracción de P orgánico correlacionó con la absorción de P y producción de materia seca de soja, en sistemas no fertilizados (Linguist *et al.*, 1997). En regiones templadas, la contribución del P orgánico sería menor, siendo la disponibilidad de P inorgánico el principal factor que afecta la respuesta de los cultivos. En suelos Molisoles, la mayoría del P inorgánico lábil (P-resina) derivó de las formas inorgánicas de P adsorbidas y secundarias extraídas con NaHCO_3 y NaOH (Tiessen *et al.*, 1994).

Toda alteración de los flujos naturales de la materia orgánica en el suelo, tendrá un efecto directo sobre la reserva y disponibilidad de Po . En este sentido, el manejo agronómico tiene relación directa con el contenido de Po y su labilidad (Gosling y Shepherd, 2005).

El ambiente edáfico es fuertemente alterado al incorporar suelos naturales al cultivo. La labranza, a través del aumento de la aireación y exposición de sustratos orgánicos previamente protegidos, acelera la descomposición de la materia orgánica. El Po no siempre se descompone a la misma velocidad que el C y el N, en consecuencia las relaciones entre C: Po y N: Po difieren en los suelos cultivados respecto a los vírgenes (Beck y Sánchez, 1994). En un estudio desarrollado en parcelas de la Estación Experimental Bordenave del INTA (Miglierina, 1991), se encontró que en un suelo virgen la relación C: Po (130) fue mayor que

en rotaciones de trigo con otros cultivos (89), trigo-pastoreo (101) y trigo-pastura coasociada (90). Por otra parte, la relación N:Po fue de 13,2 en suelo virgen, mientras que para las mismas rotaciones fueron 7,1; 8,4 y 6,8, respectivamente. Es decir, el manejo agronómico altera la relación entre nutrientes en el suelo, modificando los delicados equilibrios que regulan la disponibilidad. Más aún, estos cambios en el tiempo presentan características particulares. Al inicio de la actividad agrícola, la cantidad de Po mineralizado es mucho mayor que la demanda de los cultivos, por lo que desplaza los equilibrios del P de la solución del suelo a la formación de minerales secundarios (Galantini *et al.*, 2005).

Fósforo inorgánico

Dentro de las fracciones inorgánicas, el fósforo se presenta en forma de ortofosfatos que pueden estar insolubles, poco solubles o solubles. Pueden fijarse y precipitar (pasaje del estado soluble o poco soluble a insoluble), estando involucrados mecanismos de: adsorción física (se unen por sus cargas a cationes), adsorción química (por reacción en pH alcalino dando óxidos o hidróxidos), sustitución de aniones por fosfatos o precipitados por cristales de fosfato de calcio o sobre otro mineral. El P insoluble puede pasar a la solución por intercambio iónico (P lábil) y solubilizarse según el pH del medio. Los ácidos orgánicos liberados por los microorganismos (genero *Pseudomonas* y *Bacillus*) facilitan la solubilización (Zibilske y Bradford, 2003). Algunas plantas adaptadas a suelos con bajos niveles de fósforo excretan compuestos acidificantes y quelantes edáficos como ácido cítrico o málico. La acidificación mejora la solubilidad en suelos básicos, mientras que los agentes quelantes se asocian a los cationes y liberan fosfatos desde formas muy pocos solubles (Sharpley, 1995).

En los suelos neutros y alcalinos existen varias formas de fosfatos de Ca. En suelos calcáreos tratados con altos niveles de P se produce la formación de fosfatos de Ca, esto fue visto por

distintos autores mediante técnicas de escaneo con Rayos X (Rehm *et al.*, 1995; Lombi *et al.*, 2004).

En la medida que la lluvia, la temperatura y la meteorización aumentan, la adsorción sobre el Ca disminuye, mientras que aumenta sobre el Fe y el Al (Frossard *et al.*, 2000).

Fósforo extraíble

Como se mencionó, sólo una parte del P edáfico ($5-20 \mu\text{g g}^{-1}$) de la reserva total de P ($200-800 \mu\text{g g}^{-1}$) se encuentra disponible para las plantas. El P disponible para el cultivo no depende solamente de la oferta de nutriente sino también del consumo del cultivo. La planta al absorber el P de la solución del suelo, determina un incremento de la tasa de solubilización del P para recuperar el nivel original, influyendo sobre la dinámica de todo el P en el sistema. La tasa de absorción está a su vez limitada por la dinámica del intercambio entre las fracciones (Figura 6). El pH del suelo es uno de los factores de disponibilidad más importante para el P. Aunque se considera al P extraíble equivalente al P disponible, se debe tener en cuenta que los extractantes químicos brindan sólo una estimación de la disponibilidad. El P extraído por soluciones débilmente ácidas a neutras corresponde a una fracción del P lábil inorgánico.

Debido a la importancia que el P tiene en el desarrollo del sistema radicular de las plantas, y éste en el aprovechamiento del agua del suelo en regiones con déficit hídrico recurrente, es por ello que se plantea estudiar el efecto que los distintos sistemas de labranza y el nivel de fertilización con N tienen sobre las distintas fracciones del P, como así también, observar los cambios en la distribución a distintas profundidades.

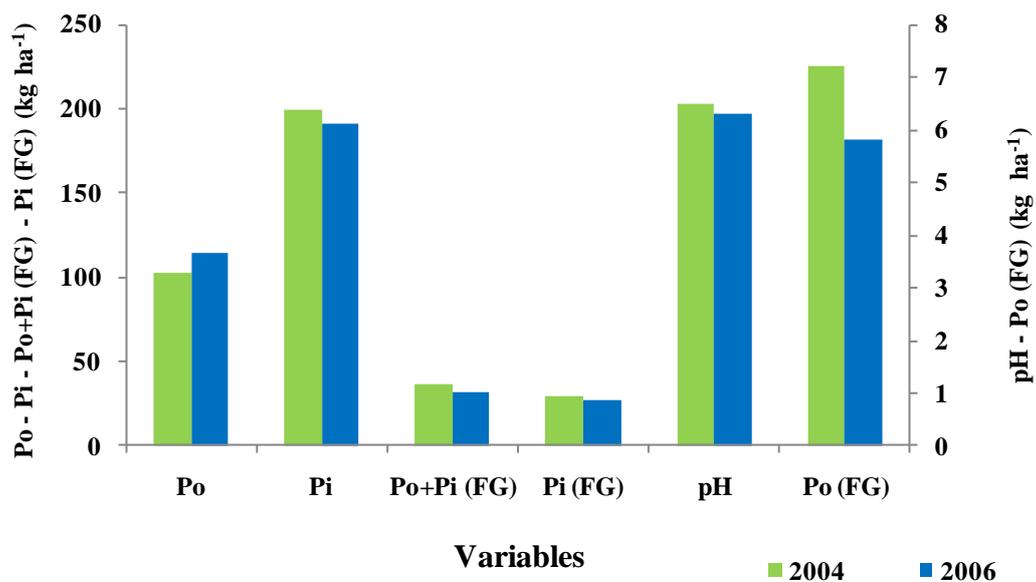
Para la verificación de la hipótesis planteada para este capítulo, se proponen los siguientes objetivos:

- Evaluar el contenido y la distribución de las diferentes formas de P edáfico y su relación con la fracción orgánica.
- Monitorear los cambios en las diferentes formas de P que ocurren en el corto plazo, generados por los distintos manejos, utilizando para ello a la fracción gruesa del suelo (100-2000 μm).

Resultados y discusión

El análisis de varianza detectó distintos efectos de los tratamientos (labranza y fertilización) y de los años de estudio, sin interacción significativa tratamientos por año (Tabla 16). En 0-5 cm, el año impactó significativamente en seis de las ocho variables analizadas registrándose en 2006 valores mayores de Po y menores de Pi, Po+Pi (FG), Pi (FG), pH y Po (FG) (Figura 7).

En 0-5 cm los tratamientos de labranza y fertilización afectaron significativamente el 62,5% de las variables, mientras que en los dos estratos inferiores prácticamente no se registraron efectos. En las profundidades adicionales, ensayadas en 2006, se verificaron resultados análogos en la muestra superficial y profunda (Tabla 16). La comparación de grupos de medias no detectó ningún efecto de la dosis de N, a excepción del Pi (FG) a 0-1 cm (2006) (Tabla 17). Tampoco se observaron interacciones significativas de este factor con los sistemas de labranza. En cambio, en superficie, el contraste entre los sistemas más disímiles fue significativo para el 75% de las variables. El bajo número de contrastes significativos de LV versus la media de SD y LC fue fundamentado en una sección anterior. Las comparaciones de medias individuales se muestran en las Tablas 18 a 25.



Po: fósforo orgánico; Pi: fósforo inorgánico; Po+Pi(FG): fósforo orgánico e inorgánico en la fracción gruesa del suelo (FG, 100-2000 μm); Pi(FG): fósforo inorgánico en la FG; pH: potencial hidrógeno; Po(FG): fósforo orgánico en la FG.

Figura 7: Efecto del año sobre variables de P en los 0-5 cm.

Tabla 16: Nivel de probabilidad para cada una de las propiedades y variables analizadas en los años y profundidades estudiadas.

Efecto	Suelo Entero					Fracción Gruesa		
	pH	Pe	Po + Pi	Po	Pi	Po+Pi	Po	Pi
Años 2004 y 2006 (n=8)								
Prof. 0-5 cm								
Año	0,001	0,282	0,135	<0,001	0,001	<0,001	0,045	0,002
Bloque	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,182	<0,001
Tratamiento	0,348	0,014	0,029	0,013	0,055	0,005	0,012	0,149
Tratamiento x Año	0,413	0,067	0,928	0,064	0,282	0,118	0,292	0,119
CV_(%)	2,31	8,66	2,98	6,35	3,45	9,17	34,02	8,00
Prof. 5-10 cm								
Año	0,002	0,041	<0,001	0,339	<0,001	0,030	0,611	0,002
Bloque	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,354	<0,001
Tratamiento	0,124	0,038	0,780	0,768	0,257	0,318	0,256	0,462
Tratamiento x Año	0,768	0,063	0,303	0,447	0,710	0,115	0,168	0,177
CV_(%)	2,33	12,91	2,91	7,03	3,68	8,98	37,72	7,29
Prof. 10-15 cm								
Año	0,010	0,973	0,005	0,012	0,177	0,052	0,005	0,001
Bloque	<0,001	<0,001	0,001	0,003	<0,001	<0,001	0,021	<0,001
Tratamiento	0,178	0,097	0,387	0,962	0,190	0,052	0,118	0,123
Tratamiento x Año	0,971	0,624	0,367	0,074	0,060	0,634	0,061	0,727
CV_(%)	3,44	31,93	5,27	10,77	6,87	13,50	43,61	11,85
Prof. 0-15 cm								
Año	0,002	0,328	0,004	0,588	0,003	0,002	0,798	<0,001
Bloque	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,048	<0,001
Tratamiento	0,190	0,766	0,598	0,811	0,489	0,275	0,174	0,297
Tratamiento x Año	0,810	0,605	0,451	0,609	0,801	0,237	0,318	0,314
CV_(%)	2,49	13,82	2,79	6,82	3,99	7,71	24,56	6,64
Año 2006 (n=4)								
Prof. 0-1 cm								
Bloque	0,016	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,228	0,049	0,003
Tratamiento	0,325	<0,001	0,015	<0,001	0,192	0,001	0,001	0,005
CV (%)	4,65	11,05	5,84	4,60	7,89	10,46	31,68	7,14
Prof. 15-20 cm								
Bloque	<0,001	<0,001	0,020	0,030	0,003	0,004	0,238	0,002
Tratamiento	0,131	0,435	0,453	0,678	0,432	0,246	0,456	0,129
CV(%)	4,18	28,37	6,87	7,93	7,92	13,33	32,71	12,90

pH: potencial hidrógeno; Pe: fósforo extractable; Po+Pi: fósforo orgánico + inorgánico; Po: fósforo orgánico; Pi: fósforo inorgánico; SE: suelo entero; FG: fracción gruesa (100-2000 μm).

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden a los muestreos realizados en los años 2004 y 2006 (n=8). Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006 (n=4).

Tabla 17: Significación de los efectos sobre el pH, Pe, Po+Pi, Po y Pi en el SE, y sobre el Po+Pi, Po y Pi en la FG, en los contrastes planteados a priori.

Efecto	Suelo Entero					Fracción Gruesa		
	pH	Pe	Po + Pi	Po	Pi	Po+Pi	Po	Pi
Años 2004 y 2006 (n=8)								
Prof. 0-5 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	NS	0,018	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SD vs LC	NS	0,001	0,003	0,006	0,007	<0,001	<0,001	NS
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Prof. 5-10 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	0,043	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SD vs LC	NS	0,003	NS	NS	0,031	NS	NS	NS
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,036	NS
Prof. 10-15 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	0,049	NS	NS	NS	0,029	0,008	0,031	0,020
SD vs LC	NS	0,029	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Prof. 0-15 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
SD vs LC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,021	NS
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Año 2006 (n=4)								
Prof. 0-1 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,012
LV vs (LC-SD 30N)	NS	0,003	NS	0,004	NS	NS	0,031	NS
SD vs LC	NS	<0,001	0,001	<0,001	0,026	<0,001	<0,001	0,001
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Prof. 15-20 cm								
Dosis de N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
LV vs (LC-SD 30N)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,043
SD vs LC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Interacción SL x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

pH: potencial hidrógeno; Pe: fósforo extractable; Po+Pi: fósforo orgánico + inorgánico; Po: fósforo orgánico; Pi: fósforo inorgánico; SE: suelo entero; FG: fracción gruesa (100-2000 µm).

NS: no significativo (p>0,05).

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden a los muestreos realizados en los años 2004 y 2006 (n=8). Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006 (n=4).

Potencial hidrógeno (pH)

Se observó una gran variabilidad en el pH (Figura 9), cubriendo un rango de 5,7 a 8, con diferencias significativas entre bloques. En promedio de los bloques, el rango se estrechó marcadamente (6,1 – 6,8, Tabla 18). Aunque los valores de pH tendieron a ser menores en SD, respecto a LC y LV en todas las profundidades, el ANOVA no reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a ninguna profundidad. Por lo tanto, los efectos de los tratamientos sobre las distintas formas de P que se reportan a continuación, no serían directamente atribuibles a cambios en el pH.

Tabla 18: Valores de pH en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	6,3	6,3	6,5	6,2	6,1	0,5
0-5	6,4	6,6	6,6	6,3	6,4	0,4
5-10	6,5	6,5	6,6	6,2	6,4	0,4
10-15	6,5	6,6	6,7	6,3	6,5	0,4
0-15	6,5	6,6	6,7	6,3	6,4	0,4
15-20	6,7	6,8	6,8	6,3	6,6	0,4

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden al promedio de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Fósforo extraíble (Pe)

A la profundidad de 0-15 cm, que corresponde a la de las muestras para análisis de rutina en el SO bonaerense, no se encontraron diferencias de Pe entre los distintos sistemas de labranza y niveles de fertilización. En 0-5 cm, las parcelas bajo SD superaron en 8 ug de Pe g⁻¹ a las de LC. Este incremento se duplicó en 0-1cm. Además, en esta profundidad el Pe bajo LV fue

menor que el promedio de los otros dos sistemas (Tabla 19). En 5-10 y 10- 15 cm se observó una disminución de Pe bajo SD que, en promedio, equilibraría el incremento observado en 0- 5 cm.

Los valores de Pe disminuyeron consistentemente con la profundidad con modalidad diferencial según sistema de labranza (Figura 8), en coincidencia con lo hallado por Galantini *et al.* (2005) en suelos similares. Las labores de preparación con rastras (LC) homogenizan el suelo en la profundidad de laboreo e incorporan material vegetal, enriqueciendo estas zonas con residuos que, al descomponerse, son fuente de P. En cambio en los sistemas con menor o nula remoción, sólo se agrega una parte del material y restos de raíces. Se produce en consecuencia un balance negativo de Pe, ya que lo absorbido por las raíces no es compensado por el ingreso de residuos.

Tabla 19: Concentración del fósforo extraíble (Pe, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	40,5	40,2	37,8	58,2	53,3	8,6
0-5	38,7	38,1	36,0	48,2	43,9	6,8
5-10	36,6	37,0	31,7	26,7	26,9	8,2
10-15	22,3	25,4	25,0	19,0	18,8	6,1
0-15	32,5	33,5	30,9	31,3	29,9	6,4
15-20	14,8	17,3	13,9	12,3	12,8	6,0

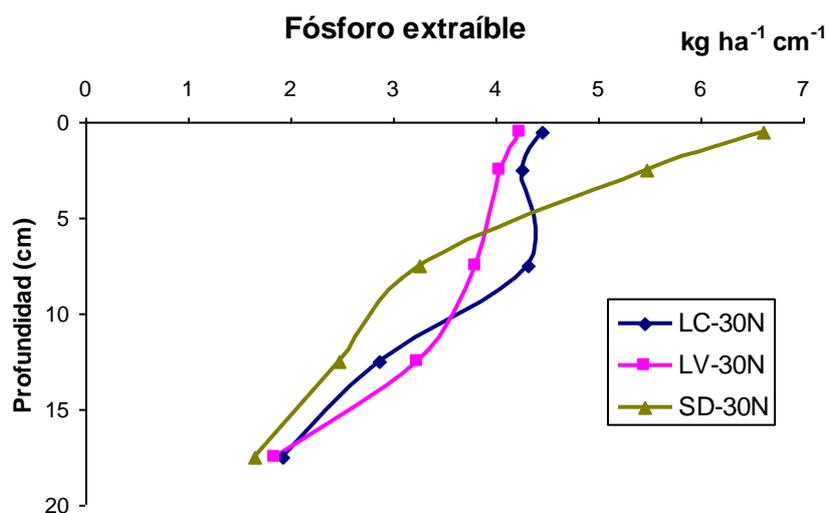
LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden al promedio de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Lo expuesto revela diferencias en el suministro para los cultivos y enfatiza la necesidad de consideraciones especiales en las estrategias de muestreo para el diagnóstico. En el primer caso, la disponibilidad del P en SD podría ser más dependiente de la disponibilidad

superficial de agua, y por lo tanto de lluvias o riegos frecuentes, por ubicarse la mayor reserva en una capa muy superficial (Robbins y Voss, 1991; Rehm *et al.*, 1995; Selles *et al.*, 1997).

En cuanto al segundo punto, surge el interrogante de la equivalencia de los valores obtenidos en diferentes profundidades y su relación con las calibraciones de respuesta a la fertilización en el sudoeste de Buenos Aires. Calviño *et al.* (2000), trabajando con suelos del sudeste bonaerense, no encontraron diferencias en las calibraciones para la fertilización con P en suelos en SD donde hubo estratificación del Pe, respecto a LC, recomendando el muestreo de 0-20 cm para ambos sistemas de labranzas.



LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006.

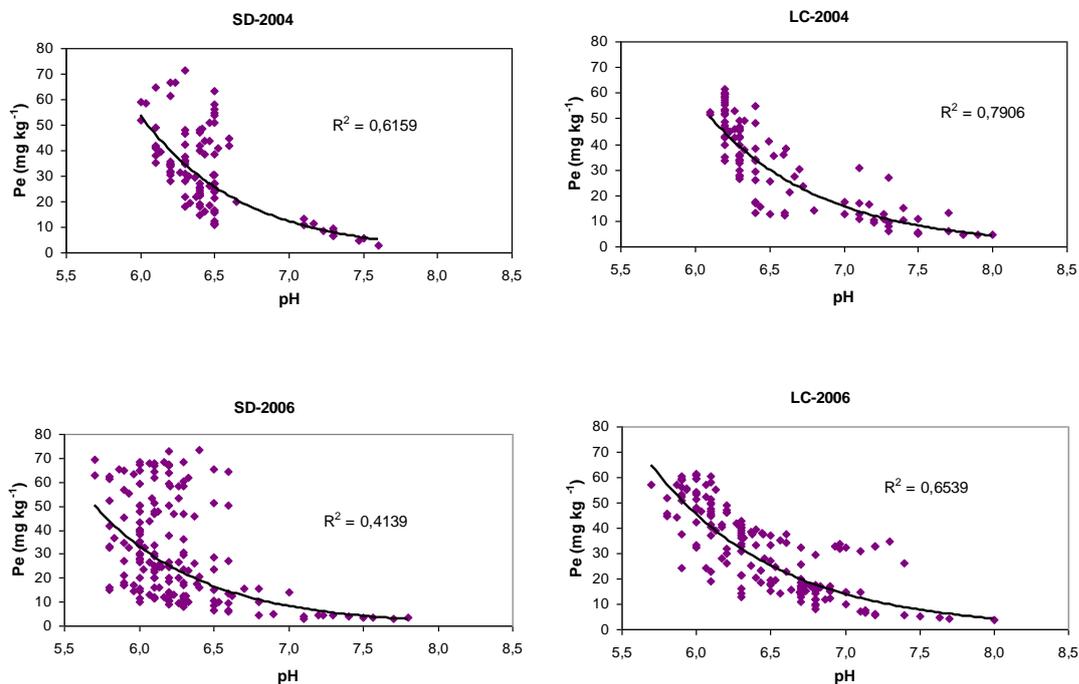
La unidad $\text{kg ha}^{-1} \text{cm}^{-1}$ se utiliza para poder relacionar la profundidad 0-1 cm con las restantes (0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm).

Figura 8: Distribución del fósforo extraíble ($\text{kg ha}^{-1} \text{cm}^{-1}$) para tres sistemas de labranzas fertilizados con 30 kg N ha^{-1} .

Para estudiar la relación entre Pe y pH en el espectro de profundidades de muestreo se atendió el resultado del ANOVA, separando por año de estudio y sistema de labranza, tomando los dos más disímiles (LC y SD) (Figura 9). Las regresiones fueron altamente

significativas para ambos sistemas de labranza y años de estudio ($p < 0,0001$), pero el coeficiente de determinación fue mucho mayor para LC. Esto se debe a la estratificación observada para SD (Figura 8) que fue más marcada en el muestreo de 2006. En este año se analizaron dos profundidades más que en 2004, y donde 0-1 cm fue una de ellas, pudiendo ser este factor el responsable de aumentar la variabilidad entre pH y Pe. A medida que transcurren los años bajo SD se incrementa, por otra parte, la variabilidad del Pe, debido a la escasa movilidad del P. Por el contrario, en LC el P periódicamente se homogeneiza a la profundidad de laboreo y la relación encontrada con el pH es análoga a la reportada por otros autores en la región pampeana (Buschiazzo *et al.*, 1990; Ron y Loewy, 1990).

Por último se destaca que la mayor variabilidad del Pe ocurrió en muestras con valores de pH inferiores a 6,5, correspondiendo las restantes al bloque II de características diferentes a los otros tres.



SD: siembra directa; LC: labranza convencional.

Figura 9: Fósforo extraíble (mg kg^{-1}) en función del pH, separado por año de estudio (2004 y 2006) y sistema de labranza (SD y LC).

Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi) y Po+Pi

Estas variables fueron influenciadas significativamente por los tratamientos en las muestras superficiales. Bajo SD el Po+Pi fue superior en unos 25 kg ha⁻¹ a la cantidad en LC (promedio de dosis de N) (Tabla 20), aportando el Po (Tabla 21) y el Pi (Tabla 22) en cantidades prácticamente iguales a este incremento. En 0-1 cm hubo un enriquecimiento análogo de estas formas de fósforo.

La acumulación superficial de residuos no produjo una acumulación diferencial de Po respecto a Pi en los primeros 5 cm de suelo (Figura 10), sólo se observó un incremento del Po en SD con 60N respecto de LC (Tabla 21), mientras que el Po+Pi fue mayor en ambos tratamientos bajo SD (Tabla 20). La disposición superficial de los residuos en SD provocó acumulación de Po, pero las mejores condiciones de humedad superficial podrían estimular la mineralización a las formas inorgánicas de P.

Tabla 20: Distribución de fósforo orgánico e inorgánico (Po+Pi, kg ha⁻¹) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N		30N	60N	
0-1	61,9	60,4	63,7	70,6	67,4	5,8
0-5	297,4	290,2	299,1	319,9	319,3	21,1
5-10	304,7	306,1	316,9	313,1	317,3	27,6
10-15	325,8	329,8	344,1	322,4	325,1	24,9
0-15	927,9	926,1	960,1	955,4	961,6	64,4
15-20	308,1	309,6	335,8	310,7	314,2	33,5

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

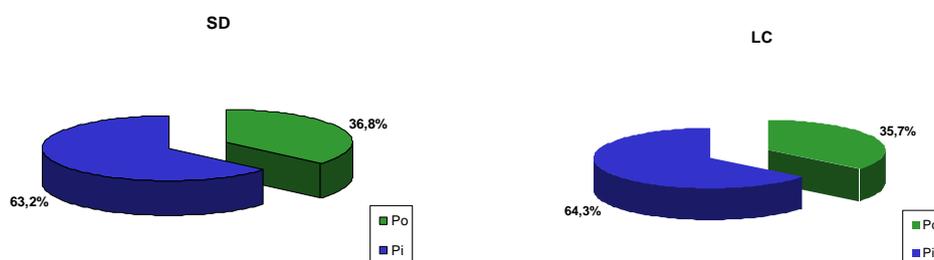
Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Tabla 21: Distribución del fósforo orgánico (Po, kg ha⁻¹) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N		30N	60N	
0-1	23,6	23,0	25,6	27,6	26,2	1,7
0-5	107,5	102,3	101,7	113,3	121,6	11,4
5-10	114,0	115,6	122,8	112,9	115,0	17,7
10-15	120,6	118,4	118,3	120,8	115,9	16,3
0-15	342,0	336,3	342,8	347,0	352,4	29,6
15-20	116,6	120,4	127,3	119,8	117,5	14,8

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).



LC: Labranza convencional; SD: Siembra directa; Po: fósforo orgánico; Pi: fósforo inorgánico

Figura 10: Relación entre el Po y Pi en los 0-5 cm de suelos en siembra directa (SD) y labranza convencional (LC).

Tabla 22: Distribución del fósforo inorgánico (Pi, kg ha⁻¹) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	38,2	37,8	40,5	42,9	41,1	4,88
0-5	187,0	188,0	197,4	206,6	197,7	14,0
5-10	190,8	190,6	194,1	200,2	201,4	12,8
10-15	205,2	213,1	225,8	201,6	203,4	22,7
0-15	583,0	591,7	617,2	608,4	602,4	43,8
15-20	191,6	189,2	208,5	190,9	196,8	23,8

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Se encontró una alta correlación entre Pe y Pi ($p < 0,0001$ y $R^2 = 0,74$, $n = 480$), confirmando que el extractante utilizado en el método de Bray y Kurtz (1945) está cuantificando principalmente formas inorgánicas lábiles de P (Figura 11).

Además se deben considerar las transformaciones entre las formas orgánicas e inorgánicas de P que pueden verse afectadas por los tratamientos. Como se vio anteriormente, los distintos sistemas de labranza producen cambios en la distribución de las distintas formas de P dentro del perfil del suelo, principalmente el Po (Tablas 16 y 17). La mineralización de dicho Po podría aumentar la disponibilidad de P para las plantas, proceso de mayor relevancia en las capas más superficiales, donde se desarrolla mayor número de raíces. Estas transformaciones aportan a la variabilidad temporal en la disponibilidad de P y son el origen de muchos de los interrogantes sobre la utilidad de los métodos de diagnóstico para la predicción de la respuesta (Galantini *et al.*, 2007b). El estudio del Po en la fracción gruesa del suelo (100-2000 μm) podría aportar en este sentido, debido a su mayor dinámica en las transformaciones de P (Galantini *et al.*, 2005).

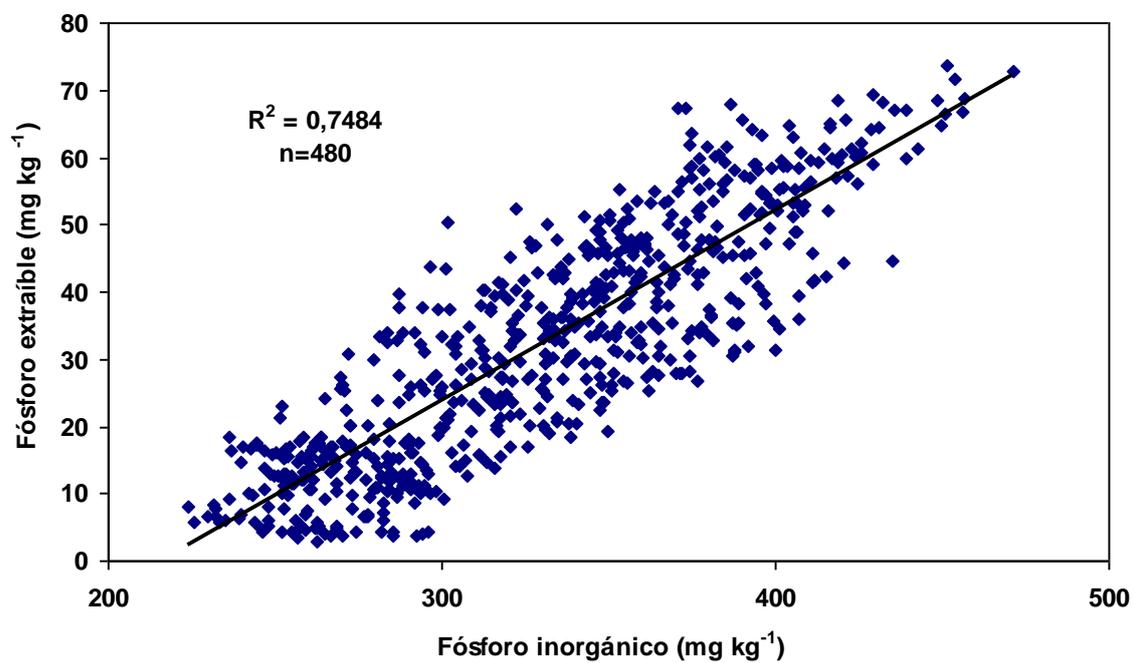


Figura 11: Relación entre el fósforo extraíble y el fósforo inorgánico del suelo. Datos correspondientes a los 2 años de estudio y todos los sistemas y profundidades evaluadas.

Formas de fósforo en la fracción gruesa del suelo

Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi) en la fracción gruesa del suelo y Po+Pi

En la profundidad 0-15 cm no se detectaron diferencias de Po+Pi entre sistemas y niveles de fertilización con N estudiados. En la capa más superficial, sólo se hallaron diferencias debidas al sistema de labranza, donde SD fue significativamente mayor a LC (Tabla 17). Este efecto de acumulación superficial, por la no remoción del suelo en SD, se vio magnificado en 2006 cuando se analizaron los suelos en 0-1 cm (Tabla 17). En la profundidad de 10-15 cm LV tuvo valores significativamente más altos de Po+Pi que SD y LC (Tabla 17).

En general, se observó que los resultados obtenidos no difieren, según se analice el suelo entero o la fracción gruesa del suelo. No obstante, Po+Pi en la fracción gruesa del suelo resultó ser más sensible para detectar las diferencias entre SD y LC, ya que la significancia en las diferencias en el corto plazo resultó ser mayor que en el suelo entero, en coincidencia otros autores que trabajaron en suelos semejantes (Suñer, 2007). Esto podría cobrar mayor relevancia cuando se estudian efectos a plazos más cortos.

En la FG, el Po presentó efectos similares a Po+Pi en 0-5 cm, pudiéndose adjudicar el incremento de Po+Pi por efecto de SD casi enteramente al Po (Tablas 23 y 24). En 0-1 cm la superioridad de Po+Pi bajo SD se debió a aumentos de alrededor de 1 kg ha⁻¹ tanto en Po como en Pi (Tablas 24 y 25). El valor más alto de Po+Pi bajo LV en 10-15 cm (Tabla 23) se debe a los valores significativamente mayores de Pi y de Po (Tabla 17) en dicho sistema de labranza y profundidad, siendo mayor el efecto del Pi (Tabla 25), sin descartar el aporte del Po (Tabla 24)..

El efecto de la acumulación superficial de los residuos y su impacto sobre las formas de P se observó en la relación Po – Pi (porcentaje de Po y Pi en el Po+Pi) en los 0-5 cm de profundidad, siendo la proporción de Po mayor bajo SD que bajo LC (Figura 12).

En el Po se presentó la única interacción entre fertilización y sistemas de labranza en 5-10 cm. A su vez el Pi registró una influencia positiva de la dosis de fertilizante nitrogenado en promedio de SD y LC en 0-1 cm, y del cincelado en 15-20 cm (Tabla 17).

Algo para destacar, es la variabilidad en los datos del Po en la FG, representados a través de su coeficiente de variación (CV). Mientras que en el suelo entero los CV fueron de 6,4; 7,0 y 10,8% en los 0-5, 5-10 y 10-15 cm respectivamente, en la FG fueron del 34,0; 37,7 y 43,6% para las mismas profundidades.

La diferencia hallada para Pi en FG entre los dos años de estudio (valores menores en 2006) y la distribución en el perfil, pone en evidencia la estrecha relación entre el aporte de residuos y esta fracción de P, demostrando una rápida transformación del material orgánico más lábil que al descomponerse aporta Pi en esta fracción de suelo.

Tabla 23: Distribución de fósforo orgánico e inorgánico (Po+Pi, kg ha⁻¹), en la fracción gruesa (100-2000 µm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N		30N	60N	
0-1	5,7	6,2	6,0	7,7	8,0	1,1
0-5	30,9	33,5	34,4	37,2	37,5	3,3
5-10	34,2	33,2	34,3	30,3	35,3	5,1
10-15	31,0	34,3	35,4	29,4	32,5	4,2
0-15	96,1	100,9	104,1	96,8	105,3	10,5
15-20	27,9	33,7	32,0	28,1	29,5	6,2

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Tabla 24: Distribución del fósforo orgánico (Po, kg ha⁻¹) en la fracción gruesa (100-2000 µm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV 30N	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N		30N	60N	
0-1	0,76	0,86	0,80	2,02	1,77	0,60
0-5	4,5	5,2	6,1	8,8	8,0	2,5
5-10	5,2	4,4	4,6	4,2	5,5	1,4
10-15	2,8	3,7	3,8	2,4	3,0	1,2
0-15	12,4	13,2	14,6	15,3	16,4	3,6
15-20	3,9	3,8	2,7	3,1	2,9	1,6

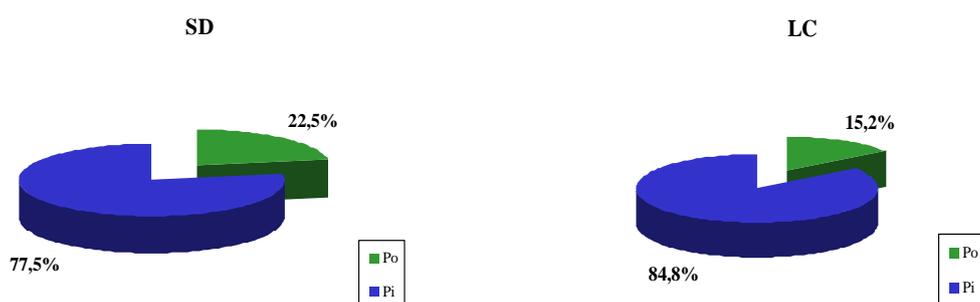
LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).

Tabla 25: Distribución del fósforo inorgánico (Pi, kg ha⁻¹) en la fracción gruesa (100-2000 µm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N.

Profundidad (cm)	LC		LV 30N	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N		30N	60N	
0-1	4,9	5,3	5,2	5,7	6,2	0,6
0-5	26,4	28,4	28,3	28,4	29,6	2,4
5-10	29,1	28,8	29,8	26,2	29,8	4,7
10-15	28,2	30,6	31,7	27,0	29,7	3,8
0-15	83,6	87,7	89,7	81,5	88,9	9,3
15-20	24,1	29,9	29,3	25,0	26,6	5,4

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Las profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm corresponden al promedio de los muestreos realizados en los años 2004 y 2006. Las profundidades 0-1 y 15-20 cm corresponden al muestreo realizado sólo en el año 2006. Los valores de la profundidad 0-15 cm corresponden a la sumatoria de las muestras extraídas a los 0-5, 5-10 y 10-15 cm (no incluye la capa 0-1 cm).



LC: Labranza convencional; SD: Siembra directa; Po: fósforo orgánico; Pi: fósforo inorgánico. Relación Po – Pi: porcentaje de Po y Pi en el Po+Pi.

Figura 12: Relación entre el Po y Pi en la fracción gruesa de los 0-5 cm de suelos en siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)

A manera de síntesis se puede decir que la no labranza evita el mezclado de los residuos en la profundidad laboreada y con esto la incorporación del P que contiene. En SD hay un bombeo permanente desde las capas inferiores por parte de las raíces que finalmente queda depositado en la superficie, y por su escasa movilidad la superficie se ve enriquecida. Debido a las características productivas de la región, en donde se reciclan entre 1,3 a 2 kg P ha⁻¹ por la incorporación de la paja de trigo (Galantini *et al.*, 2005), recién después de varios años de iniciados los ensayos es posible encontrar diferencias entre sistemas.

Por lo expuesto en este capítulo, se obtuvieron evidencias para no rechazar la hipótesis planteada, que postulaba que la SD provoca una estratificación del P, y que las formas de P asociadas a los tamaños de partícula más dinámicos fueron más sensibles a los diferentes sistemas de labranza utilizados.

CAPÍTULO III

EFFECTO DEL PISOTEO ANIMAL SOBRE LA DINÁMICA DEL ESPACIO POROSO EN SUELOS CON DISTINTOS SISTEMAS DE LABRANZA

Introducción

En la Región Semiárida Bonaerense, el efecto de las labranzas sobre las propiedades físicas ligadas a la dinámica del agua resulta de vital importancia para el uso eficiente de las escasas y variables precipitaciones. Que la lluvia penetre o escurra, sea retenida o percole, quede disponible o no, definirá el desarrollo del cultivo, la respuesta a la fertilización, el aporte de residuos y nutrientes, en suma, la productividad y la sustentabilidad del sistema. En este sentido, la sustentabilidad de los sistemas pastoriles puros depende del mantenimiento de la productividad de las pasturas. Los principales factores que las deterioran son la disminución de la fertilidad química y el efecto adverso del pisoteo animal sobre las propiedades físicas del suelo (Holt *et al.*, 1996; da Silva *et al.*, 2003).

La compactación corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido al efecto repetitivo y acumulativo producido de fuerzas externas que actúan sobre él (Bayhan *et al.*, 2002). En la actividad agropecuaria, estas fuerzas externas tienen su origen en: implementos de labranza del suelo, cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre y pisoteo de animales (Hamza y Anderson, 2005).

En condiciones naturales se pueden encontrar en el suelo, horizontes con diferentes grados de compactación, lo que se explica por las condiciones que dominaron durante la formación y la evolución del suelo. Sin embargo, bajo uso agrícola intensivo este fenómeno se acelera y

llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas cultivadas (Botta y Dagostino, 2001; Hamza y Anderson, 2005).

El pisoteo animal es la presión mecánica que ejerce el ganado sobre el suelo, el pasto y la cobertura vegetal (Silva *et al.*, 2000). Este efecto es más severo en aquellos lugares donde el pisoteo se realiza con mayor repetición (Mwendera y Saleem, 1997; Donkor *et al.*, 2002), por ejemplo en caminos y sitios de descanso, y en suelos húmedos, donde el agua actúa como lubricante favoreciendo el empaquetado íntimo entre las partículas minerales del suelo (Aliev, 2001). Por otro lado, la cobertura superficial y el tramado de raíces producen un efecto amortiguador de esta compactación (Montagu *et al.*, 1998).

La compactación del suelo se refleja en el aumento en su densidad aparente (DA), aumenta su resistencia mecánica, y destruye y debilita su estructuración, reduciendo la porosidad total (Hakansson y Lipiec, 2000). Esta reducción es el mayor efecto físico que se produce, ya que implica una menor disponibilidad tanto de aire como de agua para las raíces de las plantas. Esto modifica la actividad bioquímica y microbiológica del suelo, la que de esta forma queda sustancialmente disminuida. Al mismo tiempo, se produce una mala implantación del cultivo, las raíces presentan mayor dificultad para penetrar en el suelo, por lo tanto se reduce el acceso a los nutrientes. Todo esto se traduce en un menor desarrollo del sistema radical de las plantas y, por lo tanto, un menor desarrollo de la planta en su conjunto, lo que redundará en una menor producción (Unger y Kaspar, 1994; Elissondo *et al.*, 2001; Akinci *et al.*, 2004; Hamza y Anderson, 2005)

Los poros en el suelo tienen diferente tamaño, forma y continuidad. Estas características influyen sobre la infiltración, el almacenamiento y el drenaje del agua, el movimiento y la distribución de gases, y la facilidad con la cual las raíces pueden explorar el suelo (Iglesias *et al.* 1996; Kay y Vanden Bygaart, 2002).

Cuando se reducen los macroporos por efecto de la compactación, se produce un aumento de la escorrentía, ya que disminuye la capacidad de infiltración del agua de lluvia. Esto implica menor cantidad de agua almacenada que, a la vez, incrementa el riesgo de erosión producida por la lluvia y la pérdida de las capas superficiales de suelo, con la consiguiente pérdida de nutrientes (Quiroga *et al.*, 1999).

En los últimos años se ha registrado un aumento de la superficie cultivada con SD en la Región Semiárida Bonaerense. En esta región, el conocimiento de los efectos de este sistema de labranza sobre las propiedades físicas y la dinámica del agua resulta de vital importancia para el uso eficiente de las escasas y variables precipitaciones. Dicha eficiencia en el uso del agua de las lluvias, definirá la productividad y sustentabilidad del sistema, a través del potencial productivo de los cultivos. La información generada sobre el tema en los sistemas productivos del área es aún escasa y poco detallada. Esta deficiencia es más notoria en planteos agrícola – ganaderos (predominantes en la región), donde las dudas en relación al posible efecto del pastoreo directo por vacunos sobre las propiedades físicas del suelo, limitan las alternativas dentro de la rotación de cultivos.

Para la verificación de la hipótesis planteada para este capítulo, se proponen los siguientes objetivos:

- a) Determinar los cambios producidos por el pisoteo animal durante el cultivo de avena, sobre la densidad aparente, la porosidad total y la distribución del espacio poroso, en suelos bajo LC y SD.
- b) Comparar los resultados observados en las parcelas experimentales con lotes de producción en SD de la región sudoeste bonaerense con más de 10 años en SD.
- c) Evaluar el efecto acumulado de 3 ciclos de pastoreo animal y cosecha mecánica sobre propiedades físicas de suelos bajo LC y SD.

Resultados y discusión

A) Efecto del pisoteo animal sobre la densidad aparente, la porosidad total y la distribución del espacio poroso en LC y SD.

Los resultados del ANOVA triple mostraron interacciones dobles y triples significativas para los factores analizados, en casi todas las profundidades y variables. En la Tabla 26 se muestran los resultados del ANOVA para la densidad aparente (DA), y para las restantes propiedades físicas se adjuntan los análisis estadísticos en el Anexo II (Tablas 29 a 32).

Debido a que en la mayoría de los casos el sistema de labranza interactuó con el pisoteo animal y las variaciones anuales, LC y SD se contrastaron separadamente para cada momento, en los dos años. En forma análoga, el efecto del pisoteo se analizó dentro de cada sistema de labranza para los dos años estudiados (Tablas 27 y 28). En las Tablas 33 a 36 del Anexo II se presentan los datos de DA, PT, MP, mP y μ P de ambos sistemas de labranza (SD y LC), en los dos momentos (antes y después del pisoteo animal) y años de estudio (2004 y 2006).

Tabla 26: Densidad aparente. p-valor para los factores incluidos en un ANOVA triple (bloque dividido) para cada profundidad de muestreo.

Fuente de variación	Profundidad (cm)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
Bloque	0,302	0,230	0,066	0,028
Factor A (Año)	0,136	0,262	0,063	0,166
Factor B (Momento-Efecto del pisoteo)	0,005	0,016	0,121	0,277
A*B	0,024	0,039	0,137	0,166
Factor C (Sistema de labranza)	0,873	<0,001	0,073	0,296
A*C	0,108	0,147	0,003	0,185
B*C	0,008	<0,001	0,004	0,045
A*B*C	0,260	0,174	0,003	0,185
CV %	6,31	2,55	2,95	2,48

CV(%): Coeficiente de variación en porcentaje.

El análisis de varianza detectó efectos significativos de la interacción entre los tratamientos y los años de estudio en dos oportunidades, al comparar los sistemas de labranza (SL). Lo mismo ocurrió al comparar el momento (efecto del pisoteo) en cada SL (Tablas 27 y 28), Al comparar los SL previo al pastoreo animal, la DA fue significativamente mayor y la PT y los MP fueron significativamente menores en SD respecto a LC, en los primeros 10 cm de profundidad (Tabla 27). En 5-10 cm también se observó un menor porcentaje de mP y mayor de μ P en SD (Tabla 27). En los 10-15 cm se obtuvieron resultados diferentes en los dos años de estudio. En 2004 no hubo diferencias entre SL, mientras que en 2006 la DA fue menor y la PT y los MP mayores en LC. Esta diferencia se produjo por el efecto de las labores de preparación de la cama de siembra (rastras) en LC. Mientras que en 2004 la profundidad efectiva de las mismas llegó hasta los 10 cm, en 2006 lo hicieron hasta los 15 cm, con implicancia en las variables enumeradas. Munkholm *et al.* (2003) y Lipiec *et al.* (2006) también observaron que las labores producían un descenso en la DA del suelo.

En general, luego del pisoteo animal, no se encontraron diferencias entre los SL en las variables estudiadas. Sólo en los 0-5 cm, en el año 2006 (Tabla 27), la SD tuvo una menor

DA y mayores PT y MP que la LC. Franzluebbbers y Stuedemann (2008) también encontraron una menor DA en los 6 cm superficiales en SD, en sistemas que eran sometidos al pisoteo animal.

Al evaluar el efecto del momento, es decir cómo el pisoteo animal afectó las variables físicas analizadas en cada uno de los SL, se observó que en LC el pisoteo animal generó un aumento en la DA (Figura 13) y en el porcentaje de μP , así como una disminución de la PT y de los MP en los 0-10 cm (Tabla 28). En la Figura 14 se muestra que el pisoteo en LC produjo una pérdida de PT del 20% en dicha profundidad, siendo los MP los más sensibles en detectarla, con una pérdida mayor al 40% (Figura 15). En los 10-15 cm y en el año 2006, se vio el mismo efecto que en 0-10 cm, pero con disminución en el porcentaje de mP. En la Figura 16 se observa que, como promedio de los dos años de estudio, en LC el pisoteo generó una pérdida del 15% en la mP. Estos resultados generan interrogantes acerca de un cambio en la capacidad de almacenamiento de agua del suelo en LC, como resultado del pisoteo, ya que los mP son capaces de retener el agua disponible para las plantas y de contribuir al movimiento de la misma hacia capas más profundas (Iglesias *et al.*, 1996).

En cambio, en SD el pisoteo animal originó un aumento de la DA y los mP, y una disminución de la PT y los MP, sólo en los 0-5 cm y en el año 2004 (Tabla 28). En las Figuras 13 a 17 se ve que en SD, el pisoteo produjo menores cambios en DA y en los distintos tamaños de poros estudiados, que en LC. Estos resultados coinciden con los de otros autores, quienes observaron que el pisoteo en suelos en SD produjo cambios menores en propiedades físicas que en suelos con LC (Tollner *et al.*, 1990; Diaz-Zorita *et al.*, 2002; Clark *et al.*, 2004; Franzluebbbers y Stuedemann, 2008).

En los 15-20 cm no se vieron diferencias entre los SL, ni efectos del pisoteo animal, en los dos años de estudio (Tablas 27 y 28).

Tabla 27: Efecto del SL sobre variables físicas del suelo en dos momentos (antes y después del pisoteo animal). Valores de los años 2004 y 2006.

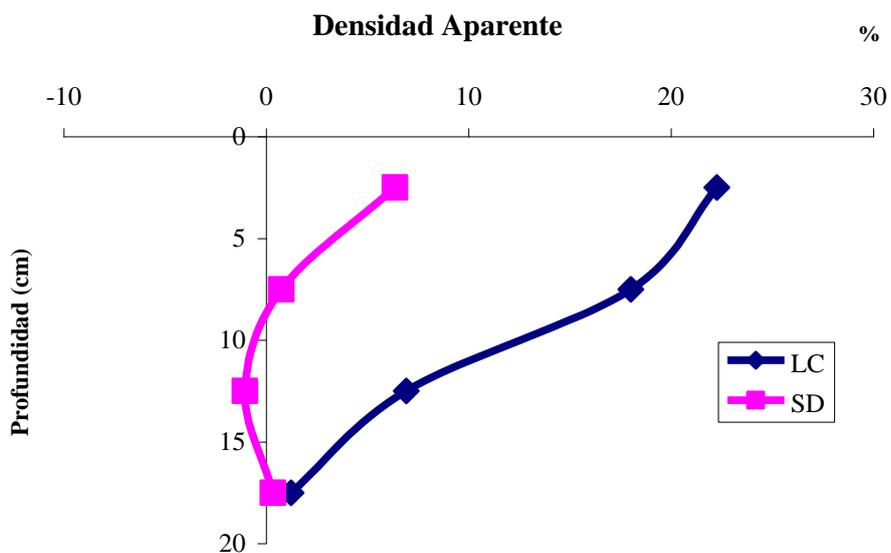
Efecto	Profundidad (cm)		Densidad Aparente		Porosidad Total		Macroporos		Mesoporos		Microporos		
			(Mg/m ³)	p	%	p	%	p	%	p	%	p	
Sistema de labranza (Antes del pisoteo)	0 - 5	SD	1,18	0,025	57,5	0,027	27,1	0,015	13,35	n.s.	14,8	n.s.	
		LC	1,08		61,5		34,4						
	5 - 10	SD	1,34	0,006	49,8	0,01	21,8	0,009	11,7	0,032	16,2	0,049	
		LC	1,15		58,9		31,2		12,8		14,9		
	10 - 15	SD	Interacción		Interacción		Interacción		11,5	n.s.	17,7	n.s.	
		LC											
	Interacción Tratamiento x Año	10 - 15 (2004)	SD	1,39	n.s.	49,17	n.s.	19,57	n.s.				
			LC										
		10 - 15 (2006)	SD	1,42	0,029	47,03	0,021	18,03	0,021				
			LC	1,23		55,14		26,45					
	15 - 20	SD	1,36	n.s.	48,01	n.s.	18,16	n.s.	11,01	n.s.	18,89	n.s.	
		LC											
Sistema de labranza (Después del pisoteo)	0 - 5	SD	Interacción		Interacción		Interacción		Interacción		Interacción		
		LC											
	Interacción Tratamiento x Año	0 - 5 (2004)	SD	1,33	n.s.	49,38	n.s.	15,99	n.s.	16,11	n.s.	17,29	n.s.
			LC										
		0 - 5 (2006)	SD	1,20	0,049	53,37	0,026	26,05	0,038	12,71	n.s.	15,15	n.s.
			LC	1,30		49,74		21,35					
	5 - 10	SD	1,35	n.s.	45,95	n.s.	18,40	n.s.	11,43	n.s.	16,95	n.s.	
		LC											
	10 - 15	SD	1,39	n.s.	44,72	n.s.	16,54	n.s.	10,34	n.s.	17,45	0,043	
		LC									18,73		
	15 - 20	SD	1,38	n.s.	45,91	n.s.	16,91	n.s.	10,48	n.s.	18,41	n.s.	
		LC											

SL: sistema de labranza; SD: siembra directa; LC: labranza convencional; n.s.: no significativo ($p > 0,05$)

Tabla 28: Efecto del pisoteo animal (comparación del momento) sobre variables físicas del suelo, en dos SL (SD y LC). Valores de los años 2004 y 2006.

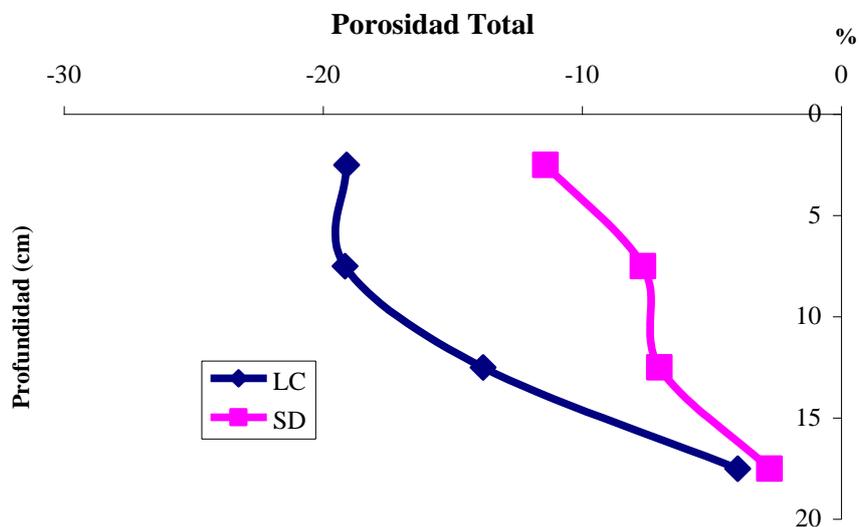
Efecto	Profundidad (cm)		Densidad Aparente		Porosidad Total		Macroporos		Mesoporos		Microporos		
			(Mg/m ³)	p	%	p	%	p	%	p	%	p	
Momento (LC)	0 - 5	Antes	1,08	0,003	61,35	0,001	34,28	0,001	13,98	n.s.	14,31	0,024	
		Después	1,33		49,39		18,86				16,14		
	5 - 10	Antes	1,15	0,005	59,57	0,002	31,2	0,001	12,23	n.s.	14,86	0,027	
		Después	1,35		49,18		18,94				16,99		
	10 - 15	Antes	Interacción		Interacción		Interacción		Interacción		Interacción		
		Después											
	Interacción Tratamiento x Año	10 - 15 (2004)	Antes	1,40	n.s.	49,07	0,007	19,36	0,045	11,26	n.s.	19,31	n.s.
			Después			45,81		15,33					
		10 - 15 (2006)	Antes	1,23	0,028	55,14	0,003	26,45	0,012	12,56	0,04	16,64	n.s.
			Después	1,40		43,56		17,08		9,33			
	15 - 20	Antes	1,39	n.s.	46,22	n.s.	16,75	n.s.	10,41	n.s.	19,07	n.s.	
		Después											
Momento (SD)	0 - 5	Antes	Interacción		Interacción		Interacción		Interacción		15,8	n.s.	
		Después											
	Interacción Tratamiento x Año	0 - 5 (2004)	Antes	1,18	0,043	57,93	0,008	27,21	0,001	13,45	0,016		
			Después	1,32		49,02		15,66		15,85			
		0 - 5 (2006)	Antes	1,20	n.s.	55,52	n.s.	27,45	n.s.	12,97	n.s.		
			Después										
	5 - 10	Antes	1,35	n.s.	47,91	n.s.	21,75	0,015	11,49	n.s.	16,54	n.s.	
		Después					17,87						
	10 - 15	Antes	1,39	n.s.	48,15	0,003	18,90	0,016	10,81	n.s.	17,58	n.s.	
		Después			44,76		16,88						
	15 - 20	Antes	1,36	n.s.	47,19	n.s.	18,17	n.s.	10,83	n.s.	18,24	n.s.	
		Después											

SL: sistema de labranza; SD: siembra directa; LC: labranza convencional; n.s.: no significativo ($p > 0,05$)



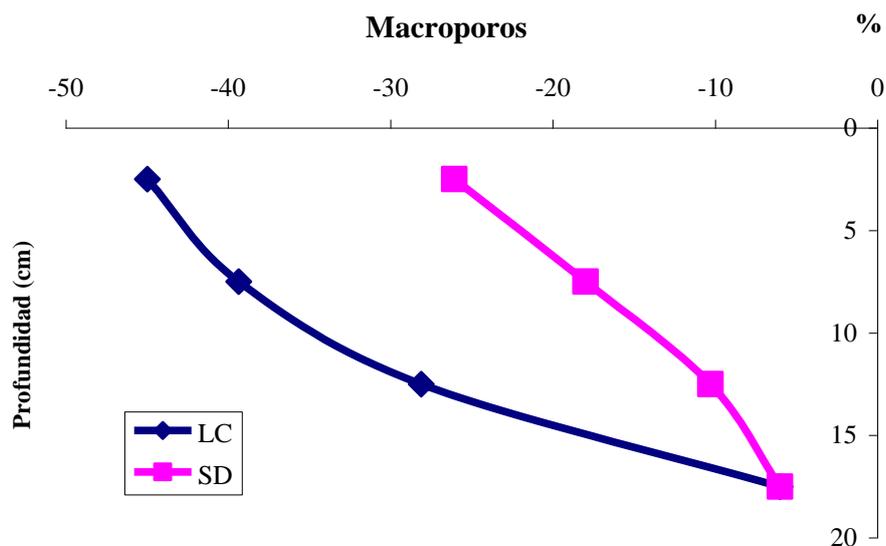
SD: siembra directa; LC: labranza convencional.

Figura 13: Cambios (%) en la densidad aparente por efecto del pisoteo animal en SD y LC. Valores promedio de 2 años de estudio.



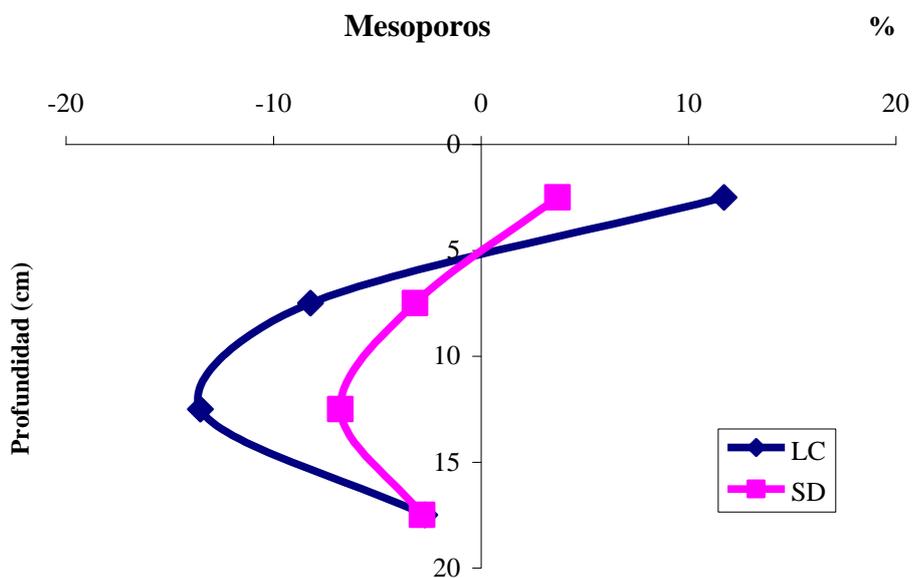
SD: siembra directa; LC: labranza convencional.

Figura 14: Cambios (%) en la porosidad total por efecto del pisoteo animal en SD y LC. Valores promedio de 2 años de estudio.



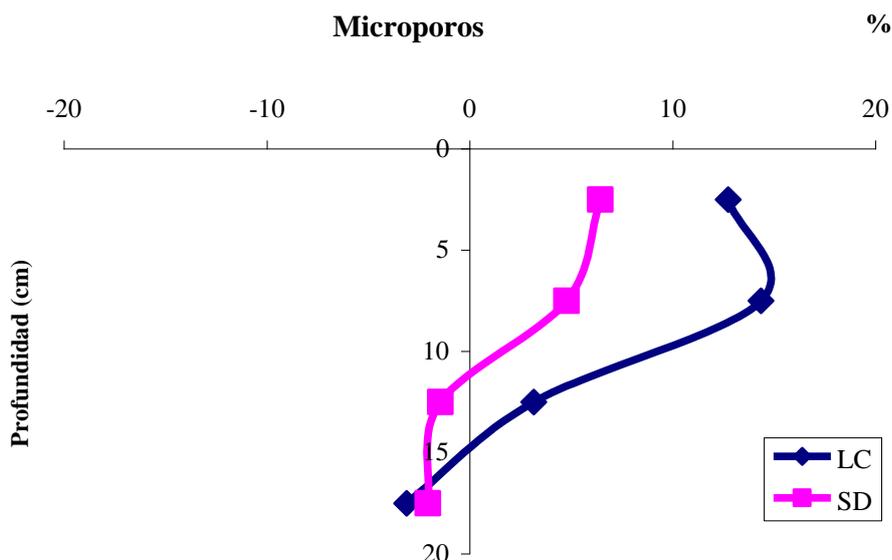
SD: siembra directa; LC: labranza convencional.

Figura 15: Cambios (%) en la macroporosidad por efecto del pisoteo animal en SD y LC. Valores promedio de 2 años de estudio.



SD: siembra directa; LC: labranza convencional.

Figura 16: Cambios (%) en la mesoporosidad por efecto del pisoteo animal en SD y LC. Valores promedio de 2 años de estudio.



SD: siembra directa; LC: labranza convencional.

Figura 17: Cambios (%) en la microporosidad por efecto del pisoteo animal en SD y LC. Valores promedio de 2 años de estudio.

El laboreo del suelo previo a la siembra, en LC, ocasionó el aumento de la PT y la disminución de la DA, asociado a un aumento de la MP, respecto a la SD. El pisoteo animal produjo cambios, disminuyendo la PT, los MP y aumentando la DA y los μP , Estos son de mayor magnitud en LC que en SD (Figuras 13 a 17), indicando una mayor estabilidad en la porosidad en este último SL. En este sentido, los perfiles de DA y PT de la SD fueron más homogéneos que los de LC (Tablas 33 a 36, Anexo II). Los efectos negativos del pisoteo llegaron a una mayor profundidad en LC, coincidiendo con lo hallado en muestreos previos realizados en las mismas parcelas por Arranz *et al.* (2004). Se puede agregar que en ningún caso la DA alcanzó niveles críticos como para el desarrollo del sistema radical (Venanzi *et al.*, 2004). En cuanto a los MP, los valores obtenidos, tampoco llegaron a ser críticos para el desarrollo de las plantas. Sparling y Schipper (2002) encontraron que valores inferiores al 10% de MP pueden estar ligados con problemas de infiltración reducida, escasa aireación para la actividad biológica del suelo (incluido las raíces) y problemas de desnitrificación.

Generalmente los bioporos de canales de lombrices, insectos de suelo y raíces son más continuos, menos tortuosos y más estables que los macroporos creados por la labranza (Chan, 2001), resultando más efectivos para el movimiento del agua y del aire, así como para el crecimiento de nuevas raíces (Eynard *et al.*, 2004). El efecto de la macroporosidad sobre el movimiento del agua ha sido desde siempre muy reconocido. A pesar de que la LC puede incrementar el volumen de los poros grandes, la continuidad de dichos poros puede ser destruida.

En SD, en los 10-15 cm, el pisoteo provocó una disminución en la PT, sin cambios en la DA. Sasal *et al.* (2006) observaron una disposición preferencial horizontal de los poros en SD, que limita el pasaje del agua. En este estudio, el llenado de todos los poros cuando los cilindros con las muestras son colocados a saturar con agua, podría estar afectado por la presencia de poros ocluidos. Esto es, poros que al verse interrumpida su continuidad no son capaces de incorporar agua. Es decir, dichos poros se convierten en no funcionales. De esta forma, podría en parte explicarse dichas diferencias en PT.

B) Efecto del pisoteo animal sobre propiedades físicas del suelo en lotes de producción.

En esta parte del trabajo se buscó corroborar los resultados obtenidos en parcelas experimentales, estudiando el efecto del pisoteo animal (tratamiento) en lotes de producción (con sistemas agrícola-ganaderos) que tuvieron más de 10 años en SD.

En la Tabla 29 se muestran los resultados de la prueba t de medias apareadas. El pisoteo animal no provocó cambios en DA, PT y en los distintos tamaños de poros, en las tres profundidades estudiadas (0-5, 5-10 y 10-15 cm). Esto concuerda con lo hallado en las parcelas experimentales, confirmando la estabilidad de la porosidad en SD, en sistemas de

producción sometidos al pisoteo. En la Tabla 37 (Anexo II) se detallan los valores de las variables estudiadas, en los dos momentos (antes y después del pisoteo). Quiroga *et al.* (2009), trabajando en la Región Semiárida Central de la Argentina y en lotes de producción con 14 años de antigüedad en SD, encontraron resultados similares. Esto es, que el pisoteo animal no generó cambios en la DA, en los 20 cm superficiales del suelo.

Tabla 29: p-valor para los factores incluidos en la prueba t de medias apareadas, en cada profundidad de muestreo. Campo de productores en SD. Año 2005.

Profundidad (cm)	Fuente de variación	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
0 – 5	Tratamiento	0,783	0,173	0,226	0,335	0,667
	CV (%)	8,79	7,87	15,12	9,80	9,44
5 – 10	Tratamiento	0,548	0,289	0,625	0,188	0,505
	CV (%)	1,89	4,39	13,22	4,26	1,92
10 - 15	Tratamiento	0,195	0,395	0,767	0,154	0,405
	CV (%)	4,16	2,87	10,39	2,99	4,33

CV (%): Coeficiente de variación en porcentaje; SD: Siembra directa; Tratamiento: Pisoteo animal.

C) Efecto acumulado de 3 ciclos de pastoreo animal y cosecha mecánica sobre propiedades físicas de suelos bajo LC y SD.

Al comparar las parcelas con y sin pisoteo animal en LC, no se encontraron diferencias en DA, PT y los distintos tamaños de poros, en ninguna de las profundidades evaluadas (Tabla 30). Debido al efecto de las labores realizadas para implantar la avena en el año 2006, las franjas pastoreadas y no pastoreadas fueron emparejadas respecto a las variables físicas estudiadas, en los 0-15 cm (profundidad de laboreo). Por debajo de los 15 cm, el pisoteo produjo un aumento de la DA de 0,06 Mg m⁻³ y la disminución del 2% en la PT (Tabla 38, Anexo II), aunque estadísticamente las mismas no fueron significativas.

En SD, al no removerse el suelo, se pudo ver más claramente el efecto acumulado del pisoteo sobre las propiedades físicas. Luego de 8 años de iniciada la experiencia y 3 ciclos de pastoreo directo con animales, se observó que las parcelas que tuvieron pisoteo animal directo, mostraron una DA significativamente mayor y PT y MP significativamente menores que las parcelas sin pisoteo animal, en los 5-15 cm, sin encontrar diferencias en mP y μ P en ninguna profundidad (Tabla 30). En ningún caso se alcanzaron valores de DA que comprometieran el crecimiento radical (Venanzi *et al.*, 2004). El aumento de la DA por debajo de los 5 cm, en SD, también fue visto en otros trabajos, los que evaluaban el efecto del pisoteo por más tiempo que el pastoreo anual de un verdeo invernal (Franzluebbbers y Stuedemann, 2008; Krüger *et al.*, 2008).

El nulo efecto del pisoteo en los 0-5 cm sobre propiedades físicas del suelo, había sido informado por una gran cantidad de autores (Tollner *et al.*, 1990; Terashima *et al.*, 1999; Ferrero y Lipiec, 2000; Clark *et al.*, 2004; Franzluebbbers y Stuedemann, 2008; Quiroga *et al.*, 2009). Esta situación se manifiesta principalmente cuando el muestreo se realiza luego de 6 meses del pisoteo animal (Agostini, 2008). En este estudio, el muestreo se efectuó 18 meses después del último pisoteo. En cambio, Diaz-Zorita *et al.* (2002) observaron aumentos en la DA por efecto del pisoteo. Esta diferencia podría estar asociada al desarrollo de raíces de las plantas, que junto con la actividad microbiana, en las capas más superficiales podrían ser factores que contribuirían a restablecer la buena condición física con posterioridad al pastoreo.

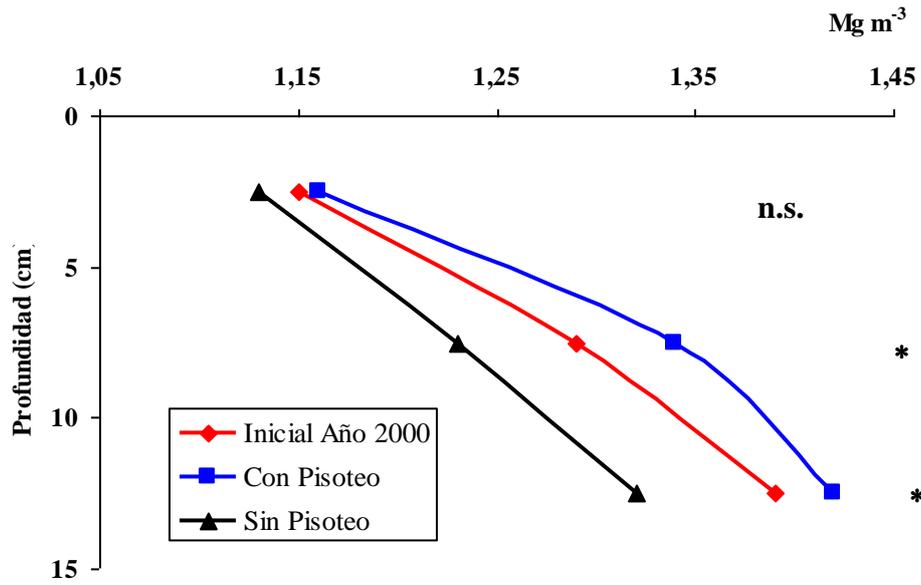
En los 15-20 cm y en SD, el pisoteo no produjo cambios significativos en las variables físicas, y se observó que disminuyó la PT y aumentó la DA en una magnitud marcadamente menor a la cual lo hizo en la LC (Tablas 38 y 39, Anexo II), pudiendose inferir que en LC, los efectos negativos del pisoteo alcanzan a capas más profundas. Estos resultados coinciden con los de Arranz *et al.* (2004).

Para estudiar la evolución de la DA desde el inicio del ensayo, se consideraron los valores en el año 2000, antes de que los tratamientos sufrieran el pisoteo de los animales: 1,15, 1,29 y 1,39 Mg m⁻³ en las profundidades de 0-5, 5-10 y 10-15 cm, respectivamente (Iglesias *et al.*, 2001). En la Figura 18 se observa que la DA de las parcelas pastoreadas no difirió de los valores originales (año 2000), por lo que se podría suponer que en el mediano plazo, el pisoteo no afectaría la DA en SD y, por lo tanto, sería factible el desarrollo de un planteo agrícola-ganadero bajo dicho sistema de labranza. En la misma figura se ve que las parcelas sin pisoteo disminuyeron 0,06 y 0,07 Mg m⁻³ su DA (en relación al año 2000), en 5-10 y 10-15 cm, respectivamente, siendo ésta caída la responsable en mayor grado de las diferencias encontradas entre parcelas con y sin pastoreo, en el año 2006. Las raíces de los cultivos y la actividad de los microorganismos generarían un aumento de la porosidad, que resulta ser más estable al no laborear el suelo (Sasal y Andriulo, 2005).

Tabla 30: Efecto acumulado de tres ciclos de pastoreo animal sobre variables físicas del suelo, bajo SD y LC. Año 2006.

Profundidad (cm)	Sistema de Labranza y Manejo Ganadero		Densidad Aparente (Mg/m ³)		Porosidad Total %		Macroporos %		Mesoporos %		Microporos %	
				p		p		p		p		p
0-5 cm	LC	Con pisoteo	1,10	n.s.	60,19	n.s.	32,93	n.s.	13,11	n.s.	14,16	n.s.
		Sin pisoteo										
5-10 cm	LC	Con pisoteo	1,13	n.s.	59,87	n.s.	31,42	n.s.	13,88	n.s.	14,57	n.s.
		Sin pisoteo										
10-15 cm	LC	Con pisoteo	1,24	n.s.	54,63	n.s.	25,23	n.s.	12,63	n.s.	16,77	n.s.
		Sin pisoteo										
15-20 cm	LC	Con pisoteo	1,34	n.s.	48,27	n.s.	18,31	n.s.	10,76	n.s.	19,2	n.s.
		Sin pisoteo										
0-5 cm	SD	Con pisoteo	1,15	n.s.	57,75	n.s.	28,68	n.s.	14,20	n.s.	14,87	n.s.
		Sin pisoteo										
5-10 cm	SD	Con pisoteo	1,34	0,027	50,67	0,042	21,56	0,028	12,02	n.s.	16,69	n.s.
		Sin pisoteo	1,23		53,02		24,75					
10-15 cm	SD	Con pisoteo	1,42	0,018	47,03	0,049	18,03	0,015	11,52	n.s.	17,65	n.s.
		Sin pisoteo	1,32		50,11		20,78					
15-20 cm	SD	Con pisoteo	1,35	n.s.	48,29	n.s.	18,27	n.s.	11,35	n.s.	18,69	n.s.
		Sin pisoteo										

LC: labranza convencional; SD: siembra directa; n.s.: no significativo (p>0,05).



Datos del momento inicial (año 2000) tomado de Iglesias *et al.*, 2001. SD: siembra directa.

Figura 18: Densidad aparente en parcelas con y sin pisoteo animal, en SD (año 2006) y antes del pisoteo de las parcelas (año 2000).

CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

Este trabajo de tesis ha pretendido enfocar algunos de los aspectos más importantes que son modificados por el sistema de labranza y la dosis de fertilización con N utilizado, estudiando parámetros físicos y químicos del suelo. Se analizó el efecto de ambas prácticas de manejo sobre el C y el N en el suelo como en sus fracciones fina y gruesa. También se evaluó el impacto sobre distintas formas de P (extractable, orgánico e inorgánico) en las distintas fracciones del suelo, considerando que luego del C y el N, el P es el otro elemento que condiciona la productividad de los sistemas de la región en estudio. En cuanto a las propiedades físicas, se estudió el efecto del pisoteo animal sobre la DA, la PT y los distintos tamaños de poros en SD y LC, en un ciclo, y después de tres ciclos, de pastoreos de avena.

La SD al no remover el suelo en las labores previas a la siembra, acumula los residuos de los cultivos en superficie. Esto provocó un aumento del COT, el COM y el COP en los 0-5 cm respecto a LC y LV. Por debajo, se observó un aumento del COP en los 5-10 cm en LC, y en los 15-20 cm en LV, asociado también a la profundidad de incorporación de los residuos. Respecto al COM y por debajo de los 5 cm, no se observaron diferencias entre sistemas de labranza. En cuanto al efecto de la dosis de N, provocó un aumento del C (principalmente de la fracción más lábil, el COP) y en la capa más superficial del suelo.

En cuanto al efecto de las dos variables de estudio sobre el P en el suelo, en general no se observaron diferencias entre sistemas de labranza en los 0-15 cm, salvo en el Po de la fracción gruesa donde SD fue significativamente mayor a LC. Esta fracción fue más sensible para detectar los cambios de corto plazo, mostrando diferencias en el Po relacionadas con la profundidad de incorporación de los residuos en cada sistema de labranza. El efecto más notorio entre los sistemas de labranza fue la estratificación que produjo SD, donde

aumentaron todas las formas de P en superficie y disminuyeron en profundidad respecto a LC, que mostró una distribución uniforme en los 0-15 cm.

Cuando se estudió el efecto del pisoteo animal sobre parámetros físicos del suelo en SD y LC, antes del pastoreo se observó una menor DA y mayor PT en LC como resultado de las labores de preparación de la cama de siembra. El pisoteo animal provocó un aumento en la DA y disminución de la PT mayor en LC que en SD, asociado principalmente a una mayor pérdida de MP. El pisoteo produjo una pérdida del 38% de los MP de la profundidad 0-15 cm en LC y del 19% en SD. Otro efecto del pisoteo fue que aumentó la cantidad de microporos en LC, mientras que en SD no hubo cambios. En ningún caso la DA alcanzó niveles críticos para el desarrollo del sistema radical. Esta mayor estabilidad de los parámetros físicos en SD, fue corroborada estudiando cinco lotes de producción que poseían más de 10 años en SD. En los mismos, el pisoteo animal no produjo cambios en la DA, PT y los distintos tamaños de poros, en el ciclo de un verdeo invernal.

Luego de 8 años de ensayo, se evaluó el efecto de largo plazo generado por el pisoteo. En LC, las labores enmascararon sus efectos en la profundidad estudiada. En SD se hallaron dos resultados importantes para la región en la que se llevó adelante el estudio. Por un lado, en las parcelas que sufrieron pisoteo, no se vieron diferencias en DA y PT respecto a los valores de inicio del ensayo, demostrando que es factible el desarrollo de un sistema ganadero en SD bajo las condiciones del ensayo. Por otro lado, en las parcelas que no fueron pisoteadas se observó una disminución de la DA y un aumento de la PT entre los 5-15 cm. Este efecto podría ser beneficioso en lotes con algún grado de compactación.

Al relacionar las variables de C, P y las físicas, estudiadas en este trabajo, se observó una importante relación entre el COT con el P_o y P_o+P_i , en el suelo entero (Figuras 1 y 2, Anexo II), entre el COP con el N-MOP y el P_o de la fracción gruesa (Figuras 3 y 4, Anexo II), y entre el COT y COP con la macroporosidad del suelo (Figuras 5 y 6, Anexo II). Estas

relaciones fueron más importantes en SD que en LC, y de las dos fracciones de C, el COP fue más sensible para detectar las variaciones. La sensibilidad del COP y estas fuertes relaciones, principalmente en SD, podrían sugerir el uso de dicha fracción de C como un indicador temprano de los cambios producidos por las prácticas de manejo, y a través del mismo intuir cambios en la misma dirección de fracciones de N, P y atributos físicos.

Del estudio de la dinámica de algunas propiedades de estos suelos, se concluye que para las condiciones ensayadas, el sistema de labranza no generó cambios en el contenido total de C, N y P del suelo en los 0-15 cm, pero produjo una estratificación de los mismos en los sistemas sin remoción. Por otra parte, la fracción gruesa del suelo demostró ser más sensible para detectar los cambios en el corto plazo, en los tres elementos analizados. En cuanto a la fertilización nitrogenada, dosis crecientes también provocaron su aumento solamente en la capa más superficial.

Respecto al estudio de las propiedades físicas, el pisoteo animal causó menores cambios de DA y PT en SD, que en LC, mostrando ser más estable. Después de tres ciclos de pisoteo no hubo cambios en la DA en SD, concluyendo que es factible la inclusión de la ganadería en SD.

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini M.A. 2008. Compactación por pisoteo animal en planteos de producción mixta bajo siembra directa. Tesis de Magister Scientiae, Facultad de ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce.
- Akinci I., E. Cakir, M. Topakci, M. Canakci and O. Imam. 2004. The effect of subsoiling on soil resistance and cotton yield. *Soil Till. Res.* 77: 203-210.
- Al Kaisi M.M. and X. Yin. 2005. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotation. *J. Environ. Qual.* 34:437-445.
- Aliev K. 2001. Current problems with regard to mechanization and greening of farming in Azerbaijan. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhozyaistvennyi Zhurnal* 5: 57-61.
- Amelung W. y W. Zech. 1999. Minimization of organic matter disruption during particle size fractionation of grassland epipedons. *Geoderma* 92: 73-85.
- Amos B., T. J. Arkebauer and J.W. Doran. 2005. Soil surface fluxes of greenhouse gases in an irrigated maize-based agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:387-395.
- Andriulo A.E., Galantini J.A., Iglesias J., Rosell R. y Glave A. 1988. Eficiencia del uso de agua en diferentes sistemas de producción con trigo en la región semiárida bonaerense. *Actas del XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Corrientes* 12-16 septiembre, 219-220.
- Andriulo A., J. A. Galantini, C. Pecorari y E. Torioni. 1990. Materia orgánica del suelo en la región pampeana. I. Un método de fraccionamiento por tamizado. *Agrochimica* XXXIV (5-6) 475-489.
- Angers D.A., M.A. Bolinder, M.R. Carter, E.G. Gregorich, C.F. Drury, B.C. Liang, R.P. Voroney, R.R. Simard, R.G. Donald, R.P. Beyaert and 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.

- Arranz C., J.A. Galantini, J.O. Iglesias, H. Krüger y S. Venanzi. 2004. Sistemas de labranza: efecto del pastoreo animal sobre la distribución del tamaño de poros. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Resumen pág. 43, CD-ROM 10 págs.
- Bajracharya R.M., R. Lal and J.M. Kimble. 2000. Diurnal and seasonal CO₂-C flux from soil as related to erosion phases in central Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:286–293.
- Baker J.M., T.E. Ochsner, R.T. Venterea and T.J. Griffis. 2007. Tillage and soil carbon sequestration-what do we really know? *Agric. Ecosyst. Environ.* 118: 1-5.
- Balesdent J., C. Chenu and M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53: 215-230.
- Bayer C., J. Mielniczuk, L. Martin-Neto and P.R. Ernani. 2002. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. *Plant Soil* 238:133-140.
- Bayer C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, A. Pavinato and J. Dieckow. 2005. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Till. Res.* 86: 237-245.
- Bayhan Y., B. Kayisoglu and E. Gonulol. 2002. Effect of soil compaction on sunflower growth. *Soil Till. Res.* 68: 31-38.
- Beare M.H., M.L. Cabrera, P.F. Hendrix and D.C. Coleman. 1994. Aggregate protected and unprotected organic matter pools in conventional and no tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 787-795.
- Beck M. and P. Sánchez. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic Paleudult. *Soil Sci.* 34: 1424-1431.
- Bhattacharyya R., V. Prakash, S. Kundu and H.S. Gupta. 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil Till. Res.* 86: 129–140.
- Blake G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk Density p.: 363-375. In: A. Klute (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Bonde T.A., B.T. Christensen and C. Cerri. 1992. Dynamics of soil organic matter as reflected by natural ¹³C abundance in particle size fractions of forest and cultivated oxisols. *Soil Biol. Biochem.* 24: 275-277.

- Botta G. y C. Dagostino. 2001. Compactación del suelo producida por el tráfico agrícola en Forrajes y Granos *Agribusiness Journal*. Serie de producción Agrícola. Tomo 2.
- Bray R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner J.M. 1996. Nitrogen-Total. *Methods of Soil Analysis*. 1085-1123 In: Sparks DL (ed). *Chemical Methods. Part 3. Am.Soc.Agron.Inc.,Madison, Wisconsin,USA*.
- Bullock D. 2000. Soil testing thoughts about precision and no-till production. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. Resumen pág. 43, CD-ROM 10 págs.
- Buschiazzo D.E., G.G. Hevia y E.N. Hepper, 1990. Variación de la adsorción de fósforo y parámetros edáficos en una climosecuencia de suelos de la región semiárida pampeana central. *Ci. Suelo* 8(2): 119 - 126.
- Calviño P., H.E. Echeverría y M. Redolatti. 2000. Estratificación de fósforo en el suelo y diagnóstico de la fertilización fosfatada en trigo en siembra directa. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. CD-ROM 10 págs.
- Cambardella C.A. and E.T. Elliott. 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma* 56: 449-457.
- Carter M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94:38-47.
- Chan K.Y. 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity implications for functioning in soils. *Soil Till. Res.* 57:179-191.
- Chater M. and G.E. Mattingly. 1980. Changes in organic phosphorus contents of soil from long continued experiments at Rothamsted and Saxmundham. Rothamsted Experiment Station Report for 1979, Part 2, pp. 41-61.
- Cheshire M.V. and C.M. Mundie. 1990. Organic matter contributed to soil by plant roots during the growth and decomposition of maize. *Plant Soil* 121: 107-114.
- Christensen B.T. 1987. Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19(4): 429-435.

- Clark J.T., J.R. Russell, D.L. Karlen, P.L. Singleton, W.D. Busby and B.C. Peterson. 2004. Soil surface property and soybean yield response to corn stover grazing. *Agron. J.* 96: 1364-1371.
- Coleman D.C., J.M. Oades and G. Uehara. 1989. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. NIFTAL. Hawaii. 249 p.
- Curtin D., H. Wang, F. Selles, B.G. McConkey and C.A. Campbell. 2000. Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow-wheat rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2080–2086.
- Dalal R.C. and R.J. Meyer. 1986. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I Overall Changes in soil properties and trends in winter cereal yields. *Aust. J. Soil Res.* 24: 265-279.
- Dengens B.P., L.A. Schipper, G.P. Sparling and M. Vojvodic-Vukovic. 2000. Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities. *Soil Biol. and Biochem.* 32: 189-196.
- Diaz-Zorita M., G.A. Duarte and J.H. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable productive in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Diez A., E. Zamuner, L. Picone y 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. AACs. Mar del Plata, Buenos Aires.
- Diovisalvi N.V., G.A. Studdert, G.F. Dominguez y M.J. Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánico y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua con dos sistemas de labranza.. *Ci.Suelo* 26(1): 1-11.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, U.N. de Córdoba, Argentina.
- Domínguez G.F. 2004. Materia orgánica particulada: su relación con dos sistemas de labranza y con el rendimiento de maíz en un molisol de Balcarce. Tesis de Magister Scientiae, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce.

- Domínguez G.F., N.V. Diovisalvi, G.A. Studdert and M.G. Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102: 93-100.
- Donkor N.T., J.V. Gendir, R.J. Hudson, E.W. Bork, D.S. Chanasyk and M.A. Naeth. 2002. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 82: 1-8.
- Dormaer J.F. 1983. Chemical properties of soil and water-stable aggregates after sixty-seven years of cropping to spring wheat. *Plant Soil* 75: 51-61.
- Duxbury J.M. 1994. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fert. Res.* 38: 151-163.
- Eiza M.J., N. Fioriti, G.A. Studdert y H.E. Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ci.Suelo* 23: 59-67.
- Elissondo E., J.L. Costa, E. Suero, L.P. Fabrizzi y F. García. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. *Ci. Suelo* 19: 11-19.
- Elliott E.T. and C.A. Cambardella. 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosystems Environ.* 34: 407-419.
- Elliott J.A. and A.A. Efetha. 1999. Influence of tillage and cropping system on soil organic matter, structure and infiltration in a rolling landscape. *Can. J. Soil Sci.* 79: 457-463.
- Eynard A., T. E. Schumacher, M. J. Lindstrom y D. D. Malo. 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1927-1934.
- Fabrizzi K.P., A. Moron and F.O. García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1831-1841.
- Fernández L.A., P. Zalba, M. Gómez y M. Sagardoy. 2005. Bacterias solubilizadoras de fosfato inorgánico aisladas de suelos de la región sojera. *Ci. Suelo* 23: 31-37.
- Ferreras L.A., J.L. Costa, F.O. Garcia and 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.

- Ferrero A. and J. Lipiec. 2000. Determining the effect of trampling on soils in hillslope woodlands. *Int. Agrophys.* 14: 9-16.
- Fortin M.C., P. Rochette and E. Pattey. 1996. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1541–1547.
- Franzluebbers A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66: 95-106.
- Franzluebbers A.J. 2005. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. Review. *Soil Till. Res.* 83:120-147.
- Franzluebbers A.J. and M.A. Arshad. 1996. Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1422–1427.
- Franzluebbers A.J. and J.A. Stuedemann. 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil Till. Res.* 100: 141-153.
- Friend M.T. and H.F. Birch. 1960. Phosphate response in relation to soil tests and organic phosphorus. *J. Agric. Sci.* 54:341-347.
- Frossard E., L.M. Condron, A. Oberson, S. Sinaj and J.C. Fardeau. 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 29:15-23.
- Galantini J.A. 1994. Modelos de simulación de la dinámica de la materia orgánica en suelos de la región semiárida bonaerense. Tesis de Magíster en Ciencias Agrarias. UNS. Bahía Blanca. 72 págs.
- Galantini J.A. 2001. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA-INTA)* 30 (1): 125-146.
- Galantini J.A. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Manual “Tecnología en Análisis de Suelos: Alcances a laboratorios agropecuarios” (Eds. L. Marban y S. Ratto) de la AACS. Capítulo IV parte 2, 95-106.
- Galantini J.A. and R.A. Rosell. 1997. Organic fractions, N, P, and S changes in a semiarid Haplustoll of Argentine under different crop sequences. *Soil Till. Res.* 42: 221-228.

- Galantini J.A. and R.A. 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.A. y J.O. Iglesias. 2007. Capacidad de secuestro de carbono y efecto de las prácticas agronómicas en suelos de la región pampeana de Argentina. En: *La captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos*. J.F. Gallardo Lancho (Ed.): 169-182.
- Galantini J.A., A.M Miglierina, R.A Rosell, J.O. Iglesias y M.R. Landriscini. 1996. Distribución del CO y Nt en fracciones granulométricas de un Hapludoll bajo dos sistemas de labranza. XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Santa Rosa (LP), pág. 57-58.
- Galantini J.A, R.A. Rosell, G. Brunetti y N. Senesi. 2002. Dinámica y calidad de las fracciones orgánicas de un Haplustol durante la rotación trigo-leguminosas. *Ci. Suelo* 20(1): 17-26.
- Galantini J.A., N. Senesi, G. Brunetti and R.A. 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.A., L. Suñer y H. Kruger. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. *Revista Investigaciones Agropecuarias RIA (INTA)* 34: 13-31.
- Galantini J.A., M.R. Landriscini y C. Hevia. 2007a. Contenido y calidad de la materia orgánica particulada del suelo. En “La siembra directa en los sistemas productivos del S y SO Bonaerense”, *Revista Técnica Especial AAPRESID, CIC, CERZOS y UNS*. Eds. Galantini *et al.* 36-40.
- Galantini J.A., L. Suñer y J.O. Iglesias. 2007b. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense: efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. *Revista Investigaciones Agropecuarias RIA (INTA)* 36 (1): 63-81.
- García F. 2001. Balance de fósforo en suelos de la región pampeana, *INPOFOS*. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 9: 1-3.

- García F., L. Picone y A. Berardo. 2006. Fósforo. Capítulo En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. H.E. Echeverría y F. García (Eds). Editorial INTA, BA, Argentina. Pag. 99-121.
- Giuffré L. 2005. El fósforo como elemento crítico. En: Manual "Tecnología en Análisis de Suelos: Alcances a laboratorios agropecuarios" (Eds. L. Marban y S. Ratto) de la AACs. Pag. 147-175.
- Giuffré L., M.S. Zubillaga, O.S. Heredia y F. Missart. 1998. Mineralización de fósforo en molisoles pampeanos. *Ci. Suelo* 16:99-102.
- Goldchin A., J.M. Oades, J.O. Skjemstad and P. Clarke. 1995. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ^{13}C natural abundance, pyrolysis and ^{13}C NMR spectrometry in density fractions of an oxisol under forest and pasture. *Aust. J. Soil Res.* 33: 59-76.
- Gómez L.A., V. Nakama y C. Puriccelli. 1981. Carta detallada de suelos de la estación experimental agropecuaria Bordenave. Escala 1:10000.
- Gosling P. and M. Shepherd. 2005. Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium. *Agric. Ecosystems Environ.* 105:425-432.
- Grant R.F. 1997. Changes in soil organic matter under different tillage and rotation: Mathematical modeling in ecosys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1159-1175.
- Griffith D.R., J.V. Mannering and W.C. Moldenhauer. 1977. Conservation tillage in the Eastern Corn Belt. *J. Soil Water Conserv.* 32: 20-28.
- Guérif J. 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.* 61:13-32.
- Hakansson I. and 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.
- Halstead R.L. and Mc Kercher R.B. 1975. Biochemistry and cycling of phosphorus. In: E. A. Paul and A. D. Mc Laren (eds.). *Soil Biochemistry*, Vol 4, Marcel Dekker, New York, pp.31-63.

- Halvorson A.D., G.A. Peterson and C.A. Reule. 2002a. Tillage system and crop rotation effects on dryland crop yields and soil carbon in the central Great Plains. *Agron. J.* 94:1429-1436.
- Halvorson A.D., B.J. Wienhold and A.L. Black. 2002b. Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 906–912.
- Hamza M.A. and W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Hassink J., L.A. Bowman, K.B. Zwart, I. Bloem and L. Brussard. 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma* 57: 105-128.
- Haynes R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- Haynes R.J. and M.H. Beare. 1996. Aggregation and organic matter storage in meso-thermal, humid soils. In: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Advances in Soil Science. Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. CRC Lewis, Boca Raton, pp. 213-262.
- Hevia G.G., D.E. Buschiazzo, E.N. Hepper, A.M. Urioste and E.L. Antón. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma* 116:265-277.
- Holanda F.S.R., D.B. Mengel, M.B. Paula, J.G. Carvaho and J.C. Bertoni. 1998. Influence of crop rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29: 2383-2394.
- Holt J.A., K.L. Bristow and J.G. McIvor. 1996. The effects of grazing pressure on soil animals and hydraulic properties of two soils in semi-arid tropical Queensland. *Aust. J. Soil Res.* 34: 69-79.
- Iglesias J.O., J. Galantini, R. Rosell, A. M. Migliarina y M. Landriscini. 1996. Cambios en la distribución del espacio poroso de un suelo Entic Haplustoll con diferentes secuencias de cultivos de la región semiárida de Argentina. *Agricultura Técnica (Chile)* 56 (1): 43-48.
- Iglesias J.O., J. Galantini, S. Venanzi, A. Rausch, M. Barreiro, A. Albin, H. Kruger y M. Ripoll. 2001. *Sistemas de Labranza: Distribución del espacio poroso*. VIII Congreso

- Nacional de Trigo. III Simposio Nacional de cereales de invierno. Villa Carlos Paz, Cordoba. CD-ROM 3 pp.
- Janssen B.H. 1984. A simple method for calculating decomposition and accumulation of “young” soil organic matter. *Plant Soil* 76: 297-304.
- Janzen H.H., C.A. Campbell, S.A. Brandt, G.P. Lafond and L. Townle Smith. 1992. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1799-1806.
- Jastrow J.D., T.W. Boulton and R.M. Miller. 1996. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:801-807.
- Jenkinson D.S. and Rayner J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123(5): 298-305.
- Johnston A.E. 1987. Effects of soil organic matter on yields of crops in long-term experiments at Rothamsted and Woburn. *INTECOL Bulletin* 15: 9-16.
- Kay B.D. and A.J. Vanden Bygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66:107-118.
- Kern J.S. and M.G. Johnson. 1993. Conservation tillage impacts on soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 200-210.
- Klute A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. p. 635-661. In: A. Klute (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA. Madison. WI.
- Kononova M.M. 1966. *Soil organic matter.* 2nd Ed. Pergamon Press, Oxford.
- Krüger H.R. 1996. Sistemas de labranzas y variación de propiedades químicas en un Haplustol entico. *Ci. Suelo* 14: 53-55.
- Krüger H.R., S. Venanzi y E. De Sa Pereira. 2003. Siembra directa en sistemas mixtos. Seminario para productores AAPRESID “Siembra directa en el sur”. Pág 31-34.
- Krüger H.R., S. Venanzi y E. Sá Pereira. 2008. Efecto del pastoreo sobre la resistencia mecánica del suelo en sistemas de producción bajo siembra directa continua. *Ci. Suelo* 26(2): 211-217.

- Lal R. and J.M. Kimble. 1997. Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutr. Cycling Agroecosyst* 49:243–253.
- Lal R., J.M. Kimble and B.A. Stewart. 1995. World soil as a source or sink for radiatively-active gases. p. 1-8. In R. Lal (ed.). *Soil management and greenhouse effect. Advances in soil science.* CRC Press, Boca Raton, FL.
- Leifeld J. and I. Kögel-Knabner. 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma* 124: 143-155.
- Liebig M.A., G.E. Varvel, J.W. Doran and B.J. Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 596-601.
- Linquist B.A., P.W. Singleton and K.G. Cassman. 1997. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an ultisol. *Soil Sci.* 162:254-263.
- Lipiec J., J. Kus, A. Słowińska-Jurkiewicz and A. Nosalewicz. 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Till. Res.* 89: 210-220.
- Little T.M. and F.J. Hills. 1978. *Agricultural Experimentation: Design and Analysis.* John Wiley, New York.
- Loewy T. y R.A. Seewald. 1980. Fertilidad nitrogenada para trigo en suelos del SO bonaerense. *Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná II:* 533-536.
- Logsdon S.D., R.R. Almaras, L. Wu, J.B. Swan and G.W. Randall. 1990. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1096-1101.
- Lombi E., M. McLaughlin and C. Jonshston. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 682-689.
- Loveland P. and J. Webb. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil Till. Res.* 70: 1-18.

- McVay K. and C.W. Rice. 2005. El carbono orgánico del suelo y el ciclo global del carbono. Pp 5-8. En: J. Romagnoli (ed). Conociendo el suelo. Revista técnica de la AAPRESID. Marzo 2005.
- Mestelán S. 1997. Destino del fósforo inorgánico agregado al suelo: Su distribución en algunas fracciones inorgánicas y orgánicas. Tesis para optar al grado de Magister Scientiae. Facultad Ciencias Agrarias (UNMdP). 90 p.
- Miglierina A. 1991. Materia orgánica y sistemas de producción en la región semiárida bonaerense. Tesis Magíster en Ciencias del Suelo. UNS. 94pp.
- Montagu K.D., J.P. Conroy and G.S. Francis. 1998. Root and shoot response of field-grown lettuce and broccoli to a compact subsoil. Aust. J. Agric. Res. 49: 89-97.
- Mueller-Harvey I., A. Juo and A. Wild. 1985. Soil organic C, N, S and P after forest clearance in Nigeria: mineralization rates and spatial variability. J. Soil Sci. 36:586-591.
- Munkholm L.J., P. Schjonning, K.J. Rasmussen and K. Tanderup. 2003. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. Soil Till. Res. 71: 163-173.
- Mwendera E.J. and M.A.M. Saleem 1997. Hydrologic response to cattle grazing in the Ethiopian highlands. Agric. Ecosyst. Environ. 64: 33-41.
- Nelson D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods; Sparks, D.L.(ed.); SSSA and ASA: Madison, Wisc., 961-1010.
- Oades J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. Plant Soil. 76:319-337.
- Oades J.M. 1988. The retention of organic matter in soils. Biogeochem. 5: 35-70.
- Oberson A., J. Besson, N. Maire and H. Sticher. 1996. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. Biol. Fertil. Soils 21: 138-148
- Oehl F., E. Fossard, A. Fliessbach, D. Dubois and A. Oberson. 2004. Basal organic phosphorus mineralization in soil under different farming systems. Soil Biol. Biochem. 36: 667-675

- Parkin T.B. and T.C. Kaspar. 2003. Temperature controls on diurnal carbon dioxide flux: Implications for estimating soil carbon loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1763–1772.
- Parton W.J., D.S. Schimel, C.V. Cole and D.S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1173-1179.
- Paustian K., G.P. Robertson and E.T. Elliott. 1995. Management impacts on carbon storage and gas fluxes in mid-latitudes cropland. p. 69-83. *In* R. Lal (ed.) *Soils and global climate change*. Adv. Soil Sci. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Petersen R.G. 1994. Variety trials. Comparison of means. *In*: R.G. Petersen (ed.) *Agricultural field experiments. Design and analysis*. Eds. CRC Press. Boca Raton, FL. 409 pp
- Piccolo A. and J.S.C. Mbagwu. 1990. Effects of different organic amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. *Plant Soil* 123: 27-37.
- Picone L.I. y E. Zamuner. 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. *INPOFOS Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 16: 11-15.
- Picone L.I., E. Zamuner, A. Berardo and M.A. Marino. 2003. Phosphorus transformations as affected by sampling date and fertilizer rate, and phosphorus uptake in soil under pasture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67: 225-232.
- Quiroga A., D. Buschiazzo and N. Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Till. Res.* 52: 21–28.
- Quiroga A., O. Ormeño y N. Peineman. 2001. Materia orgánica: un indicador de la calidad de los suelos relacionado con la productividad de los cultivos. *Boletín Divulgación Técnica* 70 EEA INTA Anguil, 28 págs.
- Quiroga A., R. Fernández and E. Noellemeyer. 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems. *Soil Till. Res.* 105: 164-170.
- Rasmussen P.E. and H.P. Collins. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45: 93-134.

- Rasmussen P.E., K. Goulding, J.R. Brown, P.R. Grace, H.H. Janzen and M. Körschens. 1998. Long-term agroecosystems experiments: assessing agricultural sustainability and global change. *Sci.* 282:893-896.
- Rehm G.W., G.W. Randall, A.J. Scobbie and J.A. Vetsch. 1995. Impact of fertilizer placement and tillage system on phosphorus distribution in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59(6): 1661-1665.
- Richards L.A. 1947. Pressure membrane apparatus. Construction and use. *Agricultural Engineering* 28: 451-454.
- Robbins S.G. and R.D. Voss. 1991. Phosphorus and potassium stratification in conservation tillage systems. *J. Soil Water Conserv.* 46(4): 298-300.
- Ron M.M. y T. Loewy. 1990. Fertilización fosfórica del trigo en el sudoeste bonaerense. Modelos de la respuesta. *Ci. Suelo* 8 (2): 187-194.
- Ron M.M. y T. Loewy. 2000. Modelo de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el sudoeste bonaerense, Argentina. *Ci. Suelo* 18 (1): 44-49.
- Ron M.M., M.E. Mandolesi, C. Facchinetti y R.J. Kiessling. 2011. Efecto antrópico sobre la fertilidad química de un suelo en el sudoeste bonaerense. *Ci. Suelo* 29 (2): 223-231.
- Rosell R.A., M.I. Ortiz and L. Quevedo. 1971. A comparison of the effectiveness of various extractants for determining humus quality in a calcareous soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 2: 275-282.
- Sainju U., J. Jabro and W. Stevens. 2008. Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by irrigation, tillage, cropping system and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.* 37: 98-106.
- Salinas Garcia J.R., E.M. Hons, J.E. Matocha and D.A. Zuberer. 1997. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by long-term tillage and nitrogen fertilization. *Biol. Fertil. Soils* 25: 182-188.
- Sasal M.C. y A. Andriulo. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L. (nabo forrajero). *Revista Investigaciones Agropecuarias RIA (INTA)* 34(3): 131-150.

- Sasal M.C., A.E. Andriulo and M.A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Satorre E., R. Benech, G. Slafer, B. De la Fuente, M. Otegui y R. Savin. 2003. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía.
- Saunders W.M.H. and E.G. Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6:254-267.
- Schjonning P. and K.J. Rasmussen. 2000. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil Till. Res.* 57:69–82.
- Schnitzer M. 1982. Soil organic matter. In: Page, A.L., Miller, A.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, 2nd Ed. Agronomy Monograph, vol. 9. Soil Sci. Soc. of America, Madison, WI, pp. 581–594.
- Selles F., R.A. Kochhann, J.E. Denardin, R.P. Zentner and A. Faganello. 1997. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Till. Res.* 44(1): 23-34.
- Senesi N., F.R. Rizzi, P. Dellino and P. Acquafredda. 1996. Fractal dimension of humic acids in aqueous suspension as a function of pH and time. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 60(6): 1773-1780.
- Sharpley A.N. 1995. Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impacts. *Ecol. Eng.* 5:261-279.
- Silva V.R., D.J. Reinert and J.M. Reichert. 2000. Soil density, chemical attributes and maize root distribution as affected by grazing and soil management. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 24: 191–199.
- Six J., E.T. Elliot and K. Paustian. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1350-1358.
- Smith P., D.S. Powlson, M.J. Glendining and J.U. Smith. 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biol.* 4:679-685.

- Sparling G.P. and L.A. Schipper. 2002. Soil Quality at a National Scale in New Zealand. *J. Environ. Qual.* 31:1848–1857.
- Steel R.G.D. y J.H. Torrie. 1992. Bioestadística: principios y procedimientos. Capítulo 7. Ed. McGraw-Hill. México. 622p.
- Stevenson F.J. and M.A. Cole. 1999. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. USA. 427 p.
- Stewart J.W.B and A.N. Sharpley. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In : R. F. Follett y C. V. Cole (eds.). Soil fertility and organic matter as critical components of production. SSSA Special Publication 19. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. p. 101-121.
- Suñer L.G. 2007. Dinámica del fósforo en suelos agrícolas de la región semiárida pampeana. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. UNS. 125 pp.
- Suñer L.G., J.A. Galantini y R.A. Rosell. 2000. Formas de fósforo en Molisoles de la provincia de Buenos Aires y su relación con otros parámetros edáficos. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, 11-14 abril. Trabajo en CD-ROM.
- Swift R.S. 1996. Organic matter characterization. In *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* (Ed. D.L. Sparks), SSSA-ASA, Madison, WI, USA. pp. 1011-1069.
- Takahashi S. and J. Anwar. 2007. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 year of annual fertilizer application to an Andosol. *Field Crops Res.* 101: 160-171.
- Tan K.H. 2003. Chemical composition of humic matter. Pp. 87-116 en: *Humic matter in soil and the environment: principles and controversies*, Marcel Dekker Inc, New York, USA. 282 pp.
- Terashima E., E Fujii and K. Mishima. 1999. Experimental studies on the effect of trampling on the root system of seedlings of *Zelkova serrata* Makino. *Technical Bull. Faculty Horticult. China Univ.* 53: 85-92.
- Tiessen H., J.W. Stewart and J.R. Bettany. 1982. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soils. *Agron. J.* 74:831-835.

- Tiessen H., J.W. Stewart and J.O. Moir. 1983. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60-90 years of cultivation. *J. Soil Sci.* 34: 815-823.
- Tiessen H., J. Stewart and A. Oberson. 1994. Innovative soil phosphorus availability indices: Assessing organic phosphorus. In *Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations*. SSSA Special Publication N° 40. Madison, WI, USA, 143-162
- Tisdall J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Tollner E.W., G.V. Calvert and G. Langdale. 1990. Animal trampling effects on soil physical properties of two Southeastern U.S. ultisols. *Agric. Ecosyst. Environ.* 33: 75-87.
- Unger P.W. 1991. Organic matter, nutrient, and pH distribution in no and conventional-tillage semiarid soils. *Agron. J.* 83: 186-189.
- Unger P.W. and C. Kaspar. 1994. Soil compaction and root growth: A review. *Agron. J.* 86: 759-766.
- Varvel G.E. 1994. Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. *Agron. J.* 86: 319-325.
- Venanzi S., J.A. Galantini y H. Krüger. 2004. Pastoreo en siembra directa y crecimiento de soja. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Resumen pág. 48, CD-ROM 10 págs.
- Venanzi S., H. Krüger, J.A. Galantini y J. Iglesias. 2008. Rendimientos de trigo en el SO bonaerense: sistemas de labranza y fertilización nitrogenada. VII Congreso Nacional de Trigo. V Simposio Nacional de cereales de invierno. I Encuentro del MERCOSUR. Santa Rosa, La Pampa. CD-ROM 5 pp.
- West T.O. and W.M. Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1930-1946.
- Wright A. and F.M. Hons. 2005. Soil Carbon and Nitrogen Storage in Aggregates from Different Tillage and Crop Regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:141-147.
- Zalba P. and N. Peinemann. 2002. Phosphorus content in soil in relation to the fulvic acid carbon fraction. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 3737-3744.

Zalba P. and Quiroga A.R. 1999. Fulvic acid carbon as a diagnostic feature for agricultural soil evaluation. *Soil Sci.* 164: 57-61.

Zibilske L.M. and J.M. Bradford. 2003. Tillage effects on phosphorus mineralization and microbial activity. *Soil Sci.* 168:677-685.

Anexo I**Tabla 1: Características del perfil modal de un suelo Haplustol éntico serie Darregueira.**

Horizonte	A1	AC	C1	C2	Tosca
Profundidad de la muestra (cm)	4-20	28-34	40-55	70-90	105-110
Carbono orgánico (%)	0,86	0,37	0,29	0,15	
Nitrógeno total (%)	0,069	0,046			
Relación C/N	12,5	8,0			
Arcilla < 2 µm (%)	6,1	11,2	10,6	6,9	
Limo 2-20 µm (%)	9,1	5,2	5,1	3,5	
Limo 2-50 µm (%)	16,6	10,6	8,7	9,0	
Arena muy fina 50-74 µm (%)	3,0	3,4	3,1	3,1	
Arena muy fina 74-100 µm (%)	5,1	2,1	3,0	1,7	
Arena fina 100-250 µm (%)	57,1	58,0	59,1	67,8	
Arena media 250-500 µm (%)	12,0	14,6	15,5	11,5	
Arena gruesa 500-1000 µm (%)	0,1	0,1			
Fósforo asimilable – ByK (µg.g⁻¹)	7,7	4,9			
Calcáreo, CaCO₃ (%)					36
Equivalente de humedad (%)	10,8	11,8	11,2	8,4	22,3
pH en pasta	7,0	6,8	6,8	7,1	8,0
pH en agua, 1:2,5	7,2	7,3	7,6	7,8	8,2
Cationes de intercambio, m.e/100g					
Ca⁺⁺	7,0	7,3	7,8	6,7	
Mg⁺⁺	2,2	3,9	3,4	3,5	
Na⁺	0,3	0,1	0,1	0,1	
K⁺	1,4	1,5	1,0	0,5	

Anexo II**Tabla 1: Porcentaje de fracción fina (0-100 μm) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.**

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-5	73,4	71,6	71,8	74,5	73,3	n.s.
5-10	75,3	74,2	73,6	75,5	74,7	n.s.
10-15	75,0	73,5	73,4	74,8	74,2	n.s.
0-15	74,6	73,1	72,9	74,9	74,1	n.s.

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 2: Porcentaje de fracción fina (0-100 μm) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD		DMS p = 0,05
	30N	60N	30N	30N	60N	
0-1	74,6	73,3	73,8	74,3	73,5	n.s.
0-5	74,6	73,9	74,2	74,5	73,1	n.s.
5-10	74,9	74,7	74,8	76,1	75,0	n.s.
10-15	76,3	75,0	74,9	77,1	75,2	n.s.
0-15	75,3	74,6	74,6	75,9	74,4	n.s.
15-20	78,2	75,4	76,4	77,3	75,9	n.s.

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 3: Densidad aparente (Mg m⁻³) en las distintas profundidades, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	1,10	1,10	1,11	1,14	1,14
5-10	1,18	1,18	1,21	1,23	1,23
10-15	1,30	1,30	1,31	1,32	1,32

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 4: Densidad aparente (Mg m^{-3}) en las distintas profundidades, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	1,10	1,10	1,12	1,13	1,13
0-5	1,10	1,10	1,12	1,13	1,13
5-10	1,18	1,18	1,22	1,23	1,23
10-15	1,30	1,30	1,31	1,32	1,32
15-20	1,31	1,31	1,32	1,33	1,33

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 5: Concentración de carbono orgánico (g kg^{-1}) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	18,1	18,5	18,2	20,5	20,4
5-10	17,2	17,7	17,0	16,0	17,4
10-15	15,1	16,8	18,7	17,7	18,0
0-15	16,8	17,7	18,0	18,1	18,6

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 6: Concentración de carbono orgánico (g kg^{-1}) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	19,8	20,0	19,3	24,4	25,8
0-5	20,1	19,8	19,5	22,4	23,6
5-10	20,5	19,7	19,0	17,2	17,6
10-15	17,9	18,7	17,5	15,4	15,9
0-15	19,5	19,4	18,7	18,3	19,0
15-20	14,6	14,2	15,5	14,1	14,1

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 7: Distribución del carbono orgánico asociado a fracción mineral del suelo (COM, g kg⁻¹) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	15,0	15,3	15,0	15,9	15,7
5-10	15,3	15,6	15,2	14,6	15,5
10-15	14,2	15,8	17,6	16,8	16,9
0-15	14,8	15,6	15,9	15,8	16,0

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 8: Distribución del carbono orgánico asociado a fracción mineral del suelo (COM, g kg⁻¹) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	17,2	17,4	16,9	18,2	19,1
0-5	17,3	17,2	16,8	18,4	19,5
5-10	17,7	17,4	16,8	15,9	16,4
10-15	16,4	17,4	16,1	14,7	15,0
0-15	17,1	17,3	16,6	16,3	17,0
15-20	14,0	13,5	14,5	13,6	13,6

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 9: Distribución del carbono orgánico particulado (COP, %) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	0,30	0,32	0,32	0,46	0,48
5-10	0,19	0,21	0,18	0,14	0,20
10-15	0,09	0,10	0,11	0,09	0,11
0-15	0,19	0,21	0,20	0,23	0,26

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 10: Distribución del carbono orgánico particulado (COP, %) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	0,26	0,25	0,24	0,62	0,67
0-5	0,29	0,26	0,26	0,40	0,41
5-10	0,29	0,23	0,22	0,13	0,12
10-15	0,16	0,13	0,14	0,06	0,08
0-15	0,25	0,21	0,21	0,20	0,20
15-20	0,06	0,07	0,10	0,05	0,05

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 11: Distribución del nitrógeno total (%) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	0,184	0,166	0,201	0,203	0,196
5-10	0,184	0,176	0,156	0,152	0,164
10-15	0,136	0,130	0,131	0,123	0,137
0-15	0,168	0,157	0,163	0,159	0,166

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 12: Distribución del nitrógeno total (%) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	0,169	0,157	0,147	0,200	0,192
0-5	0,151	0,155	0,131	0,152	0,166
5-10	0,154	0,168	0,171	0,131	0,124
10-15	0,156	0,149	0,153	0,165	0,136
0-15	0,154	0,157	0,152	0,149	0,142
15-20	0,103	0,093	0,106	0,135	0,105

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 13: Distribución del nitrógeno total particulado (N-MOP, %) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	0,014	0,016	0,022	0,024	0,028
5-10	0,013	0,015	0,016	0,013	0,014
10-15	0,012	0,007	0,013	0,011	0,009
0-15	0,013	0,013	0,017	0,016	0,016

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 14: Distribución del nitrógeno total particulado (N-MOP, %) en las diferentes profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	0,017	0,017	0,016	0,036	0,037
0-5	0,023	0,020	0,023	0,030	0,027
5-10	0,022	0,021	0,021	0,016	0,016
10-15	0,017	0,014	0,013	0,009	0,019
0-15	0,021	0,018	0,019	0,018	0,021
15-20	0,012	0,009	0,010	0,015	0,012

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 15: Concentración del fósforo extractable (Pe, µg g⁻¹) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	41,0	38,4	38,5	48,6	41,2
5-10	35,4	35,9	34,2	29,8	30,6
10-15	21,2	23,5	23,9	21,9	20,0
0-15	32,5	32,6	32,2	33,4	30,6

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 16: Concentración del fósforo extractable (Pe, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	40,5	40,2	37,8	58,2	53,3
0-5	36,4	37,7	33,5	47,7	46,6
5-10	37,8	38,1	29,2	23,5	23,2
10-15	23,3	27,2	26,1	16,0	17,6
0-15	32,5	34,3	29,6	29,1	29,1
15-20	14,8	17,3	13,9	12,3	12,8

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 17: Concentración de fósforo orgánico e inorgánico (Po+Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	538,5	525,4	531,2	557,1	563,0
5-10	519,0	531,0	547,2	522,3	526,4
10-15	501,8	515,5	543,9	515,0	511,3
0-15	519,8	523,9	540,8	531,5	533,6

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 18: Concentración de fósforo orgánico e inorgánico (Po+Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	564,9	550,9	572,8	622,0	593,9
0-5	547,4	534,2	543,4	569,7	562,8
5-10	511,4	505,1	505,6	498,0	507,9
10-15	501,9	500,6	507,5	465,2	476,1
0-15	520,2	513,3	518,8	511,0	515,6
15-20	472,1	474,1	509,0	467,1	472,1

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 19: Concentración de fósforo orgánico (Po, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	187,7	169,7	166,7	186,5	215,4
5-10	188,5	197,4	210,6	189,8	187,6
10-15	184,5	194,7	204,4	191,8	181,0
0-15	186,9	187,3	193,9	189,4	194,7

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 20: Concentración de fósforo orgánico (Po, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	215.9	210.3	230.9	243.6	231.4
0-5	205.9	204.5	198.9	212.9	213.7
5-10	196.6	193.4	197.1	177.2	187.0
10-15	186.3	169.0	156.8	174.7	170.5
0-15	196,3	189,0	184,3	188,3	190,4
15-20	178.7	184.3	192.9	179.9	176.5

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 21: Concentración del fósforo inorgánico (Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	350,9	355,7	364,5	370,6	347,6
5-10	330,5	333,6	336,6	332,5	338,8
10-15	317,4	320,8	339,5	323,2	330,4
0-15	332,9	336,7	346,8	342,1	338,9

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 22: Concentración del fósforo inorgánico (Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	349,0	344,7	364,1	378,4	362,6
0-5	331,9	329,8	344,4	356,8	349,1
5-10	314,8	311,7	308,5	320,8	317,7
10-15	315,5	336,5	350,7	290,5	288,7
0-15	320,7	326,0	334,6	322,7	318,5
15-20	293,4	289,9	316,1	287,2	295,6

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 23: Concentración de fósforo orgánico e inorgánico (Po+Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$), en la fracción gruesa (100-2000 μm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	56,0	67,6	67,4	70,5	67,3
5-10	56,1	59,5	61,9	50,2	59,4
10-15	48,0	53,6	55,4	49,4	52,3
0-15	53,4	60,2	61,6	56,7	59,7

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 24: Concentración de fósforo orgánico e inorgánico (Po+Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$), en la fracción gruesa (100-2000 μm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	51,8	56,5	53,7	67,6	70,5
0-5	56,8	54,6	55,9	60,3	64,8
5-10	60,2	52,9	51,8	48,2	54,8
10-15	47,0	51,8	52,4	39,2	45,8
0-15	54,7	53,1	53,4	49,2	55,1
15-20	42,6	51,1	48,3	42,0	44,3

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 25: Concentración de fósforo orgánico (Po, $\mu\text{g g}^{-1}$), en la fracción gruesa (100-2000 μm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	7,4	10,9	12,1	18,8	14,7
5-10	6,8	8,9	8,6	6,3	7,7
10-15	3,2	3,5	3,4	3,5	4,8
0-15	5,8	7,8	8,0	9,5	9,1

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 26: Concentración de fósforo orgánico (Po, $\mu\text{g g}^{-1}$), en la fracción gruesa (100-2000 μm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	6,9	7,8	7,2	17,9	15,7
0-5	9,2	7,8	9,6	11,9	13,3
5-10	10,7	5,9	6,5	7,3	10,1
10-15	5,3	7,9	8,1	3,6	4,0
0-15	8,4	7,2	8,1	7,6	9,1
15-20	5,9	5,7	4,0	4,7	4,3

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 27: Concentración de fósforo inorgánico (Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$), en la fracción gruesa (100-2000 μm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2004.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-5	48,7	56,7	55,3	51,7	52,6
5-10	49,2	50,6	53,3	43,9	51,7
10-15	44,9	50,1	52,1	46,0	47,5
0-15	47,6	52,5	53,6	47,2	50,6

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 28: Concentración de fósforo inorgánico (Pi, $\mu\text{g g}^{-1}$), en la fracción gruesa (100-2000 μm) en las distintas profundidades del suelo, bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización N. Año 2006.

Profundidad (cm)	LC		LV	SD	
	30N	60N	30N	30N	60N
0-1	44,7	48,6	46,5	49,9	54,8
0-5	47,6	46,8	46,3	48,4	51,5
5-10	49,5	46,9	45,3	40,8	44,7
10-15	41,7	43,8	44,3	35,6	41,8
0-15	46,3	45,9	45,3	41,6	46,0
15-20	36,7	45,4	44,3	37,3	40,0

LC: labranza convencional; LV: labranza vertical; SD: siembra directa; 30N y 60N: fertilización con 30 y 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 29: Porosidad total. p-valor para los factores incluidos en un ANOVA triple (bloque dividido) para cada profundidad de muestreo.

Fuente de variación	Profundidad (cm)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
Bloque	0,897	0,339	0,070	0,035
Factor A (Año)	0,976	0,790	0,153	0,250
Factor B (Momento)	<0,001	0,004	0,001	0,077
A*B	0,015	0,184	0,115	0,250
Factor C (SL)	0,191	<0,001	0,002	0,897
A*C	0,057	0,956	0,002	0,954
B*C	0,006	<0,001	0,040	0,898
A*B*C	0,987	0,812	0,004	0,789
CV %	3,89	4,02	3,45	3,78

SL: sistema de labranza

Tabla 30: Macroporosidad. p-valor para los factores incluidos en un ANOVA triple (bloque dividido) para cada profundidad de muestreo.

Fuente de variación	Profundidad (cm)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
Bloque	0,997	0,645	0,734	0,036
Factor A (Año)	0,067	0,194	0,145	0,172
Factor B (Momento)	0,001	0,002	0,003	0,354
A*B	0,035	0,803	0,312	0,172
Factor C (SL)	0,332	<0,001	0,235	0,060
A*C	0,001	0,956	0,018	0,515
B*C	<0,001	<0,001	0,006	0,214
A*B*C	0,072	0,232	0,002	0,513
CV %	9,68	13,27	11,60	13,20

SL: sistema de labranza

Tabla 31: Mesoporosidad. p-valor para los factores incluidos en un ANOVA triple (bloque dividido) para cada profundidad de muestreo.

Fuente de variación	Profundidad (cm)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
Bloque	0,315	0,933	0,444	0,132
Factor A (Año)	0,023	0,768	0,912	0,887
Factor B (Momento)	0,133	0,879	0,220	0,834
A*B	0,039	0,198	0,050	0,665
Factor C (SL)	0,146	0,004	0,096	0,238
A*C	0,879	0,765	0,139	0,945
B*C	0,052	0,822	0,898	0,892
A*B*C	0,079	0,039	0,871	0,834
CV %	12,40	13,99	10,59	18,01

SL: sistema de labranza

Tabla 32: Microporosidad. p-valor para los factores incluidos en un ANOVA triple (bloque dividido) para cada profundidad de muestreo.

Fuente de variación	Profundidad (cm)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
Bloque	0,025	0,048	0,108	0,002
Factor A (Año)	0,087	0,845	0,300	0,895
Factor B (Momento)	0,024	0,018	0,031	0,834
A*B	0,077	0,935	0,047	0,877
Factor C (SL)	0,765	0,201	0,015	0,145
A*C	0,129	0,957	0,083	0,896
B*C	0,050	0,043	0,016	0,856
A*B*C	0,204	0,899	0,020	0,911
CV %	7,34	9,28	5,18	7,90

SL: sistema de labranza

Tabla 33: Densidad Aparente, Porosidad Total y distribución de los diferentes tamaños de poros a diferentes profundidades bajo LC y SD, antes del pastoreo animal. Año 2004.

Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
LC					
0-5	1,07	62,80	35,63	13,68	14,35
5-10	1,18	57,53	30,13	12,11	15,29
10-15	1,40	49,07	19,36	11,33	19,31
15-20	1,38	47,10	16,68	10,80	19,63
SD					
0-5	1,18	57,93	27,21	13,45	15,45
5-10	1,34	49,11	20,89	10,95	16,93
10-15	1,37	49,27	19,77	11,02	17,78
15-20	1,37	48,03	19,10	11,12	18,37

DA: densidad aparente; PT: porosidad total; LC: labranza convencional; SD: siembra directa.

Tabla 34: Densidad Aparente, Porosidad Total y distribución de los diferentes tamaños de poros a diferentes profundidades bajo LC y SD, después del pastoreo animal. Año 2004.

Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
LC					
0-5	1,34	49,74	16,32	16,37	17,06
5-10	1,35	49,05	18,00	13,71	17,34
10-15	1,40	45,81	15,33	11,18	19,31
15-20	1,39	46,38	15,59	11,34	19,45
SD					
0-5	1,32	49,02	15,66	15,85	17,51
5-10	1,35	46,15	16,51	12,52	17,12
10-15	1,38	45,08	16,05	11,31	17,72
15-20	1,36	46,74	17,13	11,65	17,54

DA: densidad aparente; PT: porosidad total; LC: labranza convencional; SD: siembra directa.

Tabla 35: Densidad Aparente, Porosidad Total y distribución de los diferentes tamaños de poros a diferentes profundidades bajo LC y SD, antes del pastoreo animal. Año 2006.

Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
LC					
0-5	1,09	60,21	33,25	12,69	14,28
5-10	1,11	60,26	32,28	13,56	14,43
10-15	1,23	55,14	26,45	12,56	16,13
15-20	1,37	47,24	17,85	10,29	19,10
SD					
0-5	1,16	57,67	28,84	13,68	15,15
5-10	1,34	50,54	22,61	12,53	15,40
10-15	1,42	47,03	18,03	11,37	17,64
15-20	1,36	47,68	18,38	10,83	18,48

DA: densidad aparente; PT: porosidad total; LC: labranza convencional; SD: siembra directa.

Tabla 36: Densidad Aparente, Porosidad Total y distribución de los diferentes tamaños de poros a diferentes profundidades bajo LC y SD, después del pastoreo animal. Año 2006.

Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
LC					
0-5	1,30	49,74	21,35	13,17	15,22
5-10	1,35	46,05	19,87	9,54	16,64
10-15	1,40	43,56	17,08	9,33	17,15
15-20	1,39	44,18	16,87	9,22	18,09
SD					
0-5	1,20	53,37	26,05	12,25	15,08
5-10	1,35	45,85	19,22	9,94	16,70
10-15	1,38	44,43	17,71	9,53	17,19
15-20	1,36	46,32	18,07	9,70	18,55

DA: densidad aparente; PT: porosidad total; LC: labranza convencional; SD: siembra directa.

Tabla 37: Densidad Aparente, Porosidad Total y distribución de los diferentes tamaños de poros a diferentes profundidades. Campo de productores en SD. Año 2005.

Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
Antes del pastoreo					
0-5	1,17	56,68	21,62	21,79	13,01
5-10	1,36	49,24	15,23	18,44	15,58
10-15	1,38	48,45	15,02	17,67	15,76
Después del pastoreo					
0-5	1,21	54,49	19,92	21,04	13,53
5-10	1,36	48,58	15,72	17,26	15,60
10-15	1,35	48,10	15,98	16,71	15,41

DA: densidad aparente; PT: porosidad total; SD: siembra directa.

Tabla 38: Densidad aparente, porosidad total y distribución de los diferentes tamaños de poros a diferentes profundidades bajo LC. Parcelas con y sin pisoteo animal.

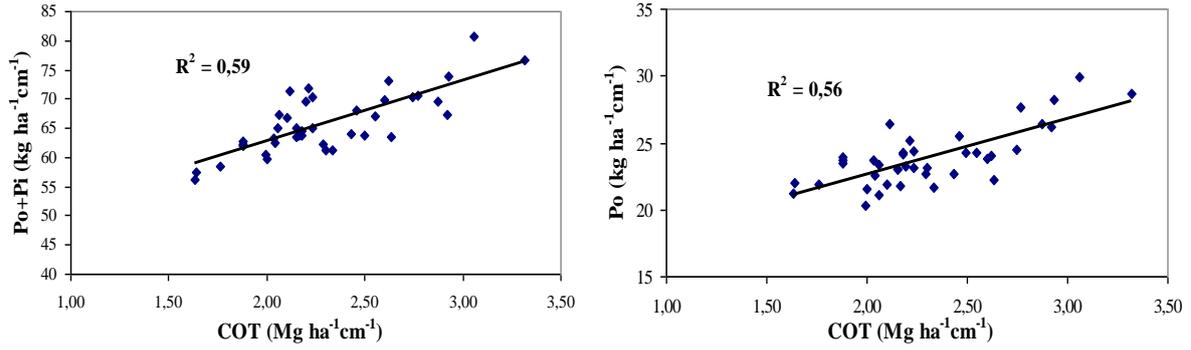
Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
LC-Con Pisoteo					
0-5	1,09	60,21	33,25	12,69	14,28
5-10	1,11	60,26	32,28	13,55	14,43
10-15	1,23	55,14	26,45	12,56	16,14
15-20	1,37	47,24	17,85	10,29	19,10
LC-Sin Pisoteo					
0-5	1,10	60,17	32,61	13,53	14,03
5-10	1,14	59,48	30,56	14,21	14,71
10-15	1,24	54,11	24,02	12,69	17,40
15-20	1,31	49,30	18,77	11,23	19,31

LC: Labranza convencional

Tabla 39: Densidad aparente, porosidad total y distribución de los diferentes tamaños de poros a diferentes profundidades bajo SD. Parcelas con y sin pisoteo animal.

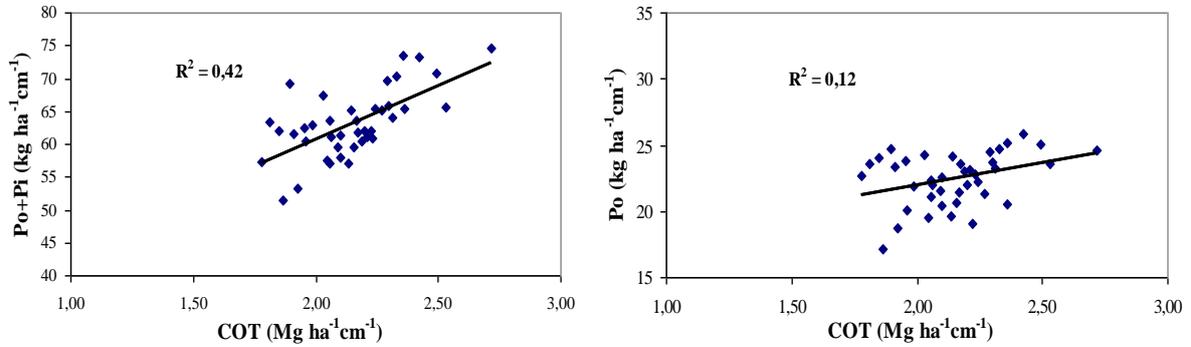
Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Porosidad total (%)	Macroporos (%)	Mesoporos (%)	Microporos (%)
SD-Con Pisoteo					
0-5	1,16	57,67	28,84	13,68	15,15
5-10	1,34	50,67	21,56	12,53	16,58
10-15	1,42	47,03	18,03	11,36	17,63
15-20	1,36	47,68	18,38	10,83	18,48
SD-Sin Pisoteo					
0-5	1,13	57,83	28,52	14,71	14,59
5-10	1,23	53,02	24,75	11,48	16,79
10-15	1,32	50,11	20,78	11,68	17,65
15-20	1,33	48,89	18,15	11,86	18,89

SD: Siembra directa.



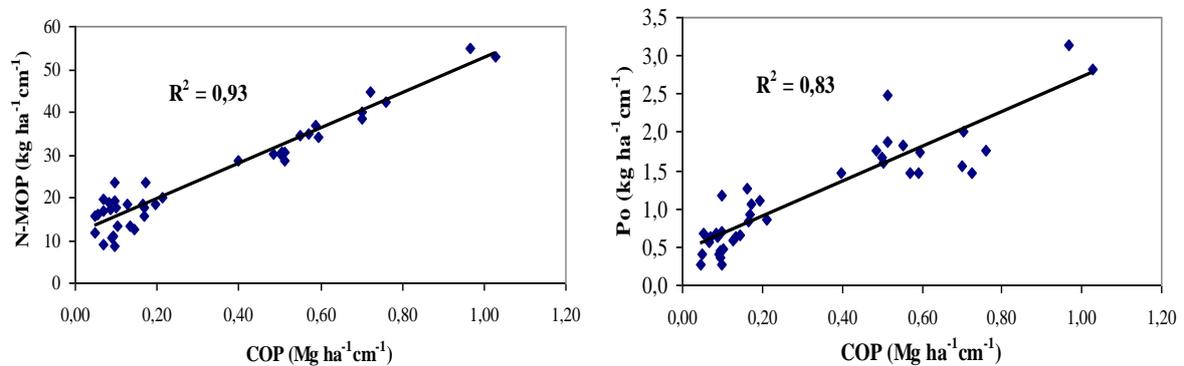
COT; carbono orgánico total; Po+Pi: fósforo orgánico e inorgánico; Po: fósforo orgánico; SD: siembra directa.

Figura 1: Relación entre el COT y el Po+Pi y el Po en el suelo. Parcelas en SD.



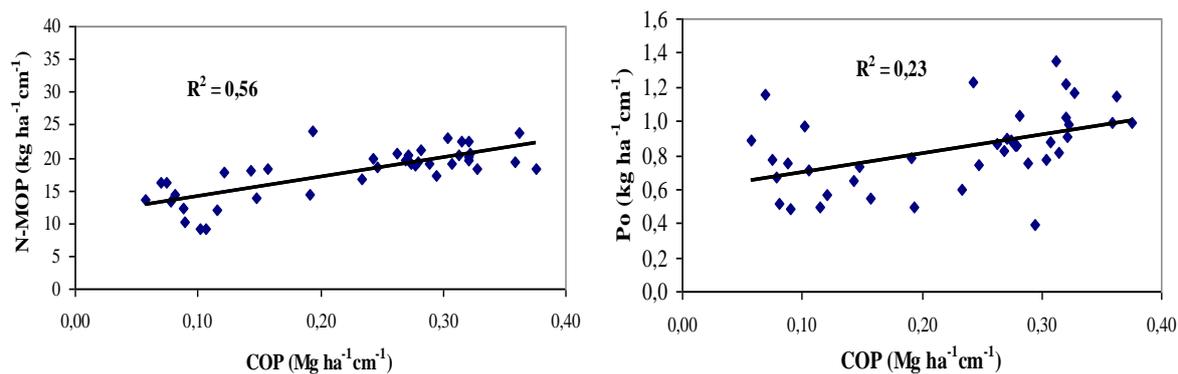
COT; carbono orgánico total; Po+Pi: fósforo orgánico e inorgánico; Po: fósforo orgánico; LC: labranza convencional.

Figura 2: Relación entre el COT y el Po+Pi y el Po en el suelo. Parcelas en LC.



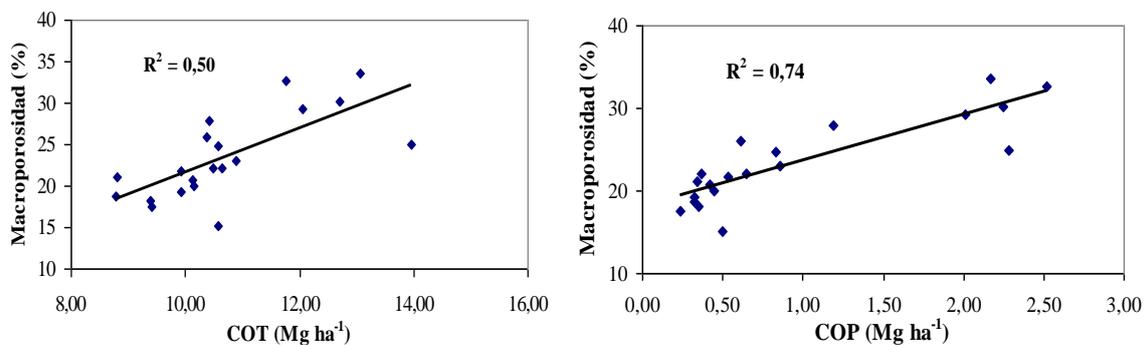
COP; carbono orgánico particulado; N-MOP: nitrógeno en la materia orgánica particulada; Po: fósforo orgánico en la fracción gruesa del suelo (100-2000 μm); SD: siembra directa.

Figura 3: Relación entre el COP, y el N-MOP y el Po en la fracción gruesa. Parcelas en SD.



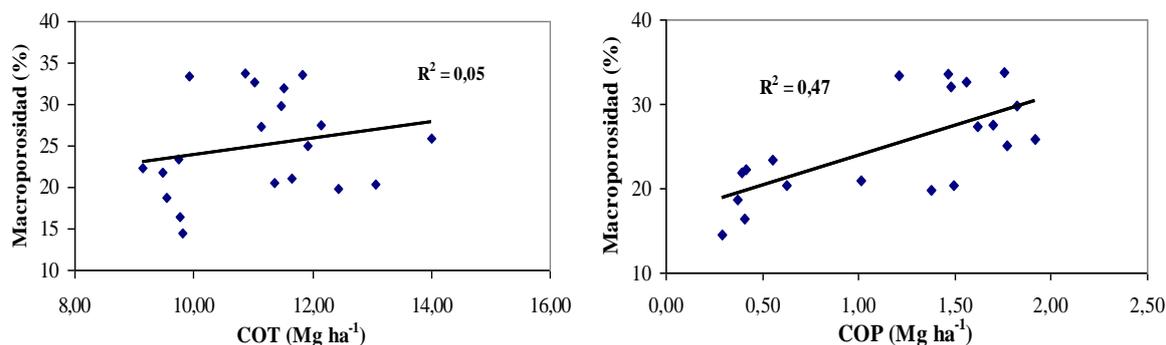
COP: carbono orgánico particulado; N-MOP: nitrógeno en la materia orgánica particulada; Po: fósforo orgánico en la fracción gruesa del suelo (100-2000 μm); LC: labranza convencional.

Figura 4: Relación entre el COP, y el N-MOP y el Po en la fracción gruesa. Parcelas en LC.



COT: carbono orgánico total; COP: carbono orgánico particulado; SD: siembra directa.

Figura 5: Relación entre el COT y el COP con la macroporosidad. Parcelas en SD.



COT: carbono orgánico total; COP: carbono orgánico particulado; SD: siembra directa.

Figura 6: Relación entre el COT y el COP con la macroporosidad. Parcelas en LC.