

CONDICIÓN FÍSICA DE LOS SUELOS LIMOSOS BAJO

SIEMBRA DIRECTA:

CARACTERIZACIÓN, GÉNESIS Y MANEJO

Tesis presentada para optar al título de Doctor

de la Universidad de Buenos Aires,

Área Ciencias Agropecuarias

Carina Rosa Álvarez

Ingeniera Agrónoma, Universidad de Buenos Aires, 1992

Magister Scientiae en Ciencias del Suelo, Universidad de Buenos Aires, 1998

Lugar de trabajo: Facultad de Agronomía de Universidad de Buenos Aires



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano

Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

Buenos Aires, diciembre

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis:

Miguel Ángel Taboada

Ingeniero Agrónomo (FAUBA); Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (FAUBA);

Docteur Fonctionnement Ecosystèmes et Agrosystèmes (Institut National

Polytechnique de Toulouse; Francia)

Co-director:

Flavio Hernán Gutiérrez Boem

Ingeniero Agrónomo (FAUBA); Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (FAUBA)

Doctor of Philosophy, Soil Science Program (University of Kentucky; EUA)

Consejero de Estudios:

Susana B. Perelman (FAUBA)

Ingeniero Agrónomo (FAUBA); Magister Scientiae en Biometria (FAUBA)

JURADO DE TESIS

Director de tesis

Miguel Ángel Taboada

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires); Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (Universidad de Buenos Aires); Docteur Fonctionnement Ecosystèmes et Agrosystèmes (Institut National Polytechnique de Toulouse; Francia)

Jurado

Fernando Oscar Garcia

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires);

M.S. (Kansas State University; EUA)

Doctor of Philosophy (Kansas State University; EUA)

Pablo José Bouza

Licenciado en Ciencias Geológicas (Universidad de Buenos Aires);

Doctor en Ciencias Geológicas (Universidad de Buenos Aires)

Nilda Amiotti

Ingeniera Agronoma (Universidad Nacional del Sur)

Doctora en Agronomía (Universidad Nacional del Sur)

Fecha de defensa de la tesis: 5 de OCTUBRE de 2012

Dedicatoria

A mi esposo y a mis hijos, Tomás y Andrés, que dan sentido a mi vida. A mi familia de origen: mi papá, mi mamá, mi tía y mis tíos que fueron los forjadores de mi persona. A todos ellos, les dedico este humilde logro. A mis abuelos maternos y paternos trabajadores incansables de la tierra en Argentina y España porque, como verán, todo se hereda.

Agradecimientos

Gracias a todos los que me acompañaron en este camino de investigación y crecimiento. A mi director y maestro, Dr. Miguel A. Taboada, que me acompañó con trabajo, comprensión, excelente humor y gran dedicación. Al Dr. Flavio Gutierrez Boem, que realizó un excelente papel como Co-Director (-Flavio, tengo una pregunta!) y a Susana Perelman que como consejera me brindó su conocimiento cada vez que lo solicité. A todos aquellos que contribuyeron a que esta Tesis fuera posible, colaborando con trabajo, ideas, escuchando: Helena Rimki Korsakov, Patricia Fernández, Alfredo Bono, Pablo Prystupa, entre otros. A todos los productores y técnicos que me permitieron realizar los muestreos y ensayos en sus campos. Y muy especialmente a la Ing. Agr. Estefania Cartier y su familia, al Ing. Agr. Alejandro Cattaneo y a Tecnoagro S.A. que me facilitaron infinidad de veces sitios de muestreo y ensayos. Esta tesis fue financiada por los siguientes subsidios: UBACYT Joven G402. 2003 (Directora): G 402; PICT 12241, convocatoria 2002 (Directora), UBACYT G 100, Programación 2004-2007 (Co directora), UBACYT G403, 2008 (Directora).

Declaración

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Publicaciones directas derivadas de la tesis

- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Bustingorri, C., Gutiérrez Boem, F.H. 2006. Descompactación de suelos manejados en siembra directa bajo cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo* 24: 1-10.
- Alvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutiérrez Boem, F.H., Bono, A., Fernández, P.L., Prystupa, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1242-1250.
- Alvarez, C.R., Torres Duggan, M., Chamorro, E.R., D'Ambrosio, D, Taboada, M. A. 2009. Efectos a corto plazo y residual de la descompactación en suelos franco limosos en siembra directa cultivados con maíz. *Ciencia del Suelo* 27: 159-170.
- Alvarez, C.R., Micucci, F.G., Bustingorri, C., Taboada, M.A. 2010. Prediction of Proctor test parameters in the Pampas region of Argentina. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 34:1787-1793.
- Alvarez, C.R., Costantini, A.O., Bono, A., Taboada, M.A., Gutierrez Boem, F.H., Fernández, P.L., Prystupa, P. 2011. Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under different managements in the pampean region of Argentina. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 35: 1985-1994.

Índice

Abreviaturas	21
Resumen	22
Abstract	24
Capítulo 1.- Introducción general	26
Capítulo 2.- Calidad de suelos: Un estudio a escala regional	34
2.1 INTRODUCCIÓN	35
2.2 MATERIALES Y METODOS	40
2.3 RESULTADOS Y DISCUSION	49
2.4 CONSIDERACIONES FINALES	75
Capítulo 3.- Condición estructural superficial de los suelos bajo siembra directa:	
Caracterización y génesis	77
3.1 INTRODUCCIÓN	78
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS	82
3.3 RESULTADOS Y DISCUSION	86
3.4 CONSIDERACIONES FINALES	102
Capítulo 4.- Descompactación de suelos en siembra directa: efecto sobre los	
cultivos y perdurabilidad de la práctica	103
4.1 INTRODUCCION	104
4.2 MATERIALES Y METODOS	107
4.4 CONSIDERACIONES FINALES	143
4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	117
Capítulo 5.- Funciones de pedotransferencia para estimar la compactabilidad de	
los suelos	144
5.1 INTRODUCCIÓN	145

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS	148
5.3 RESULTADOS Y DISCUSION	151
5.4 CONSIDERACIONES FINALES	162
Capítulo 6.- Discusión y conclusiones generales	163
Bibliografía	177

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Contenido de arcilla y limo y pH de los suelos bajo distintos manejos y grupos textuales (0-30 cm). SD: siembra directa y LC: laboreados, Referencias: situaciones de referencia cuasi-prístinas.	44
Tabla 2.2. Componentes orgánicos del suelo según el manejo de suelos. Carbono orgánico del suelo (COS), carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico resistente (COR), nitrógeno total (NT), nitrógeno orgánico particulado (NOP) y nitrógeno orgánico resistente (NOR). Referencia (situaciones cuasi –prístinas), siembra directa (SD) y LC (labranza convencional). Letras distintas indican diferencias significativas $P<0,05$	51
Tabla 2.3. Carbono potencialmente mineralizable (CPM) según los manejos y profundidades. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P=0,05$) entre manejos dentro de cada profundidad.....	56
Tabla 2.4. Espesor del horizonte A y principales propiedades físicas evaluadas de 0-15 cm de profundidad. Inestabilidad estructural (IE), densidad aparente (DAP), densidad aparente máxima Test de Proctor (DMAX), compactación relativa (CR), resistencia a la penetración con la humedad de muestreo (RP). SD: siembra directa y LC: suelos laboreados, referencia: situaciones no cultivadas o cuasi-prístinas. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre suelos o manejos.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Tabla 2.5. Coeficiente de correlación entre pares de indicadores de calidad de suelos ($p<0,01$).	62
Tabla 3.1. Principales características de manejo de los lotes seleccionados para el muestreo.	83

Tabla 3.2. Datos Analíticos del Perfil Típico de la Serie O'Higgins (INTA, 2011).....	84
Tabla 4.1. Principales características del suelo y manejo de los sitios experimentales.	109
Tabla 4.2. Principales características de suelo (0-20 cm), manejo y ubicación de los sitios de muestreo.....	115
Tabla 4.3. Valores de la tasa de infiltración (TI) y error estándar en los tratamientos a cosecha del maíz para los sitios experimentales con repetición (n= 6). Letras distintas entre tratamientos indicar diferencias significativas en el sitio (P<0,05).	121
Tabla 4.4. Contenido de nitratos a V5-V6 para los sitios experimentales (SE) y tratamientos correspondientes a la campaña 2006/7 de 0-20 y 20-40 cm. P= probabilidad según test de t apareada.....	128
Tabla 4.5. Humedad gravimétrica (g 100 g ⁻¹ suelo) promedio para los distintos tratamientos en el estadio V5-6 del cultivo de maíz campaña 2006/7. El promedio corresponde a 6 sitios (SE 7 al 12). ± Error estándar.....	129
Tabla 4.6. Radiación interceptada e índice de verdor en floración en 5 sitios experimentales (SE) en ambos tratamientos. Valor medio ± error estándar en cada SE. ANOVA conjunto considerando todos los SE y la interacción SE x Tratamiento.	130
Tabla 4.7. Residualidad de la práctica de descompactación medida sobre los cultivos subsiguientes. Testigo y descompactado en el cultivo de maíz anterior.....	140
Tabla 5.1. Valores medios, mínimos, máximos y error estándar de las variables del conjunto de datos utilizados para ajustar o generar los modelos (training set). COS: carbono orgánico del suelo; DMAX: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC: contenido de humedad crítico donde se alcanza la densidad máxima. N= 73....	152
Tabla 5.2. Modelos obtenidos a partir del training set (Tabla 5.1). COS: carbono orgánico del suelo; DMAX: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC:	

contenido de humedad crítico donde se alcanza la DMAX. A: contenido de arena (g kg^{-1}); M: manejo del suelo, Pastura, parques, monte y siembra directa= 0 y 1 para suelos laboreados. N= 73. CME: cuadrado medio del error. 154

Tabla 5.3. Valores medios, mínimos, máximos y error estándar de las variables del test set. COS: carbono orgánico total; Dmáx: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC: contenido de humedad crítico donde se alcanza la densidad máxima. N= 24.....155

Tabla 5.4. Validación de los modelos con el *test set*. DMAX: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC: contenido de humedad crítico donde se alcanza la DMAX. CME: cuadrado medio del error.....155

Índice de Figuras

Figura 1.1. Superficie en SD en millones de hectáreas en distintos países en la campaña 2007/8 (Derpsch, 2011). -----	28
Figura 1.2. Comportamiento relativo de distintos sistemas de labranzas en relación a distintas medidas (rendimiento y calidad; beneficios ambientales y biodiversidad; costos).-----	29
Figura 2.1. Localización de los sitios evaluados. SD: siembra directa y LC: laboreados, Referencia: situaciones de referencia cuasi-prístinas. -----	42
Figura 2.2. A- Contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y B- nitrógeno total (NT) para los distintos manejos. Valores expresados en masa de suelo equivalente. SD: siembra directa y LC: suelos laboreados, referencia: situaciones no cultivadas o cuasi-prístinas (REF). Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$. -----	51
Figura 2.3. A. Contenido de carbono orgánico en cada fracción para las distintas profundidades y manejos. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico resistente (COR) y carbono orgánico del suelo (COS). B. Contenido de nitrógeno orgánico en cada fracción para las distintas profundidades y manejos. Nitrógeno total (NT), nitrógeno particulado (NOP) y nitrógeno orgánico resistente (NOR). Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$ entre manejos para cada profundidad y componente orgánico.-----	55
Figura 2.4. Relaciones entre el carbono potencialmente mineralizable (CPM) y el carbono orgánico del suelo (COS; A), el carbono orgánico particulado (COP; B) y el carbono orgánico resistente (COR; C). Se presentan los puntos discriminados por profundidad. -----	57

Figura 2.5. Relaciones de estratificación de los valores de los distintos componentes orgánicos. A: Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico resistente (COR), carbono orgánico del suelo (COS) y carbono potencialmente mineralizable (CPM). B. Nitrógeno total (NT), nitrógeno particulado (NOP) y nitrógeno orgánico resistente (NOR). Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$ entre manejos. ----- 59

Figura 2.6. Relación entre la inestabilidad estructural (IE) de los suelos y el componente orgánico. COS: carbono orgánico del suelo, COP: carbono orgánico particulado, COR: carbono orgánico resistente. ----- 64

Figura 2.7. Relación entre los valores observados de inestabilidad estructural (IE) y los predichos por el modelo múltiple. COS: carbono orgánico del suelo (g kg^{-1}) y contenido de limo (g kg^{-1}). ----- 64

Figura 2.8. Relación entre la densidad aparente del suelo (DAP) y el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) para dos profundidades (prof; 0-5 y 5-15 cm) y adquiere el valor de 0 para 0-5 cm y de 1 para 5-15 cm ----- 66

Figura 2.9. Resistencia a la penetración (RP) vs. contenido hídrico del suelo (CH; %) para dos profundidades de muestreo. SD: siembra directa; LC: suelos laboreados. Labranza: variable Dummy con valor 1 para SD y valor 0 para LC.----- 69

Figura 2.10. Tasa de infiltración para los distintos suelos y manejos. La letra indica las diferencias de manejo dentro de cada clase textural ($P = 0,05$). SD= siembra directa y LC= labranza convencional.----- 72

Figura 2.11. Gráfico de componentes principales. Los vectores indican el peso relativo de cada variable en cada eje. Espesor A, densidad aparente (DAP); carbono orgánico del suelo (COS), compactación relativa (CR), carbono orgánico particulado ($> 53 \mu\text{m}$; COP); carbono orgánico resistente ($< 53 \mu\text{m}$; COR); inestabilidad estructural (IE).

Manejo del suelo (Manejo). SD: siembra directa; LC: Δ laboreados; y \bullet referencia
cuasi prístinos.----- 74

Figura 3.1 a. Perfil cultural con estructura laminar discontinua, de diseño símil a
huellas (De Batista et al., 2005).----- 79

Figura 3.1 b. Perfil cultural con estructura laminar continua (De Batista et al., 2005). 79

Figura 3.2. Gráfico de componentes principales. Los vectores indican el peso relativo
de las variables en cada eje. LAMINAS; GRANU: proporción de estructura laminar o
granular en la situación evaluada; CULTANT: cultivo antecesor (1= maíz; 2=trigo/soja
II), ubicación (1=centro de lote; 2= cabecera); AÑOS DESDE PASTURA: años desde
la última pastura, N° CULTIVOS: número de cultivos agrícolas desde la última pastura,
----- 87

ESPESOR: espesor promedio de la estructura laminar. Tabla con el valor de los
eigenvalues de cada variable en el componente principal 1 y 2. ----- 87

Figura 3.3. A) Frecuencia de estructura laminar para la interacción cultivo antecesor
(CULTANT) x ubicación en el lote (UBICACION). Se presenta en el recuadro el
resultado del ANVA con diseño de parcelas divididas. Letras distintas indican
diferencias significativas entre centro y cabecera para cada antecesor evaluado. **B)** Ídem
para la frecuencia de estructura granular. ----- 89

Figura 3.4. Frecuencia de estructura desfavorable (laminar+masiva) para la interacción
cultivo antecesor (CULTANT) x ubicación en el lote (UBICACION). Se presenta en el
recuadro el resultado del ANVA con diseño de parcelas divididas. Letras distintas
indican diferencias significativas entre centro y cabecera para cada antecesor evaluado.
----- 90

Figura 3.5. Espesor o desarrollo de la estructura laminar para la interacción cultivo
antecesor (CULTANT) x ubicación en el lote (UBICACION). Se presenta en el

recuadro el resultado del ANVA. Letras distintas indican diferencias significativas entre las situaciones.----- 90

Figura 3.6. Frecuencia de estructura laminar en función de los años desde la última pastura. ----- 94

Figura 4.1. Localización de los sitios experimentales. ----- 108

Figura 4.2. A. Precipitación durante el ciclo del cultivo de maíz y en el mes de diciembre en los distintos ensayos. La media histórica de la región está indicada con punto. ----- 118

Figura 4.3. Tasa de infiltración para los tratamientos a la siembra del cultivo de maíz considerando los 12 sitios. Se indica error estándar.----- 120

Figura 4.4. Relación entre los valores de densidad aparente en el testigo y descompactado para las profundidades de 0-5 cm y 15-20 cm. Se indica la línea 1:1. En rojo se muestran los valores de densidad aparente de 15-20 cm que sobrepasa los valores críticos de densidad aparente estimados a partir de la función propuesta por Pilatti y de Orellana (2000). ----- 122

Figura 4.5. Relación entre la humedad gravimétrica del testigo y descompactado en los 12 sitios a la siembra del maíz. La línea indica la relación 1:1.----- 125

Figura 4.6. Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad para testigo y descompactado a la siembra del cultivo de maíz para los 12 sitios. Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas $P < 0,01$.----- 125

Figura 4.7. Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad para los tratamientos testigo y descompactado previo a la cosecha del cultivo de maíz para los 12 sitios. Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas $P < 0,01$. ----- 126

Figura 4.8. Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad para los tratamientos testigo y descompactado a la siembra del cultivo de soja de primera o

segunda según el sitio para 3 sitios (Sitios 8,11 y 12). Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas $P < 0,05$. Contenido hídrico gravimétrico = 17-22 % en peso.

----- 126

Figura 4.9. Distribución de la abundancia radical en los distintos sitios para los dos tratamientos evaluados (Campaña 2004 y 2005). Círculos llenos testigo y círculos vacíos descompactado. Se presenta el valor de P para el tratamiento, la profundidad y la interacción. SE= sitio experimental. nd: dato no disponible. Escala de abundancia radical: 0 ausencia de raíces y 5 máxima abundancia. ----- 131

Figura 4.10. Distribución de la abundancia radical en los distintos sitios para los dos tratamientos evaluados. Se presenta la escala correspondiente a los 5 niveles de abundancia evaluados. SE= sitio experimental. nd: dato no disponible. En el centro se indica la planta y la distancia en sentido horizontal a partir de ella.----- 132

Figura 4.11. Distribución de la abundancia radical promedio de los 6 sitios presentados en la Figura 4.9 para los dos tratamientos evaluados. Se indica con asterisco diferencias significativas al $P < 0,05$ en el estrato promedio de 0-10 cm aplicando un diseño de t-apareada. SE= sitio experimental. Escala de abundancia radical: 0 ausencia de raíces y 5 máxima abundancia.----- 134

Figura 4.12. Distribución de la abundancia radical de soja promedio de tres sitios correspondientes a la última campaña de maíz evaluada 2007/8. Se indica con asterisco diferencias significativas al $P < 0,05$ en el estrato 5-10 cm aplicando un diseño de t-apareada. Escala de abundancia radical: 0 ausencia de raíces y 5 máxima abundancia. ----- 135

Figura 4.13. Distribución de la abundancia radical de soja de los tres sitios presentados en la Figura 4.12 para los dos tratamientos evaluados. Se presenta la escala correspondiente a los 5 niveles de abundancia evaluados. SE= sitio experimental. nd:

dato no disponible. En el centro se indica la planta y la distancia en sentido horizontal a partir de ella.----- 136

Figura 4.14. A- Rendimiento promedio de los tratamientos para los 12 sitios. Las barras indican el error estándar. B- Rendimientos del tratamiento Testigo vs. rendimiento del tratamiento Descompactado y línea 1:1.----- 138

Figura 4.15. Rendimiento Testigo vs. Incremento del rendimiento. A) expresado en forma absoluta según, Rendimiento Descompactado-Rendimiento Testigo (kg ha^{-1}), y B) en forma relativa rendimiento según, $(\text{Rendimiento Descompactado-Rendimiento Testigo}) * 100/\text{Rendimiento Testigo}$.----- 139

Figura 4.16. Relación entre el rendimiento con A) el número de granos y B) el peso de 1000 granos. Los datos corresponden a las campañas 2004/04 y 2005/06. ----- 139

Figura 4.17. Análisis de componentes principales. CP1 y CP2 componentes principales 1 y 2. Variables: ARENA y LIMO: contenido de arena y limo de 0-20 cm, Humedad hasta 40 cm, RP: resistencia a la penetración promedio de 0-40 cm, DAP: densidad aparente de 0-5 y de 15-20 cm, MO: contenido de materia orgánica de 0-20 cm, Infiltración método USDA; Trat: tratamiento: Testigo: 1 y Descompactado: 2. Se presenta la tabla con los eigenvalues de las variables para CP1 y CP2. ----- 142

Figura 5.1. Curva teórica de densidad aparente vs. contenido hídrico del suelo obtenida a partir del Test de Proctor. DMAX: densidad aparente máxima alcanzada en el contenido hídrico crítico (CHC). SC: susceptibilidad a la compactación o pendiente de la rama seca. ----- 146

Figura 5.2. Ubicación de las localidades donde se encuentran los sitios evaluados.-- 149

Figura 5.3. Relación entre densidad aparente máxima estimada por el modelo (DMAX ESTIMADA) y la densidad aparente máxima observada o medida (DMAX OBSERVADA). COS: carbono orgánico del suelo; A: contenido de arena (g kg^{-1}); M:

manejo del suelo, Pastura, parques, monte y siembra directa= 0 y 1 para suelos laboreados. N= 24.-----	157
Figura 5.4. Relación entre contenido hídrico crítico estimado por el modelo (CHC ESTIMADO) y el contenido hídrico crítico observado o medido (CHC OBSERVADO). COS: carbono orgánico del suelo; A: contenido de arena (g kg^{-1}). N= 24.-----	158
Figura 6.1. Cursograma del racional de la tesis.-----	165
Figura 6.2. Resumen de los resultados del Capítulo 4.-----	173
Figura 6.3. Variación del contenido de humedad crítico (CHC) con el carbono orgánico del suelo (COS) y el contenido de arena según modelo Figura 5.2.-----	175

Índice de Fotos

Foto 1.1. Cultivo de soja sembrado en SD sobre rastrojo de trigo.	28
Foto 1.2. Paratill® utilizado para realizar descompactación profunda (30-40 cm).	32
Foto 2.1. Ejemplo de vistas de situaciones muestreadas.	43
Foto 3.1. Agregación laminar en superficie en planteos de SD en el N de Buenos Aires.	78
Foto 3.2. Estructura laminar en los primeros centímetros del suelo.....	88
Foto 3.3. Agregación por enredado o “ <i>binding</i> ” producido por la pastura.....	95
Foto 3.4. Ay B. Corte delgado de la zona de cabecera correspondiente a antecesor maíz (lote LS 16). El ancho de la foto representa 2,5 cm.	97
Foto 3.5.A y B. Corte delgado de la zona de centro correspondiente a antecesor maíz (lote LS 16). El ancho de la foto representa 2,5 cm.	99
Foto 3.6.A y B. Corte delgado de la zona de cabecera correspondiente a antecesor trigo/soja II (lote SC). El ancho de la foto representa 2,5 cm.	100
Foto 3.7. A y B. Corte delgado de la zona del centro del lote correspondiente a antecesor trigo/soja II (lote SC). El ancho de la foto representa 2,5 cm.	101
Foto 4.1. Vista del ensayo del Sitio Experimental 5 durante la práctica de descompactación y en dos momentos del ciclo del maíz.	110
Foto 4.2. Calicata para cuantificación de abundancia de raíces por el método de la cuadrícula.	112

Abreviaturas

COS	Carbono orgánico del suelo
SD	Siembra directa
LC	Labranza convencional (reducida o vertical)
DAP	Densidad aparente
DMAX	Densidad aparente máxima según test de Proctor
CHC	Contenido hídrico crítico según test de Proctor
CR	Compactación relativa
SC	Susceptibilidad a la compactación
COP	Carbono orgánico particulado (COS > 53 μ m)
COR	Carbono orgánico resistente (COS < 53 μ m)
RP	Resistencia a la penetración
IE	Inestabilidad estructural
TI	Tasa de infiltración
COM	Carbono potencialmente mineralizable em 10 días
MOT	Materia orgánica del suelo
NOP	Nitrógeno orgánico particulado (NT > 53 μ m)
NOR	Nitrógeno orgánico resistente (NT < 53 μ m)
NT	Nitrógeno total
A	Arena
M	Manejo
DAPactual	Densidad aparente actual del suelo
SUC	Susceptibilidad a la compactación

Resumen

En el norte de la región pampeana durante los últimos 20 años se produjo un importante reemplazo de los sistemas de labranza convencional (LC) por los de siembra directa (SD). Los impactos sobre el suelo de dicho reemplazo no han sido aún bien identificados, dificultando la adopción de estrategias de manejo adecuadas. El primer objetivo de esta Tesis fue la identificación de indicadores edáficos para monitorear la calidad de los suelos. Los suelos agrícolas (LC y SD) presentaron 23% menos de contenido de carbono orgánico y mayor densidad aparente y compactación relativa que los cuasi-prístinos. En relación a LC, la SD disminuyó la inestabilidad estructural pero aumentó en 0,77 MPa la resistencia a la penetración en los primeros centímetros. La tasa de infiltración (TI) fue similar en SD que en LC en suelos francos, pero en los suelos franco limosos y franco arcillo limosos SD presentó menores valores, estando asociados a la presencia de estructuras laminares. El segundo objetivo fue identificar los factores que se relacionan con la presencia de estas estructuras. Su frecuencia fue mayor en zonas de mayor tránsito (cabeceras de lote) y fue menor luego del doble cultivo trigo/soja de segunda. En 12 ensayos de campo y tres campañas agrícolas, se halló que la descompactación mecánica mejoró la calidad física de los suelos manejados con SD e incrementó en promedio 6,2 % los rendimientos de maíz. La perdurabilidad de la descompactación no llegó al año, debido a la recompactación del suelo durante la cosecha del maíz. A partir de variables de fácil determinación (carbono orgánico, contenido de arena y sistema de manejo), se ajustaron ecuaciones de edafotransferencia para estimar la densidad máxima de los suelos y el contenido hídrico crítico. Argentina es el segundo país del mundo con mayor superficie en SD. Ello genera un escenario estratégico para el estudio y evaluación del efecto de este sistema de manejo sobre la

evolución de la calidad de los suelos, detectando potenciales problemáticas. La presente tesis aporta información novedosa sobre el impacto de la SD en la calidad física de los suelos y, en especial, demuestra la interacción entre la textura de los suelos y el comportamiento de la infiltración en SD. Este comportamiento se asocia a la conformación de una estructura laminar desfavorable. Su conformación estaría relacionada tanto con factores naturales como antrópicos (tránsito de maquinaria). A partir de los resultados de esta Tesis, se recomienda monitorear la calidad física de los suelos controlando periódicamente su tasa de infiltración y su resistencia a la penetración evitando las generalizaciones acerca de una evolución favorable de la calidad del suelo tan solo por presentar una alta estratificación del componente orgánico. La calidad física mejora cuando el manejo con SD se combina con presencia de raíces vivas y tránsito agrícola controlado.

Palabras claves: carbono orgánico, carbono particulado, siembra directa, propiedades físicas, estructura laminar, descompactación, test de Proctor, tránsito, suelos limosos.

Abstract

Soil impacts generated by the replacement of conventional tillage (CT) by no tillage (NT) in the northern Pampas region in the last 20 years have not yet been clearly identified. This has hindered the adoption of appropriate management strategies. The main objective of this thesis was to identify soil indicators to monitor soil quality. Agricultural soils (CT and NT) presented 23% less organic carbon content and higher bulk density and relative compaction than quasi-pristine ones. As compared with CT, NT showed a decreased structural instability but an increased penetration resistance of 0.77 MPa in the first centimeters. The infiltration rate (IR) in NT was similar to that in CT in loamy soils, but in silt loam soils and silty clay loam soils, NT presented lower values, associated with the presence of platy structure. The factors related to the presence of these structures were then identified. Their frequency was higher in areas of high traffic and lower after wheat/second-crop soybean crops. In 12 field trials and three agricultural seasons, soil alleviation was found to improve the physical quality of the soils managed with NT and to increase maize yields by 6.2% on average. Soil alleviation lasted less than one year due to the recompaction of the soil during the corn harvest. Pedotransfer equations were then fitted from variables easy to determine such as organic carbon, sand content, and management system, to estimate the maximum density and the critical water content of the soils. The results of this thesis allow recommending that the physical quality of the soils should be monitored periodically, controlling their infiltration rate, resistance to penetration and structural instability. These variables improve when NT is combined with the presence of live roots and controlled agricultural traffic.

Keywords: soil organic carbon, particulate organic carbon, no-tillage, soil physical properties, platy structure, soil alleviation, Proctor Test, silty soils.

Capítulo 1.- Introducción general

La siembra directa (SD) es un sistema de producción agrícola donde el cultivo se siembra en el suelo no laboreado con el rastrojo del cultivo antecesor en superficie (Carter et al., 2003; Derpsch, 2011; Foto 1.1). Este sistema se emplea en aproximadamente 117 millones de hectáreas en el mundo (Campaña 2007/8) para producir cultivos como maíz (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L., Merrill) y trigo (*Triticum aestivum* L.; Derpsch, 2011). La Argentina es uno de los tres países que poseen mayor superficie agrícola manejada en SD junto con Estados Unidos y Brasil (Figura 1.1; Derpsch, 2011; AAPRESID, 2011). Considerando que la superficie destinada a cultivos de granos en Argentina alcanzó 30 millones de hectáreas en la campaña 2007/8, el 85% de la superficie agrícola Argentina es manejada en SD. Esto genera un escenario de interés a nivel mundial para la evaluación de la evolución de la calidad de los suelos bajo SD; también lo es a nivel país ya que, prácticamente toda su producción se asienta sobre este sistema.

Los diferentes métodos de labranza poseen ventajas y desventajas en un sistema de producción determinado. Morris et al. (2010) mencionan que los productores eligen el sistema de labranza en función de distintas medidas de “performance” o comportamiento. En tal sentido, proponen la evaluación de los sistemas de labranzas a través de su “performance” sobre los costos, el rendimiento y calidad de los cultivos y los beneficios ambientales y la biodiversidad (Figura 1.2). Mencionan, que los productores del Reino Unido eligen el sistema de producción que les permite lograr mejores tiempos operativos para implantar exitosamente sus cultivos obteniendo la mayor rentabilidad.



Foto 1.1. Cultivo de soja sembrado en SD sobre rastrojo de trigo.

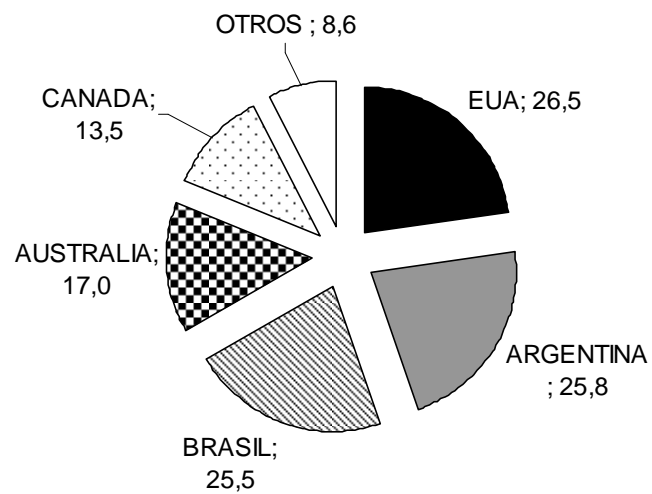


Figura 1.1. Superficie en SD en millones de hectáreas en distintos países en la campaña 2007/8 (Derpsch, 2011).

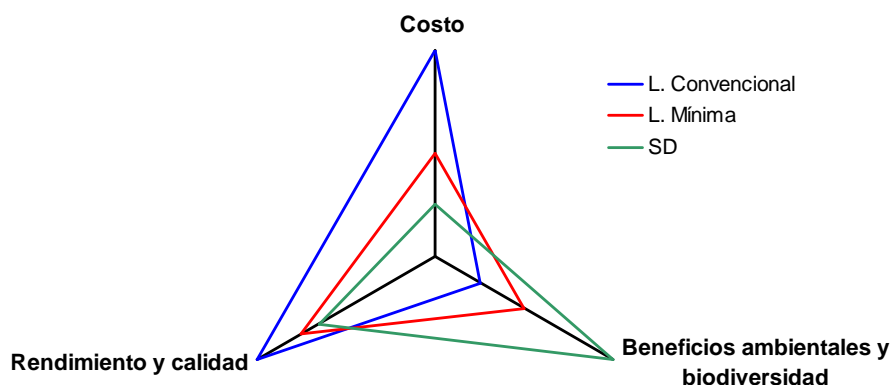


Figura 1.2. Comportamiento relativo de distintos sistemas de labranzas en relación a distintas medidas (rendimiento y calidad; beneficios ambientales y biodiversidad; costos; Morris et al., 2010).

En la región Pampeana, como en otras regiones templadas del mundo, el reemplazo de labranza convencional (LC) por la SD resultó en un mejor control de la erosión, conservación del agua, ciclado de nutrientes, ahorro de tiempo operativo, reducción del uso de combustibles fósiles y aumento del secuestro de carbono en el suelo (Díaz Zorita et al., 2002; Bolliger et al., 2006; Steinbach y Álvarez, 2006; Lal et al., 2007; Thomas et al., 2007; Strudley et al., 2008). Los aspectos económicos, la reducción del tiempo operativo y la conservación del suelo fueron los principales factores responsables de la amplia adopción de la SD en Argentina a partir de la década de los 90'.

El concepto de calidad de suelo, estrechamente asociado al de sustentabilidad, se define como la capacidad del suelo para cumplir con un conjunto de funciones, que son el sostenimiento del crecimiento vegetal y animal, la retención de la materia orgánica (MO) y los nutrientes asociados a ella, y la regulación del flujo de agua (Larson y Pierce, 1991; 1994). Sostener o aumentar la calidad del suelo es esencial tanto para cubrir la demanda creciente de alimentos, como para conservar el ambiente. La calidad

del suelo puede ser evaluada a través de un conjunto de propiedades químicas, físicas y biológicas del mismo en forma simultánea. Sin embargo, no existe un acuerdo en las variables o indicadores que permiten una acabada caracterización y monitoreo de la calidad del suelo (Wander y Bollero, 1999).

La prácticamente nula remoción en SD produce una serie de cambios en varias propiedades químicas, físicas y biológicas edáficas respecto de otros sistemas de labranza. Estos cambios tienen lugar principalmente en los primeros centímetros del perfil. En la Pampa Ondulada existen ensayos de sistemas de labranza de larga duración, por ejemplo, los localizados en las Estaciones Experimentales de Pergamino y Marcos Juárez de INTA, sobre Argiudoles Típicos de textura superficial franco limosa. En ellos se ha registrado en SD una estratificación de la MO, especialmente de las fracciones más lábiles (Álvarez et al., 1995; Álvarez et al., 1998; Álvarez y Álvarez, 2000) y de los nutrientes poco móviles como el fósforo (Chagas et al., 1995; Lavado et al., 1999), como consecuencia de la no inversión de la gleba de tierra. También se mencionan aumentos en la MO del horizonte superficial con respecto al hallado en sistemas labrados (Marelli y Arce, 2000). Steinbach y Alvarez (2006) integrando los datos de ensayos comparativos de labranzas de la región pampeana estimaron un aumento promedio de $2,76 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (masa de suelo equivalente) debido a la introducción de SD. El incremento relativo logrado por la SD está inversamente relacionado con el contenido original de MO del suelo al momento de la introducción de esta práctica.

A diferencia del mayor cuerpo de conocimientos referidos a los efectos de la SD sobre la materia orgánica y los nutrientes vegetales, la información acerca de los efectos de la SD sobre las propiedades físicas de los suelos es limitada y dispar. Muchos fenómenos físicos, como la compactación de los primeros centímetros, son difíciles de

interpretar en sus causas. Ello es así porque a la variabilidad natural de los suelos, se le adiciona la causada por factores de manejo propios de cada establecimiento y de cada lote. Los factores naturales se refieren específicamente a la textura, la mineralogía, el contenido hídrico durante la aplicación del estrés compactante y el contenido de MO (Díaz-Zorita y Grosso, 2000; Gupta y Allmaras, 1987). Entre los factores de manejo se destaca, por su importancia, el sistema de labranza usado. Es esperable la mejora de la calidad estructural de la capa superficial del suelo en SD, pero la literatura de las últimas dos décadas ha mostrado que las propiedades físicas superficiales del suelo no siempre evolucionan favorablemente bajo SD continua (Taboada et al., 1998; Díaz Zorita et al., 2002; Lipiec et al., 2006; Strudley et al., 2008).

La percepción de los productores de que existe compactación o endurecimiento superficial en SD y una menor infiltración- visualizada en forma de encharcamiento temporal- los ha llevado al uso periódico de descompactadores, como los equipos de tipo paratill (Foto 1.2), paraplow, cultivie, entre otros - o bien a aflojar el suelo mediante el laboreo con disco (Hamilton-Manns et al., 2002; Alvarez et al., 2006).

En consecuencia, surge la importancia de evaluar a escala regional el comportamiento de la calidad del suelo, con énfasis en las propiedades físicas, bajo distintos manejos. Asimismo, profundizar en los factores determinantes del desarrollo de estructuras superficiales no deseables en SD, y evaluar el efecto y la perdurabilidad de prácticas tendientes a aliviar o evitar la compactación del suelo en estos sistemas de producción.



Foto 1.2. Paratill® utilizado para realizar descompactación profunda (30-40 cm).

La presente tesis abarca una secuencia de análisis con distintas escalas de percepción, que atiende a cumplimentar los siguientes **objetivos generales**:

- Identificar un número mínimo de indicadores edáficos que permitan monitorear la evolución de la calidad del suelo. Para ello se evaluará a escala regional el impacto de sistemas de labranza contrastantes sobre la calidad del suelo, utilizando situaciones cuasi-prístinas como referencia (Capítulo 2).
- Identificar los factores de manejo y/o propiedades edáficas que se relacionan con la presencia de compactación superficial y de estructura laminar (proporción y diseño). Para ello se utilizará información y datos obtenidos en el estudio regional y de muestreos censales detallados (Capítulo 3).
- Analizar a escala microscópica la morfología de las estructuras presentes en planteos de SD continuos (Capítulo 3).

- Investigar el efecto sobre los cultivos de los cambios edáficos promovidos por la práctica de la descompactación, en suelos manejados con SD en ensayos a campo. Se cuantificará la perdurabilidad de los efectos causados por la descompactación (Capítulo 4).

- Generar ecuaciones de pedotransferencia para estimar en forma sencilla los parámetros característicos del test de compactabilidad de Proctor con el fin de contar con herramientas de manejo que permitan prevenir la compactación (Capítulo 5).

Capítulo 2.- Calidad de suelos: Un estudio a escala regional

2.1 INTRODUCCIÓN

La caracterización de calidad del suelo implica la evaluación simultánea de aspectos biológicos, químicos y físicos. La mayoría de los estudios, que tuvieron como objetivo evaluar cambios en la calidad de los suelos, coinciden en que la materia orgánica (MO) o el carbono orgánico del suelo (COS) son el principal indicador de calidad, e influyen de manera significativa sobre la productividad (Quiroga et al., 2001) y el funcionamiento del suelo. Existe una marcada demanda de indicadores confiables y de fácil determinación para monitorear la calidad de los suelos, de manera de poder evaluar su evolución bajo creciente presión productiva o cambios generales de manejo.

La importancia del COS radica en que es un componente asociado con la productividad del agroecosistema, que afecta tanto a la biología del suelo como a la fertilidad física y química del mismo. Sin embargo, el COS por su orden de magnitud tarda en reflejar los cambios causados por el tipo de manejo. Por ello, se han buscado parámetros más sensibles que, en el corto plazo, sirvan como indicadores para predecir los cambios que determina el manejo. Es así que surgen diferentes técnicas que evalúan la fracción más lábil del COS. Una de ellas es la respiración *in-vitro*, a través de mediciones de la respiración de los microorganismos del suelo en condiciones de temperatura y humedad controladas (Álvarez et al., 1995). Otra técnica disponible es el fraccionamiento granulométrico, que separa las fracciones por tamaño, pudiendo identificar la fracción de mayor tamaño, constituida por aquella que supera los 53 μm (COP-carbono orgánico particulado, $\text{COS} > 53 \mu\text{m}$, Quiroga et al., 1996). Casanovas et al. (1995) comprobaron que la correlación entre el COS y el COP es generalmente baja, dado que su tasa de síntesis y degradación responde de distinta manera ante cambios en el manejo de los suelos. El COP es muy dinámico y sería un indicador más temprano

respecto al COS en lo que a calidad de suelos se refiere. Otros autores proponen evaluar el índice de estratificación de los diferentes componentes del COS, con principal énfasis en aquellos asociados a las fracciones más lábiles (por ejemplo: COP o respiración microbiana; Franzluebber, 2002). Ello se sustenta en que en los primeros centímetros tienen lugar los intercambios suelo-atmósfera, por ejemplo infiltración. Asimismo, una mayor estabilidad estructural en dicho estrato permite atenuar los procesos erosivos. Aquellas fracciones orgánicas que magnifiquen el índice de estratificación y permitan visualizar diferencias debido a diferentes manejos actuales, serían útiles para predecir cambios futuros en el COS.

Los parámetros de fertilidad física son una parte importante de la evaluación integral de la calidad de suelo (Hussain et al., 1999). Estos parámetros están, en general, determinados por la organización estructural de los suelos, o dicho de otro modo, su estado de agregación caracterizado por la forma, estabilidad y resiliencia (Kay, 1990). Las distintas formas posibles que toman los agregados superficiales determinan la distribución por tamaño y la mayor o menor tortuosidad de los poros relacionados. De allí que la caracterización de la entrada de agua en el suelo (i.e. tasa de infiltración; TI) sea reconocida como un indicador de calidad de los mismos. No sólo es importante que los suelos posean determinadas formas estructurales (e.g. gránulos o terrones, en lugar de láminas), sino que esas formas deseables mantengan buena estabilidad a lo largo del tiempo (Kay, 1990; Soil Survey Staff, 1994). La estabilidad de los agregados en agua responde, en parte, a procesos bióticos de pegado o “bonding” por compuestos orgánicos de carbono lábil (Degens, 1997). Otros parámetros físicos de relevancia, más asociados a caracterizar impedancias que afectan el crecimiento radical, son la resistencia a la penetración (RP) y la densidad aparente (DAP).

Es frecuente encontrar limitantes físicas en suelos con altos contenidos de limo fino (2 – 20 μm), como los que prevalecen en el nordeste de la región Pampeana, o Pampa Ondulada. Luego de la aplicación continua de SD a lo largo de varios años, muchos suelos desarrollan compactación y endurecimiento superficial, que se manifiesta con el aumento de la DAP y de la RP y la disminución de la macroporosidad (Voorhees y Lindstrom, 1984; Taboada et al., 1998; Rhoton, 2000; Díaz Zorita et al., 2002; Sasal et al., 2006). Se cree que la compactación superficial se revierte en forma natural luego de varios años de aplicación de SD (por ejemplo > 5 años) debido a la estratificación del carbono orgánico del suelo (COS) (Thomas et al., 1996; Rhoton, 2000) y, eventualmente, la conformación de macroporosidad estable como consecuencia de la formación de bioporos por la fauna edáfica y las raíces (Voorhees y Lindstrom, 1984; Rhoton, 2000; Hubert et al., 2007). Bajo estas condiciones, se esperaría una mayor TI. Esta mejora es atribuida a la conformación de bioporos continuos y más estables que los generados por las labranzas.

Sin embargo, algunas investigaciones recientes contradicen esta tendencia favorable (Sasal et al., 2006; Strudley et al., 2008; Morris et al., 2010). A pesar que la estabilidad estructural suele ser mayor en SD, esto no necesariamente resulta en una mayor macroporosidad o TI (Taboada et al., 1998; Micucci y Taboada, 2006; Sasal et al., 2006; Taboada et al., 2008). Trabajos internacionales (Morris et al., 2010) y nacionales no muestran una evolución favorable de la TI en SD (Ferrerías et al., 2000; Sasal et al., 2006). Lipiec et al. (2005) encontraron que, en un ensayo de 18 años de duración, el tratamiento de SD presentaba tasas de infiltración 64% menores que en LC, como consecuencia de una mayor proporción de macroporos en la última. Sasal et al. (2006) evaluó la infiltración en suelos labreados y bajo SD en tres ensayos de larga duración localizados en el EEA INTA Pergamino. En dos de ellos, la infiltración fue un

25% mayor en los suelos laboreados, mientras que en el tercer ensayo los tratamientos de labranzas no se diferenciaron entre sí. En tal sentido, recientemente se informó el desarrollo de agregados laminares con porosidad planar (Álvarez et al., 2004; De Battista et al., 2005; Sasal et al., 2006) en planteos de SD continua.

Surge entonces la necesidad de realizar en la Pampa Ondulada estudios a escala regional, que comparen el impacto de manejos de suelo contrastante (cuasi-prístinos, sistemas laboreados y SD) sobre un número importante de variables químicas, físicas y biológicas, evaluadas simultáneamente en lotes de producción con suelos que difieren en su textura superficial. Por otra parte, resulta de sumo interés seleccionar un conjunto mínimo de determinaciones que presenten alta sensibilidad a los cambios por manejo. Ello permitirá su utilización para el monitoreo de la evolución de la calidad del suelo en el corto plazo, facilitando la decisión de aplicar medidas correctivas de ser necesario.

Objetivos generales

Los objetivos generales del capítulo son:

- 1- Caracterizar a escala regional el estado de la calidad del horizonte superficial de los suelos bajo distintos sistemas de labranza, utilizando situaciones cuasi-prístinas como referencia.

- 2- Seleccionar un conjunto mínimo de variables que resulten sensibles a los distintos manejos para monitorear cambios en la salud del suelo.

Objetivos específicos:

En suelos bajo distintos manejos, y que difieren en su textura superficial:

- 1- Cuantificar, a escala regional, cambios en la distribución del COS y su fracción lábil caracterizada por distintas metodologías (COP y respiración microbiana *in-vitro*).
- 2- Caracterizar un conjunto de propiedades físicas edáficas, a saber: TI, DAP, RP, estabilidad estructural.
- 3- Evaluar las relaciones de estratificación del COS, COP y la respiración microbiana *in-vitro*, expresados como concentración.
- 4- Establecer relaciones entre las propiedades físicas edáficas, el componente orgánico del suelo y sus fracciones, y la textura del suelo.
- 5- Identificar un conjunto o set mínimo de propiedades (físicas o asociadas al componente orgánico) que permitan caracterizar el “estado” de la calidad del suelo y su monitoreo en el corto plazo.

Hipótesis relacionadas

- ✓ La evolución de las propiedades físicas bajo distintos manejos del suelo está regulada por la textura superficial del mismo y el contenido de COS.
- ✓ La DAP y estabilidad estructural de los suelos están directamente relacionadas con el contenido de COS y, especialmente, con su fracción lábil independientemente del manejo del suelo.

- ✓ En los sistemas de SD se produce una fuerte estratificación del COP y en menor medida del COS. Ello se traduce en mayor estabilidad estructural, pero no necesariamente en el desarrollo de una forma estructural superficial deseable.

- ✓ Se puede sintetizar la caracterización del estado de la calidad del suelo en la medición de un menor número propiedades.

2.2 MATERIALES Y METODOS

2.2.1 Caracterización de la región estudiada

La Pampa Ondulada, con una superficie de alrededor de 5 Mha, es una planicie templada, con un promedio anual de precipitaciones de 940 mm concentradas en primavera y verano y con una temperatura media anual de 17°C (Soriano et al., 1991) Esta región comprende una parte importante de los suelos más productivos del país. Estos suelos difieren en sus texturas, siendo en general francas hacia el oeste (Argiudoles Típicos), pasando a franco limosas y franco arcillo limosas en el este (Argiudoles Abrúpticos y Vérticos) (Salazar Lea Plaza y Moscatelli, 1989). Esta región posee la historia agrícola más antigua del país, pues estuvo asociada a las primeras corrientes inmigratorias.

2.2.2 Sitios y tratamientos considerados

Treinta y nueve lotes de producción y seis sitios no cultivados fueron muestreados en la región abarcando los distintos tipos de suelos y situaciones de manejo

(Figura 2.1). Los lotes de producción seleccionados contaban con el mismo nivel tecnológico de producción como dosis de fertilización, aplicación de herbicidas y pesticidas. Algunos establecimientos seguían una rotación con secuencia maíz-soja de primera; y otros aplicaban la rotación maíz-trigo/soja de segunda-soja de primera. Los cultivos fueron manejados y cosechados en forma mecánica. Las situaciones eran producciones en secano. Las gramíneas -maíz y trigo- fueron fertilizadas con nitrógeno en forma de urea o UAN y con fósforo como fosfato diamónico o monoamónico. Las dosis medias aplicadas fueron de 50 kg N ha^{-1} y 16 kg P ha^{-1} , respectivamente. Los sitios bajo LC eran manejados principalmente con rastra de discos (profundidad de laboreo 10 cm) y luego de la siembra las malezas eran controladas mecánica (rastra rotativa y escardillo) y químicamente. En los planteos de SD se utilizaron máquinas sembradoras de SD, y las malezas fueron controladas con herbicidas (principalmente glifosato y atrazina). En caso de ser necesario, se recurrió a la aplicación de fungicidas e insecticidas a los cultivos. Los lotes bajo LC llevaban varias décadas bajo este manejo. Los lotes en SD llevaban bajo este manejo entre 5 y 18 años. El período mínimo de 5 años es considerado suficiente para la estabilización de varias propiedades edáficas, según lo reportado en trabajos de numerosos autores (Voorhees y Lindstrom, 1984; Vanden Bygaart et al., 1999 a; Wander y Bollero, 1999; Rhoton, 2000).

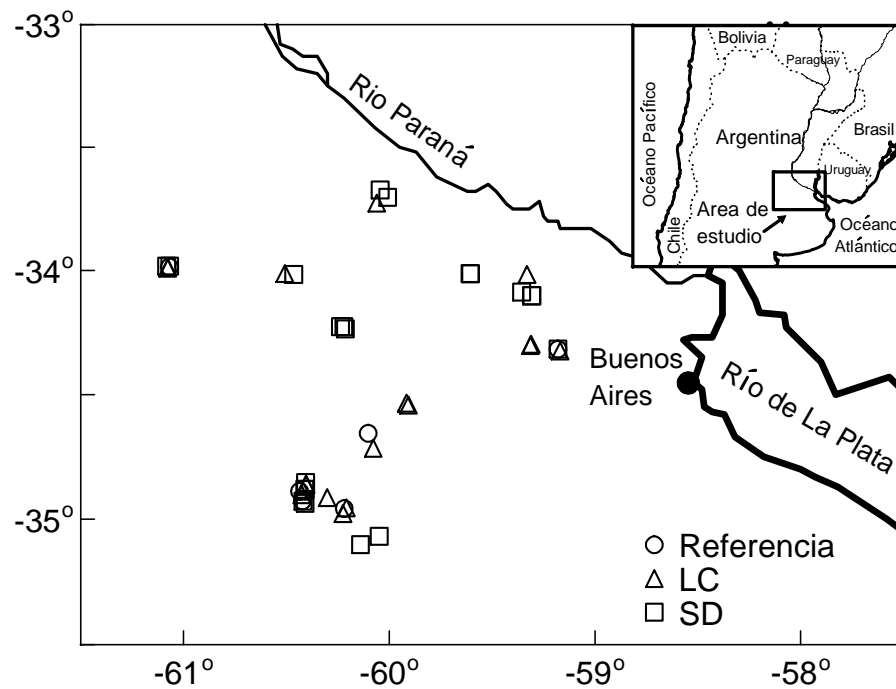


Figura 2.1. Localización de los sitios evaluados. SD: siembra directa y LC: laboreados, Referencia: situaciones de referencia cuasi-prístinas.

Los sitios no cultivados o situaciones cuasi-prístinas de referencia corresponden a parques de estancia o a pasturas de muy largo plazo (más de 20 años) no pastoreadas o pastoreadas con muy baja carga (Foto 2.1). Estas pasturas no presentaban suelo descubierto o evidenciaban daños por pastoreo. Los sitios fueron seleccionados con la guía de los productores. Ellos consideraban estos sitios como la mejor referencia disponible de la condición original. En todos los casos la vegetación estaba dominada por pastos altos y matas. Cada sitio muestreado fue georeferenciado utilizando GPS. El suelo superficial (0 - 30 cm) fue caracterizado en términos de su contenido total de limo (diámetro de partícula 2- 50 μm), contenido de arcilla (diámetro de partícula $< 2\mu\text{m}$; por el método de la pipeta (Gee y Or, 2002) y valor de pH (Tabla 2.1).



Foto 2.1. Ejemplo de vistas de situaciones muestreadas.

Tabla 2.1. Contenido de arcilla y limo y pH de los suelos bajo distintos manejos y grupos textuales (0-30 cm). SD: siembra directa y LC: laboreados, Referencias: situaciones de referencia cuasi-prístinas.

Manejo de suelo			Limo	Arcilla	pH
			g kg ⁻¹		
Referencias n= 6	Media		507	210	6,01
	ES		11	20	0,09
	Mín.		465	122	5,72
	Máx.		544	250	6,30
LC n= 18	Media		526	233	5,84
	ES		17	8	0,07
	Mín.		380	175	5,36
	Máx.		647	290	6,57
SD n= 21	Media		522	243	5,81
	ES		17	11	0,05
	Mín.		360	165	5,32
	Máx.		638	335	6,31
<i>Valor P</i>			0,86	0,29	0.21
Grupo textural:					
Franco n= 20	Media		460	206	5,86
	ES		11	6	0,04
	Mín.		360	165	5,33
	Máx.		529	252	6,19
Franco limoso/Franco arcillo limoso n= 25	Media		571	258	5,84
	ES		8	9	0,06
	Mín.		505	122	5,32
	Máx.		647	335	6,58
<i>Valor P</i>			<0,001	<0,001	0,61

El diseño experimental fue de tipo factorial completamente aleatorizado con el objetivo de evaluar el efecto independiente y la interacción entre la textura (Factor 1) y el manejo (Factor 2) en las propiedades superficiales del suelo. El Factor 1 fue dividido en dos niveles: (i) franco; y (ii) franco limoso o franco arcillo limosos. El factor 2 consideró tres niveles: (i) LC; (ii) SD continua; y (iii) referencias cuasi prístinos.

2.2.3 Determinaciones químicas, físicas y características morfológicas

Las determinaciones a campo, así como la toma de muestras, se llevaron a cabo entre Mayo y Julio de 2003 y 2004. Las medidas fueron realizadas en estos meses para asegurar la máxima reconsolidación del suelo luego de la labranza en las situaciones LC. Pocos días después del muestreo, el suelo iba a ser laboreado para el siguiente cultivo. Se evitó muestrear sobre las huellas visibles de maquinaria para evitar el efecto del tránsito reciente. En cada sitio de muestreo se determinó el espesor del horizonte A y se caracterizó su morfología (tipo de estructura).

Las muestras fueron tomadas en un área homogénea delimitada en cada lote de aproximadamente (2-3 ha). Las muestras compuestas estaban conformadas por lo menos por 30 sub-muestras tomadas con un barreno en los siguientes estratos: 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm. Sobre las muestras compuestas se determinó el COS por el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982) y el nitrógeno total (NT) por Kjeldhal. El tamaño de partícula fue determinado por el método de la pipeta (Gee y Or, 2002); las muestras fueron pre-tratadas con HCl y H₂O₂ para destruir los carbonatos y materia orgánica, respectivamente. Adicionalmente, se procedió al fraccionamiento húmedo del suelo para determinar el carbono orgánico particulado (COP) y el nitrógeno particulado (NOP) en la fracción mayor a 53 µm (Cambardella y Elliot, 1992; Quiroga et al., 1996). En forma breve, 50 g de suelo seco, 200 ml de agua destilada y 4 esferas de vidrio fueron agitados por 6 horas (100 a 120 golpes min⁻¹). Luego las muestras fueron sometidas a ultrasonido y tamizadas en húmedo por 53 µm. El suelo retenido en este tamiz fue secado en estufa a 60°C y posteriormente se determinó el contenido de C y N.

El carbono orgánico resistente (COR) y el nitrógeno orgánico resistente (NOR) fueron calculados como la diferencia entre el COS y COP y el NT y NOP, respectivamente. La mineralización in-vitro de carbono fue medida luego de 10 días de incubación a 30°C y 50% de la capacidad de retención de agua en el estrato de 0-5 cm y de 5-15 cm. La producción de C-CO₂ fue determinada por absorción en álcali (Álvarez et al., 1995). El carbono respirado en 10 días puede ser considerado como representativo del carbono potencialmente mineralizable (CPM, Franzluebbers et al., 1995). También se determinó el pH (1:2.5 suelo:agua). Se calculó la relación de estratificación de cada componente del COS y del NT, como la concentración del respectivo componente de 0-5 cm dividido la concentración de 5-15 cm. El COS fue también expresado en masa de suelo equivalente según lo propuesto por Neill et al. (1997).

La tasa de infiltración (TI) fue determinada (n= 4) con un método rápido propuesto por USDA (1999) en los sitios de LC y SD. Un cilindro o anillo de 15 cm de diámetro fue insertado 8 cm en el suelo, se sellaron los bordes de contacto entre el cilindro y el suelo, y la superficie de suelo dentro del anillo fue cubierta con un film plástico. Se adicionó dentro del anillo una lámina de una pulgada (2,54 cm) de agua destilada, se retiró con cuidado el plástico y se tomó el tiempo de infiltración (infiltración 1). Esta primera lámina de agua tuvo como objetivo llevar el contenido hídrico de los primeros centímetros del suelo a capacidad de campo. Inmediatamente después, se volvió a proteger la superficie del suelo con el film plástico y se agregó una segunda lámina de 2,54 cm y se registró el tiempo que tardó en infiltrar (infiltración 2). Esta segunda TI intenta caracterizar la tasa de infiltración básica.

La DAP fue determinada por el método del cilindro (Burke et al., 1986) utilizando cilindros de 230 cm³ (7,65 cm de diámetro) (n = 4) en los estratos 0-5, 5-15 y 15-30 cm de profundidad (en la mitad de los respectivos intervalos en los últimos

casos). Los cilindros fueron insertados en dirección vertical utilizando una masa de goma. Los valores de DAP fueron referidos al valor de densidad máxima (DMAX) según el Proctor Test (ASTM, 1992). La DMAX (Mg m^{-3}) se calculó a partir de una ecuación ajustada por Aragón et al. (2000) para los suelos de la región Pampeana:

$$\text{DMAX}=1,766-0,00598 \times \text{LIMO}- 0,0158 \text{ COT} \quad (2.1)$$

Donde LIMO es el contenido de limo del suelo en porcentaje (%) y COT es el porcentaje de carbono orgánico total del suelo (%).

La compactación relativa (CR; %) se calculó como:

$$\text{CR}=\text{DAP} \times 100 / \text{DMAX} \quad (2.2)$$

Donde DAP (Mg m^{-3}) es la densidad aparente y DMAX es la densidad máxima según el test de Proctor estimada por la ecuación 2.1.

La RP fue determinada (n=10) con un penetrómetro dinámico de cono con punta de 60° y diámetro basal de 1,4 cm, hasta una profundidad de 15 cm dando impactos consecutivos resultantes de una pesa de 2 kg cayendo en forma libre con un recorrido de 50 cm (Burke et al., 1986). La RP del suelo fue calculada como el número de golpes requerido para penetrar cada estrato (0-5 cm y 5-15 cm) y convertido a MPa considerando las características constructivas del aparato.

Dos muestras no disturbadas de alrededor de 3400 cm^3 fueron tomadas con pala de los primeros 15 cm para determinar el índice de inestabilidad estructural (IE; Burke et al., 1986). Las muestras fueron primero tamizadas en seco por vibración (4,8, 3,4 y 2 mm de apertura de malla de los tamices) y se determinó el diámetro medio ponderado

de los agregados tamizados en seco. Luego los agregados fueron humedecidos hasta capacidad de campo por acción capilar para evitar el estallido por desplazamiento brusco del aire entrampado. Estos agregados fueron tamizados en húmedo (4,8, 3,4, 2, 1, 0,5, 0,3 mm de apertura de malla) por 30 minutos ($25 \text{ ciclos min}^{-1}$) utilizando un equipo Yoder y se calculó el diámetro medio ponderado resultante del tamizado en húmedo. El índice de IE fue calculado como la diferencia entre el diámetro medio ponderado del tamizado en seco y el del tamizado en húmedo.

Los stocks de carbono (SC) fueron determinados afectando el contenido de carbono por la DAP y la profundidad, o bien, se expresó como masa equivalente, o sea cantidad de carbono (Mg ha^{-1}) a igual masa de suelo en todas las situaciones. Los valores de COS, COP, COR, NT, NOP, NOR, DAP y RP fueron calculados como promedio ponderado de los valores de las capas integradas en cada situación.

2.2.4 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados por análisis de varianza (ANVA) factorial para cada profundidad considerada. Cuando la interacción entre los factores evaluados (manejo y clase textural) no fue significativa ($P > 0,05$), y se encontró que el efecto del manejo fue significativo se utilizó el test de diferencia mínimas significativas para comparar las medias de las diferentes prácticas de manejo. Cuando la interacción fue significativa, el manejo del suelo se comparó dentro de cada clase textural. La homogeneidad de varianza fue siempre testeada, y los datos fueron transformados (\ln) cuando fue necesario.

La asociación entre las propiedades del suelo fueron evaluadas ajustando regresiones simples y múltiples –Método de Stepwise- (Neter y Wasserman, 1974). La

autocolinealidad de las variables independientes fue evaluada con el valor de VIF (variance inflation factor). Tanto el sistema de manejo del suelo como las profundidades del suelo fueron considerados como variables *Dummy* en los modelos de regresión múltiple. La significancia de las regresiones fue analizada utilizando el valor de F.

Se evaluó la distribución normal de los residuales. Se aplicó un análisis multivariado (componentes principales) para buscar los principales gradientes de variación entre sitios. Los gradientes fueron combinaciones lineales de las siguientes características evaluadas de 0-15 cm: IE, COS, COP, COR, DAP, CR, RP, espesor del horizonte A y manejo de suelo (LC= 0; SD= 1; referencia= 2).

2.3 RESULTADOS Y DISCUSION

2.3.1 Caracterización de los grupos texturales y de las propiedades seleccionadas

Los sitios seleccionados pueden ser considerados representativos de todos los grupos texturales (franco, franco limoso, y franco arcillo limoso) encontrados en la región (Tabla 2.1). Asimismo, los manejos están distribuidos en forma equilibrada dentro de los grupos texturales. El pH en los primeros centímetros del suelo fue levemente ácido en todos los sitios estudiados y no se observó ninguna tendencia clara entre los distintos suelos o manejos (Tabla 2.1).

2.3.2 Magnitud y distribución en profundidad de los componentes orgánicos del suelo

Los componentes orgánicos de COS y NT del suelo no fueron afectados por la interacción “manejo x grupo textural” (Tabla 2.2). Por lo tanto, el efecto de los mismos se puede analizar en forma separada, centrándose en las diferencias entre manejos. Los sitios de referencia presentaron mayor COS, NT y componentes lábiles de ambos elementos hasta el 30 cm de profundidad comparado con los sitios bajo agricultura (SD y LC).

La cantidad total de COS y NT (por hectárea, masa de suelo equivalente, Neill et al., 1997) en los primeros 30 cm de suelo, fue siempre significativamente ($P < 0,05$) más alta en los sitios de referencia que en los agrícolas. El COS y el NT no fueron estadísticamente distintos entre SD y LC (Figura 2.2).

Sostener altos aportes de residuos orgánicos al suelo y la ausencia de disturbio mecánico del mismo son fundamentales para mantener niveles elevados de COS y NT (Hermle et al., 2008). Las situaciones de referencia estudiadas son relativamente comparables con la condición original de los suelos de la Pampa Ondulada antes de la introducción de la agricultura a finales del siglo XIX (Soriano et al., 1991). La agricultura desarrollada a lo largo del siglo XX causó una disminución significativa del componente orgánico -COS y NT-, como se evidencia en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Componentes orgánicos del suelo según el manejo. Carbono orgánico del suelo (COS), carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico resistente (COR), nitrógeno total (NT), nitrógeno orgánico particulado (NOP) y nitrógeno orgánico resistente (NOR). Referencia (situaciones cuasi –prístinas), siembra directa (SD) y LC (labranza convencional). Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$.

Manejo	COS	NT	COP	COR	NOP	NOR
Mg ha^{-1}						
Referencia	65,04 a	6,31 a	18,34 a	46,69 a	1,81 a	4,50 a
SD	51,87 b	4,80 b	9,93 b	41,94 a	0,88 b	4,10 ab
LC	54,93 b	4,98 b	10,37 b	44,56 a	0,90 b	3,90 b
Valor P	0,0011	<0,0001	<0,0001	0,2560	<0,0001	0,0506

Manejo x grupo textural						
	COS	NT	COP	COR	NOP	NOR
Valor P	0,7347	0,4254	0,7070	0,4907	0,4221	0,5331

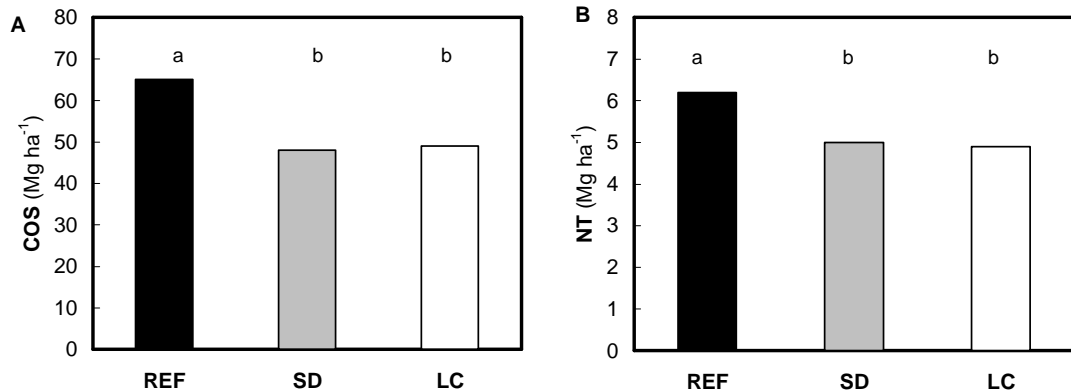


Figura 2.2. A- Contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y B- nitrógeno total (NT) para los distintos manejos. Valores expresados en masa de suelo equivalente. SD: siembra directa y LC: suelos laboreados, referencia: situaciones no cultivadas o cuasi-prístinas (REF). Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$.

El laboreo y el tránsito repetido alteran la condición física del suelo, generando compresión y compactación del mismo. O sea, que se pueden esperar cambios en la densidad aparente (DAP). Por lo tanto, los stocks de C y N fueron calculados hasta 30 cm como masa equivalente, siguiendo las recomendaciones de Sisti et al. (2004) (Figura 2.2). Luego de esta corrección, los sitios de referencia aún presentaban mayor COS que los bajo LC y SD, no observándose diferencias entre estos últimos (Figura 2.2). Se observó una disminución del 23% del COS como consecuencia de la actividad agrícola. Hermle et al. (2008) encontró valores similares de stocks de C a profundidad de 40 cm entre distintos regimenes de labranza, sólo hallando mayor stock en suelos bajo pastura. D'Haene et al. (2009) no halló diferencias en el secuestro de C entre sistemas de labranzas de 0 a 60 cm de profundidad en Bélgica, en un clima más frío que el de la Pampa Ondulada.

Se ha hipotetizado que luego de varios años de implementación continua de SD, el COS de los suelos se recuperaría lentamente alcanzando los valores originales. En una revisión realizada por Steinbach y Alvarez (2006), integrando ensayos de larga duración realizados en la Región Pampeana, se informan stocks de C (expresado en masa equivalente) 5% superiores en SD, comparado con suelos laboreados. Considerando que en el presente capítulo se evaluaron lotes de producción, otras variables distintas al sistema de laboreo pueden estar afectando el contenido de C y N actual, enmascarando pequeñas diferencias entre sistemas de labranza. Por ejemplo, los años agrícolas previos a la introducción de la SD puede ser uno de los mencionados factores. Adicionalmente, los sitios bajo LC evaluados son manejados con cincel o labranza reducida (rastra de disco), ya que son los métodos de laboreo más difundidos en la región. La minimización de las labranzas reemplazando la utilización de arados de reja y vertedera, promueve la acumulación de C (West y Post, 2002). Por otro lado,

parte de los incrementos de C en SD presentados en la literatura se pueden atribuir a la manera en que los datos son presentados. Específicamente, en muchas situaciones son mostrados como concentración y no en masa de suelo equivalente (Sisti, 2005). A ello se suma, que en muchas circunstancias se considera una escasa profundidad. Baker et al. (2007) hallaron que muchos estudios que evalúan capas más profundas del suelo no muestran mayor secuestro de C en SD comparado con LC. De hecho, el COS puede ser mayor en LC en horizontes más profundos, aunque esto no fue observado en el presente estudio.

Se observó que el COS, expresado como g kg^{-1} , estuvo altamente correlacionado con el stock de C, expresado en masa equivalente ($r=0,99$). Hermle et al. (2008) también informan una alta relación entre ambas expresiones ($r= 0,90$). Esta alta asociación, puede ser atribuida a que no existen diferencias importantes en la DAP de los suelos. En la presente investigación, la DAP no fue diferente entre sistemas de labranza (datos presentados más adelante).

La concentración de las fracciones de C y N según el manejo a las profundidades evaluadas es presentada en la Figura 2.3 A y B. En los estratos de 0-5 cm y de 5-15 cm, tanto el COS como el NT fueron significativamente superiores ($P\leq 0,05$) en los sitios de referencia o cuasi-prístinos respecto de los sitios agrícolas (SD y LC), aunque la diferencia fue mucho mayor de 0-5 cm que de 5-15 cm. La concentración de COS no varió significativamente entre los manejos de 15 a 30 cm de profundidad, mientras que SD mostró un valor más bajo de NT. El COP difirió significativamente entre manejos en el estrato de 0-5 cm (referencia $>$ SD $>$ LC) y fue significativamente mayor en los de referencia que en los suelos agrícolas en las profundidades 5-15 cm y 15-30 cm. El COR fue también mayor en las referencias de 0 a 5 cm, pero no difirió en

los estratos inferiores de los sitios bajo agricultura. La tendencia parecida presentó NOP y NOR.

La acumulación tanto de la fracción lábil como resistente del COS en el estrato superior (0-5 cm) de los sitios de referencia puede deberse tanto al mayor aporte de C por las gramíneas perennes, al patrón de distribución radical (Jobbagy y Jackson, 2000) y a la ausencia total de disturbio mecánico comparado con los sitios agrícolas.

Los datos del presente estudio muestran mayor COP, en la capa superficial de los suelos bajo SD comparado con LC (Figura 2.3). Debido a que el residuo no es incorporado al suelo en SD y a la ausencia de disrupción mecánica, hay un incremento del COP en los primeros 5 cm del suelo (Alvarez et al., 1998; Fabrizzi et al., 2003; Steinbach y Alvarez, 2006). Por esta causa, y por la mayor variación que presenta COP comparado con COS y COR, puede ser considerado como un indicador temprano de futuros cambios en COS bajo SD (Sparling et al., 1992). En contraste con COP, el componente lábil del NT (NOP), no fue mayor en SD comparado LC en la capa superficial.

El COS y el NT no difirieron en SD y LC en los primeros 5 cm (Figura 2.3), datos que se diferencian de otros trabajos internacionales (Franzluebbers, 2002; Hermle et al., 2008), pero concuerdan con estudios desarrollados en la Pampa Ondulada donde se evaluaron dichos componentes en un experimento comparativo de labranzas de 10 años en tres profundidades (Costantini et al., 2006). La proporción de COP/COS fue siempre mayor en superficie en los sitios de referencia cuasi-prístinos y con SD que en los sitios con LC. Esta tendencia está relacionada con la ausencia de laboreo, que permite una acumulación de una fracción más lábil de COS (Alvarez et al., 1998; Fabrizzi et al., 2003; Steinbach y Alvarez, 2006).

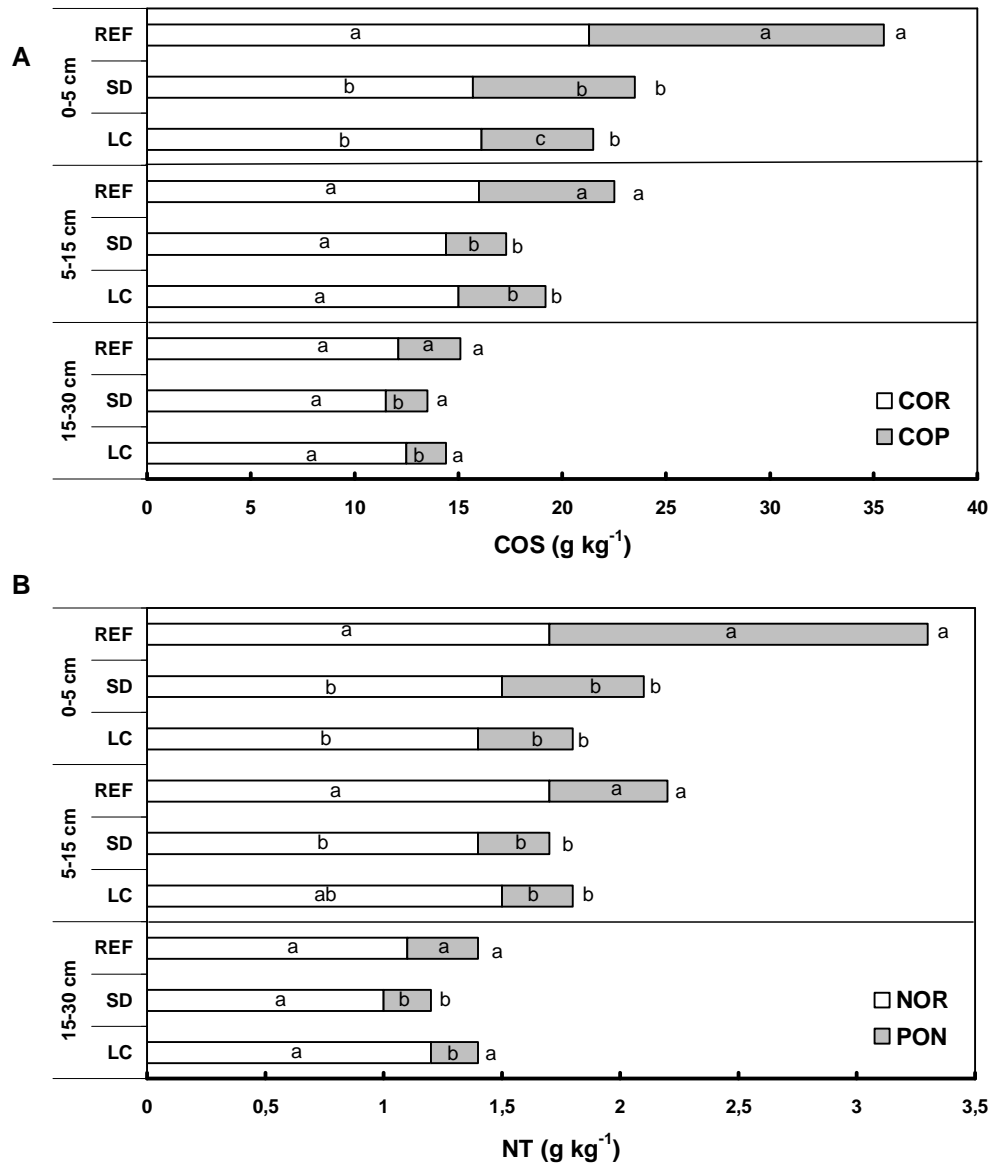


Figura 2.3. A. Contenido de carbono orgánico en cada fracción para las distintas profundidades y manejos. Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico resistente (COR) y carbono orgánico del suelo (COS). **B.** Contenido de nitrógeno orgánico en cada fracción para las distintas profundidades y manejos. Nitrógeno total (NT), nitrógeno particulado (NOP) y nitrógeno orgánico resistente (NOR). Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$ entre manejos para cada profundidad y componente orgánico.

2.3.3 Carbono potencialmente mineralizable

El CPM fue mayor en los sitios de referencia que en los suelos agrícolas de 0-5 cm (referencia > SD = LC) y de 5-15 cm (referencia > SD < LC) (Tabla 2.3). Resultados similares fueron encontrados por Costantini et al. (2006) para suelos de la región. Costantini et al. (2003) también hallaron mayores COS y CPM en suelos no cultivados que en suelos bajo agricultura, independientemente de la técnica de laboreo utilizada.

Tabla 2.3. Carbono potencialmente mineralizable (CPM) según los manejos y profundidades. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (P=0,05) entre manejos dentro de cada profundidad.

Manejo	CPM ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$)	
	0-5 cm	5-15 cm
Referencia	457,59 a	145,89 a
SD	202,08 b	53,54 c
LC	176,99 b	82,98 b

Más del 60 % de la variabilidad del CPM fue explicada tanto por el COS como por el COP (Figuras 2.4A, 2.4B). También se encontró una relación positiva entre CPM y el COR, con un coeficiente de determinación mucho menor (R^2) 0,233 (Figura 2.4C). Alvarez y Alvarez (2000) hallaron una estrecha relación entre el COS mineralizado y la fracción liviana de carbono (densidad $<1,6 \text{ g cm}^{-3}$) o el COS. Diversos estudios sugieren que el fraccionamiento físico de los componentes del carbono es muy útil para evaluar cambios de escasa magnitud inducidos por distintas estrategias de manejo (Alvarez y Alvarez, 2000). Mc Lauchlan y Hobbie (2004) observaron una alta correlación entre la fracción liviana de C ($<1,7 \text{ g cm}^{-3}$), la biomasa microbiana, el C respirado en 10 días y el componente lábil del C. La relación entre

COP y CPM hallada en el presente trabajo (Figura 2.4 B), indica que COP puede ser considerada un buen indicador del C lábil del suelo.

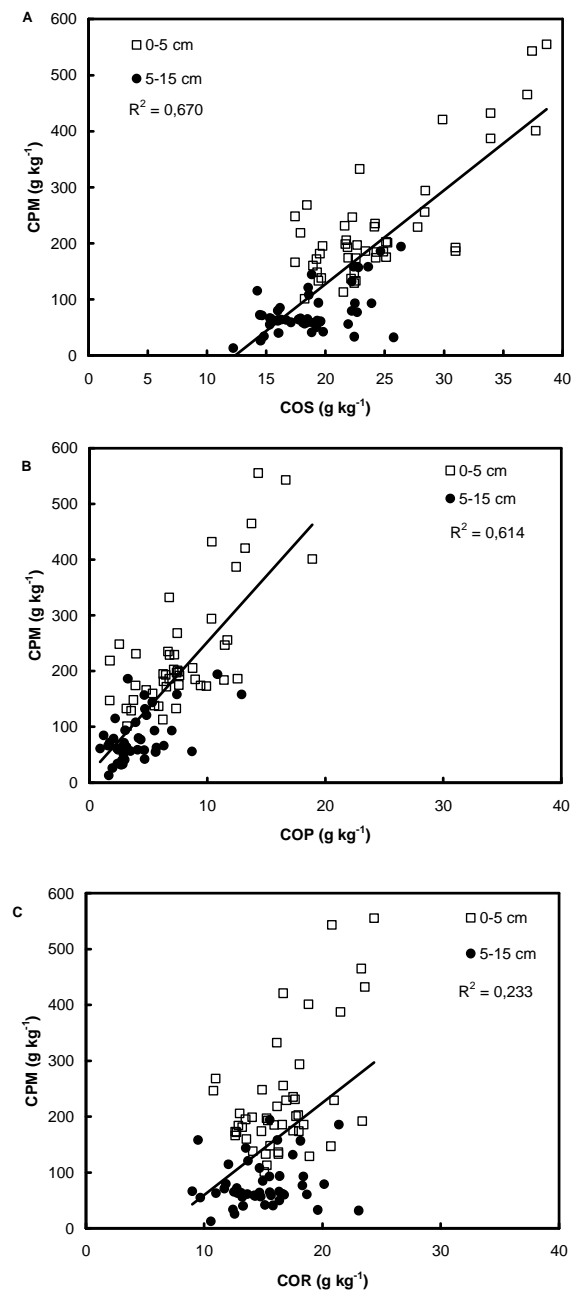


Figura 2.4. Relaciones entre el carbono potencialmente mineralizable (CPM) y el carbono orgánico del suelo (COS; A), el carbono orgánico particulado (COP; B) y el carbono orgánico resistente (COR; C). Se presentan los puntos discriminados por profundidad.

2.3.4 Relación de estratificación

La relación de estratificación 0-5 cm/5-15 cm varió entre 0,9 y 1,6 para los componentes orgánicos totales y resistentes, como COS, COR, NT y NOR (Figuras 2.5A, 2.5B). Cuando la relación se calculó para las fracciones lábiles como COP, CPM y NOP los valores fueron mayores a 2 excepto en LC (Figuras 2.5A, 2.5B). La relación COS 0-5/5-15 cm fue significativamente diferente entre manejos, siendo 1,59 en las referencias, 1,36 en SD y 1,13 el LC. La relación de estratificación presentó los menores valores en LC, donde el laboreo del suelo homogeniza los componentes del mismo hasta la profundidad de labranza. Otros estudios han hallado tendencias similares a las halladas en el presente trabajo (Franzluebbers, 2002). Es esperable la estratificación bajo SD donde el residuo agrícola no es incorporado al suelo. Franzluebbers (2002) propuso al índice de estratificación como un indicador de calidad del suelo. En este estudio, algunas relaciones no difirieron entre LC y SD (por ejemplo COR, NOR y NOP), mientras que otras (por ejemplo COS, COP y CPM) parecen recobrase bajo SD, retornado a los altos valores de estratificación de las situaciones de referencia. La mayor estratificación la presentó COP y CPM, tornándose en potenciales indicadores de cambios en la calidad superficial de los suelos.

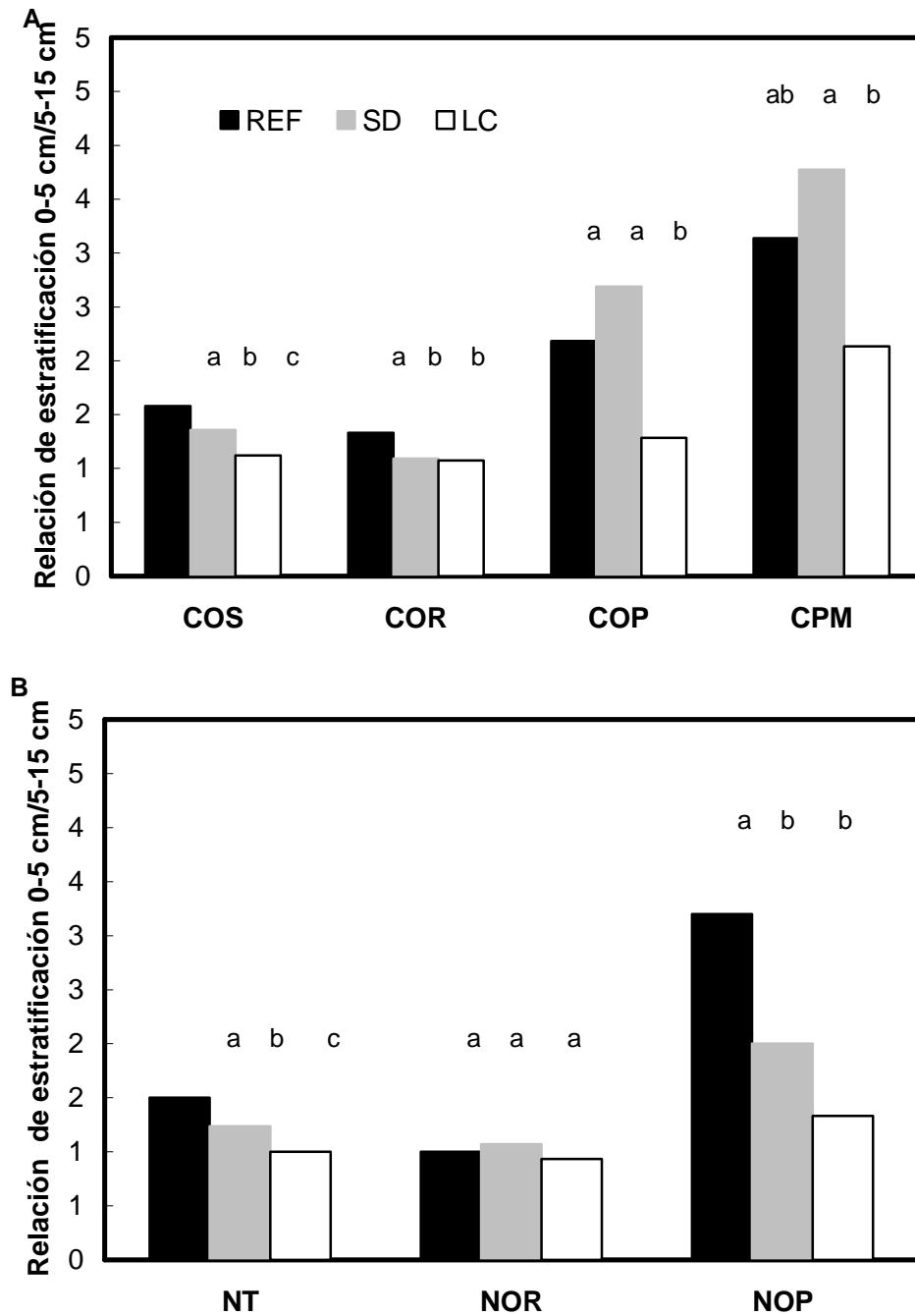


Figura 2.5. Relaciones de estratificación de los valores de los distintos componentes orgánicos. A: Carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico resistente (COR), carbono orgánico del suelo (COS) y carbono potencialmente mineralizable (CPM). B. Nitrógeno total (NT), nitrógeno particulado (NOP) y nitrógeno orgánico resistente (NOR). Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$ entre manejos.

2.3.5 Propiedades físicas del suelo

En la Tabla 2.4 se presentan los valores medios, errores estándar y valores máximos y mínimos para las propiedades físicas evaluadas para la profundidad de 0-15 cm. Ninguna de las propiedades, al igual que el componente orgánico y sus fracciones, presentaron interacción textura x manejo, indicando que el efecto de los factores fue aditivo.

2.3.6 Características morfológicas del horizonte A

El espesor del horizonte A no difirió entre los distintos grupos texturales, y tendió ($p < 0,10$) a ser 4 cm mayor en los suelos de referencia o no cultivados. Este valor concuerda con lo reportado en los trabajos sobre degradación de los suelos de la región antes de la adopción masiva de la SD (Michelena et al., 1988; Senigagliaesi y Ferrari, 1993). La magnitud de la pérdida del horizonte A puede ser considerada leve, representando una pérdida menor al 25% de su espesor. La misma fue principalmente causada por el laboreo agresivo del suelo hasta la década de los 70' cuando se comenzaron a adoptar las labranzas conservacionistas. El espesor del horizonte A estuvo significativamente relacionado con el COS (Tabla 2.5). Las formas estructurales dominantes eran granulares o bloques subangulares en el horizonte A de los suelos francos. En contraste, en los suelos más limosos la estructura dominante dependía del manejo del mismo. Los suelos no cultivados y bajo LC presentaban estructuras granulares y subangulares, pero los de SD presentaban una zona con estructura platiforme con poros visibles horizontales en los primeros 5 a 7 cm (Foto 2.3). Este tema será abordado con mayor profundidad en el siguiente Capítulo.

Tabla 2.4. Espesor del horizonte A y principales propiedades físicas evaluadas de 0-15 cm de profundidad. Inestabilidad estructural (IE), densidad aparente (DAP), densidad aparente máxima Test de Proctor (DMAX), compactación relativa (CR), resistencia a la penetración con la humedad de muestreo (RP). SD: siembra directa y LC: suelos laboreados, referencia: situaciones no cultivadas o cuasi-prístinas. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre suelos o manejos

		Espesor A	IE	DAP	DMAX	CR	RP
		cm	mm	Mg m ⁻³		%	MPa
Manejo							
Referencia N= 6	Media	30,3	0,317 a	1,10 a	1,41	77,5 a	2,61
	ES	1,4	0,090	0,03	0,006	2,4	0,47
	Mín	26,0	0,080	0,95	1,39	66,0	1,58
	Máx	35,5	0,687	1,15	1,44	81,8	4,35
LC n= 18	Media	26,8	0,723 b	1,19 b	1,41	83,7 b	2,13
	ES	1,1	0,087	0,06	0,010	1,09	0,16
	Mín	17,8	0,102	1,06	1,34	78,4	1,35
	Máx	39,2	1,400	1,33	1,50	96,4	3,91
SD n= 21	Media	26,0	0,573 ab	1,19 b	1,42	83,6 b	2,65
	ES	0,8	0,049	0,02	0,010	1,2	0,13
	Mín	18,7	0,174	1,03	1,34	73,7	1,83
	Máx	33,5	0,970	1,33	1,52	96,7	4,54
Valor de P		0,09	0,03	0,02	0,839	0,03	0,08
Grupo textural							
Franco n= 20	Media	26,8	0,498	1,17	1,45	80,0	2,46
	ES	0,8	0,063	0,02	0,006	0,9	0,16
	Mín	18,7	0,080	0,95	1,41	66,0	1,52
	Máx	33,5	0,973	1,25	1,52	85,2	4,54
Franco limoso/ Franco arcillo limoso n= 25	Media	27,0	0,680	1,18	1,39	85,1	2,41
	ES	1,0	0,064	0,01	0,004	1,09	0,15
	Mín	17,8	0,183	1,03	1,34	74,4	1,35
	Máx	39,2	1,400	1,33	1,42	96,7	4,35
Valor de P		0,49	0,170	0,26	<0,001	0,004	0,90
Interacción manejo x grupo textural							
Valor de P		0,25	0,27	0,65	0,08	0,92	0,83

Tabla 2.5. Coeficiente de correlación entre pares de indicadores de calidad de suelos ($p < 0,01$).

	Espesor A	Arcilla	Limo	COS	COP	COR	IE	DAP	CR	RP
Arcilla		1								
Limo		0,66	1							
COS	0,40			1						
COP		-0,47	-0,31	0,68	1					
COR				0,74		1				
IE			0,45	-0,53	-0,45		1			
DAP				-0,61	-0,49	-0,38		1		
CR			0,42	-0,61	-0,55			0,89	1	
RP										1

Espesor horizonte A (Espesor A); carbono orgánico del suelo (COS), carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico resistente (COR), inestabilidad estructural (IE), densidad aparente (DAP), compactación relativa (CR) y resistencia a la penetración (RP).



Foto 2.3. Estructura laminar o platiforme presente en planteos de SD.

2.3.7 Inestabilidad estructural del suelo

La IE difirió entre los suelos manejados con LC y los de referencia cuasi-prístinos, pero no difirió entre estas dos situaciones y SD (Tabla 2.4). La IE estuvo negativamente asociada con COS y COP (Tabla 2.5). Estas relaciones fueron descriptas mejor con funciones de tipo exponencial, mientras que no se encontró asociación entre la IE y el COR (Figura 2.6). Las funciones exponenciales mostraron un mejor ajuste comparado con las funciones lineales considerando la distribución de los residuales. La exclusión de los sitios no cultivados o referencia no modificó las relaciones observadas.

Pikul et al. (2007) también observaron relaciones significativas entre los agregados estables al agua y la proporción de COP (500 a 53 μm). Estos autores encontraron que la presencia de diversos cultivos en la rotación, así como la reducción del laboreo tendían a incrementar los agregados estables al agua y el COP, reduciendo las pérdidas de suelos por erosión. Los valores de IE no fueron significativamente distintos entre los grupos texturales (franco vs. franco limoso/franco arcillo limoso, Tabla 2.4). Sin embargo, la IE estuvo positivamente relacionada con el contenido de limos ($r= 0,45$; Tabla 2.5). El efecto negativo del contenido de limo sobre la estabilidad estructural puede estar relacionado con la composición y origen de la fase sólida del suelo. Al menos el 50% de los limos corresponde a la fracción de 2 - 20 μm (limos finos), que se originan de fitolitos (Salazar Lea Plaza y Moscatelli, 1989; Cosentino y Pecorari, 2002). Estas partículas tienen una porosidad lacunar, que le otorga al suelo una baja resistencia a la ruptura mecánica y una alta susceptibilidad a la degradación por erosión hídrica, tránsito o labranzas (Cosentino y Pecorari, 2002). Los altos contenidos de limo son la causa de la baja resiliencia de los suelos de la región (Taboada et al., 2008).

En la Figura 2.7 se presenta un modelo múltiple explicativo de la IE que considera el COS y el contenido de limo. Del mismo surge el requerimiento de un mayor contenido de COS en suelos limosos para sostener la estabilidad estructural del suelo.

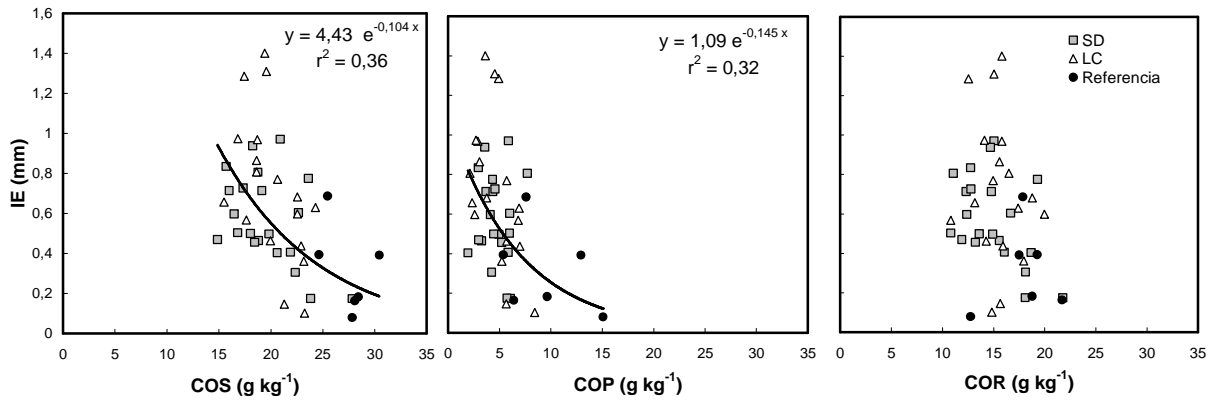


Figura 2.6. Relación entre la inestabilidad estructural (IE) de los suelos y el componente orgánico. COS: carbono orgánico del suelo, COP: carbono orgánico particulado, COR: carbono orgánico resistente.

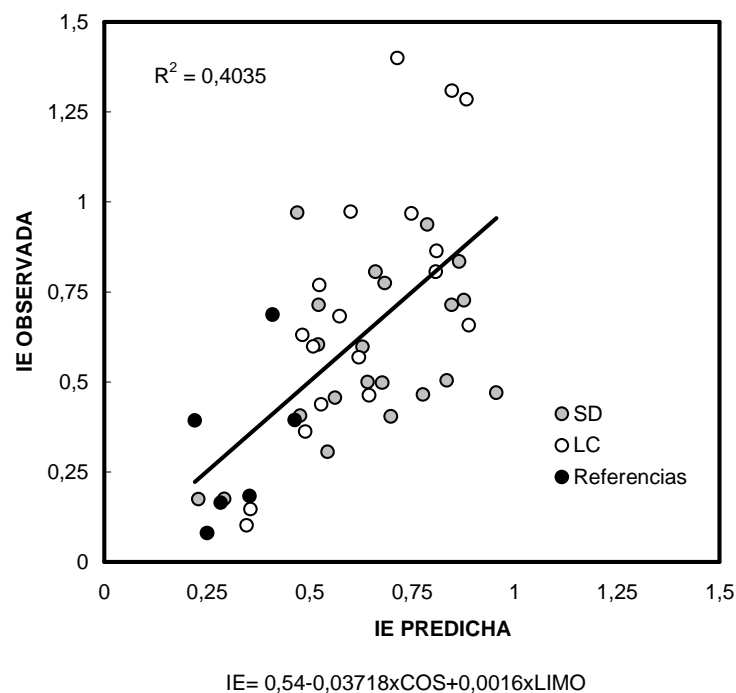


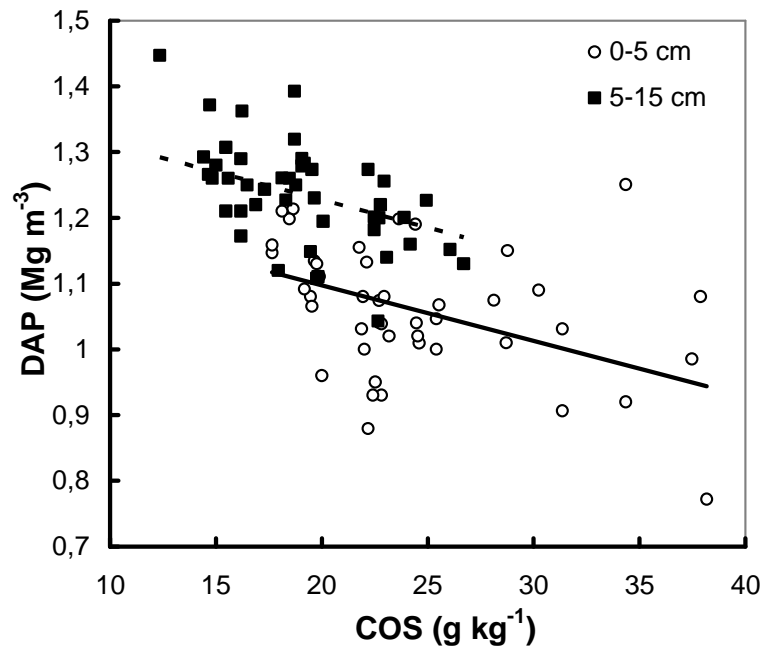
Figura 2.7. Relación entre los valores observados de inestabilidad estructural (IE) y los predichos por el modelo múltiple. COS: carbono orgánico del suelo (g kg^{-1}) y contenido de limo (g kg^{-1}).

2.3.8 Densidad aparente del suelo y compactación relativa

La DAP no fue afectada por la textura del suelo (en el rango de texturas manejado) pero sí respondió significativamente al manejo del suelo, de manera opuesta al contenido de COS; COP e IE (referencias < LC=SD) (Tabla 2.2). Los valores máximos de DAP en LC y SD fueron de 1,33 Mg m⁻³. El cálculo de la porosidad total (considerando una densidad de partícula= 2,65 Mg m⁻³) fue siempre mayor a 49,6% en volumen para todas las situaciones estudiadas. La DAP estuvo relacionada en forma significativa y negativa con el COS (Tabla 2.5). La relación COS-DAP se presenta en la Figura 2.8. Se ajustaron dos funciones una para el estrato de 0-5 cm y la otra para el de 5-15 cm. Debido a que las pendientes de ambas funciones no fueron estadísticamente distintas pero si sus ordenadas al origen, se ajustó un modelo múltiple considerando a la profundidad como una variable *Dummy*:

$$DAP = 1,267 - 0,00846 \times COS + 0,13 \times \text{profundidad} \quad R^2 = 0,59 \quad (P < 0,001) \quad (2.3)$$

Donde DAP es la densidad aparente del suelo (Mg m⁻³), COS es el contenido de carbono orgánico del suelo (g C kg⁻¹), y profundidad adquiere el valor de 0 para 0-5 cm y de 1 para 5-15 cm. La inclusión de la variable profundidad indica que la DAP es mayor en el estrato de 5-15 cm que en los primeros 5 cm para un contenido dado de COS. Esta función también muestra que el COS es la principal variable explicativa de las variaciones de la DAP (mayor COS menor DAP).



$$\text{DAP (Mg m}^{-3}\text{)} = 1,267 - 0,00846 \times \text{COS (g kg}^{-1}\text{)} + 0,13 \times \text{prof}; R^2 = 0,59; P < 0,001$$

Figura 2.8. Relación entre la densidad aparente del suelo (DAP) y el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) para dos profundidades (prof; 0-5 y 5-15 cm). Prof es una variable *dummy* que adquiere el valor de 0 para 0-5 cm y de 1 para 5-15 cm

La inclusión de otras variables (arcilla, limo) en esta regresión no mejoró la explicación de las variaciones de DAP. Adicionalmente, se ajustó otro modelo múltiple reemplazando COS por COP:

$$\text{DAP} = 1,14 - 0,0026 \times \text{COP} + 0,149 \times \text{profundidad} \quad R^2 = 0,54 \quad (P < 0,001) \quad (2.4)$$

Las relaciones 2.3 y 2.4 sugieren que el COS controla la ocurrencia de valores altos de DAP en superficie y disminuye el riesgo de compactación superficial (Thomas et al., 1996).

La expresión de la DAP en forma relativa a la DMAX o CR ha sido sugerida para evitar la limitante de comparar valores de DAP de suelos con diferente textura (Lipiec y Hatano, 2003). La CR para cada situación fue calculada usando la ecuación 2.2, utilizando el valor DMAX calculado utilizando la ecuación 2.1, como fue explicado en el apartado de Materiales y Métodos. A pesar de los contenidos distintos de COS de los distintos manejos, los valores de DMAX no difirieron entre ellos. Los valores de CR calculados fueron afectados por la textura del suelo (francos < franco limoso/franco arcillo limosos) y el manejo del suelo (referencia < LC = SD) (Tabla 2.2). Los valores de CR entre 75-87% se corresponden con los valores máximos de rendimientos para varios cultivos, y los problemas en el límite superior ocurren con valores de CR críticos mayores a 90% (Carter, 1990; Beutler et al., 2005). Los valores medios de CR observados en este estudio estuvieron siempre por debajo de este umbral (Tabla 2.4). Sólo dos sitios bajo SD y uno bajo LC presentaron valores superiores a 90%. Estos resultados sugieren que la compactación no es un fenómeno difundido en la región. Sin embargo, este riesgo no debe ser desestimado en futuros escenarios ante el peso creciente de la maquinaria, aumento del pasaje de máquinas por mayor control de adversidades o volúmenes cosechados crecientes (Bonel et al., 2005; Hamza y Anderson, 2005a).

2.3.9 Resistencia a la penetración e infiltración

La RP no estuvo afectada por la textura superficial del suelo. El contenido hídrico promedio de los suelos de referencia eran mayor (32,0% en peso) respecto de LC (27,7%) o de SD (28,4%). Esta mayor humedad debería producir menores valores de RP en los sitios de referencia. Sin embargo, la RP no fue afectada por el manejo (Tabla 2.4). A pesar de la baja DAP y alto contenido hídrico en los sitios de referencia comparado con SD, la RP fue similar (Tabla 2.4). Esto puede ser atribuido a la abundancia de raíces vivas en los sitios de referencia.

La literatura informa umbrales críticos de RP que varían entre 1,5-3 MPa para penetrómetros con punta de ángulo 30° (Boone et al., 1986). El penetrómetro utilizado en este estudio tenía un ángulo de cono de 60°, lo que produce valores de PR 35 % superiores a los de 30° (Voorhees et al., 1975). Por lo tanto, los límites para la punta de 60° variarían entre 2 y 4 MPa. Los valores de RP determinados rara vez excedieron dichos valores en el estrato de 5 a 15 cm (Figura 2.9, Tabla 2.4). La posibilidad de mayores valores debido a diferentes contenidos hídricos de los suelos en el momento de la determinación fue explorada a través de la relación entre la RP y el contenido hídrico del suelo (Figura 2.9). Dos modelos diferentes ($P < 0,001$) fueron ajustados para 0-5 cm y 5-15 cm. Esto concuerda con estudios previos donde se observó que los valores de RP usualmente se incrementan con la profundidad como consecuencia de distintos mecanismos de fallas en el suelo mientras es evaluada la RP (Waldron y Constantin, 1970). En el estrato superior, también se pudo ajustar dos modelos diferentes ($P < 0,001$) uno para SD y otro para LC, donde el contenido hídrico del suelo explica

alrededor del 50% de la variación de la RP. Dado que las pendientes de estas dos rectas no diferían estadísticamente pero sí sus ordenadas al origen, se ajustó un modelo de regresión múltiple que incluía el sistema de manejo del suelo como variable *Dummy* (Figura 2.9). El valor de la variable *Dummy* “sistema de labranza” muestra que la RP es 0,77 MPa mayor en SD respecto de LC para el mismo contenido hídrico del suelo. Los mayores valores de RP en SD no estuvieron asociados a mayores valores de DAP y por lo tanto, no podemos hablar de compactación, sino que más bien de un proceso de endurecimiento (*hardening*) (Taboada et al., 1998; Díaz Zorita et al., 2002). Este endurecimiento tiene lugar como consecuencia de la reorganización de las arcillas seguido de cementación (Dexter, 1988) ante la ausencia de laboreo. Los resultados encontrados sugieren que la compactación superficial no es un problema extendido en estos suelos.

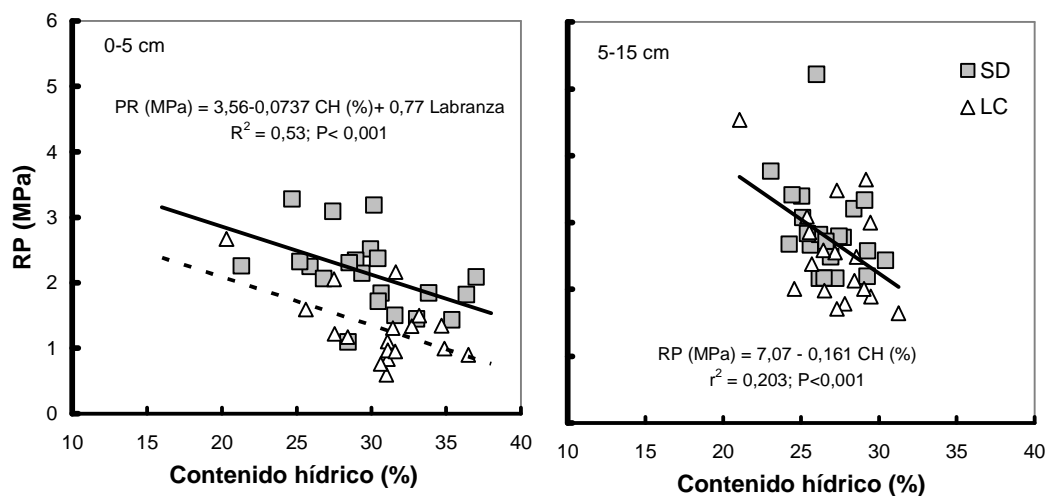


Figura 2.9 Resistencia a la penetración (RP) vs. contenido hídrico del suelo (CH; %) para dos profundidades de muestreo. SD: siembra directa; LC: suelos labreados. Labranza: variable *Dummy* con valor 1 para SD y valor 0 para LC.

Una revisión reciente realizada por Strudley et al. (2008) informa que la SD incrementa la conectividad de los macroporos, resultando en una mayor infiltración básica o a tensión cero y conductividad hidráulica saturada. Los resultados obtenidos en esta tesis no muestran esa tendencia. En lugar de las mayores tasas esperadas en SD, la TI varió en forma diferente entre los sistemas de labranzas según la textura superficial del suelo. En los suelos francos, la infiltración fue similar entre SD y LC, mientras que en los suelos franco limosos y franco arcillo limosos, la TI fue superior en LC comparado con SD (Figura 2.10). Esto fue consecuencia de la interacción entre textura y manejo. En los suelos más limosos, la TI fue aproximadamente cuatro veces superior en LC que en SD, lo que puede ser explicado por la presencia de fisuras mecánicas generadas por el laboreo (Voorhees y Lindstrom, 1984). Estas fisuras mejoran el ingreso de agua al suelo, que en general posee volúmenes de macroporos inferiores al 5% (Taboada et al., 1998; Micucci y Taboada, 2006; Taboada et al., 2008). Sin embargo, también puede atribuirse a un mayor flujo lateral de agua en LC (Wander y Bollero, 1999). Los bajos valores de TI en los suelos más limosos pueden estar relacionados con la presencia de factores desfavorables, como la presencia de estructuras platformes o laminares y la dominancia de poros horizontales observados a campo. Estructuras laminares similares fueron halladas previamente en la región, tanto *in-situ* (perfil cultural) como en muestras de microestructura (Bonel et al., 2005; Sasal et al., 2006). Este tipo de poros ha sido frecuentemente observado durante los primeros años de aplicación de SD (Voorhees y Lindstrom, 1984; Vanden Bygaart et al., 1999 b) y se lo ha atribuido a la combinación del colapso de los poros durante los procesos de compactación y a procesos de congelado-descongelado de los suelos –formación de

lengüetas de hielo- (Van den Bygaart et al., 1999 b). Esta última razón puede ser descartada en este estudio, ya que los suelos estudiados no sufren congelamiento y a su vez, poseen más de cinco años bajo SD. Sasal et al. (2006) observaron la ocurrencia de estructuras laminares y bajas TI aún en ensayos de larga duración en la región, confirmando así que la presencia de estructura laminar no se restringe a los primeros años de implementación de SD. La formación de un sistema de poros horizontales puede ser consecuencia de la compactación por tránsito (Bonel et al., 2005), y lleva a una reducción de la TI como resultado de una baja proporción de poros de diámetro mayor a $> 117 \mu\text{m}$ (Lipiec et al., 2006) y orientados horizontalmente (Sasal et al., 2006). Adicionalmente, la prevalencia de fitolitos de baja densidad ($2,41 \text{ Mg m}^{-3}$) promueve una mayor fragilidad del suelo (Cosentino y Pecorari, 2002). Debido a la baja resiliencia de los suelos franco limosos (Taboada et al., 2008), los factores biológicos no llegan a ser suficientes para contrabalancear el estrés generado por el tránsito no controlado de los lotes de producción. En cualquier caso, los macroporos estables y continuos no se generaron a pesar de los largos periodos de tiempo bajo SD (Voorhees y Lindstrom 1984; Vanden Bygaart et al., 1999a; Rhoton, 2000; Strudley et al., 2008). Entonces, una suma de factores como alto contenido de limo y tránsito pueden ser considerados como las causas de las bajas TI en SD en los suelos limosos. Algunos de estos factores serán analizados con mayor detalle en Capítulo 3.

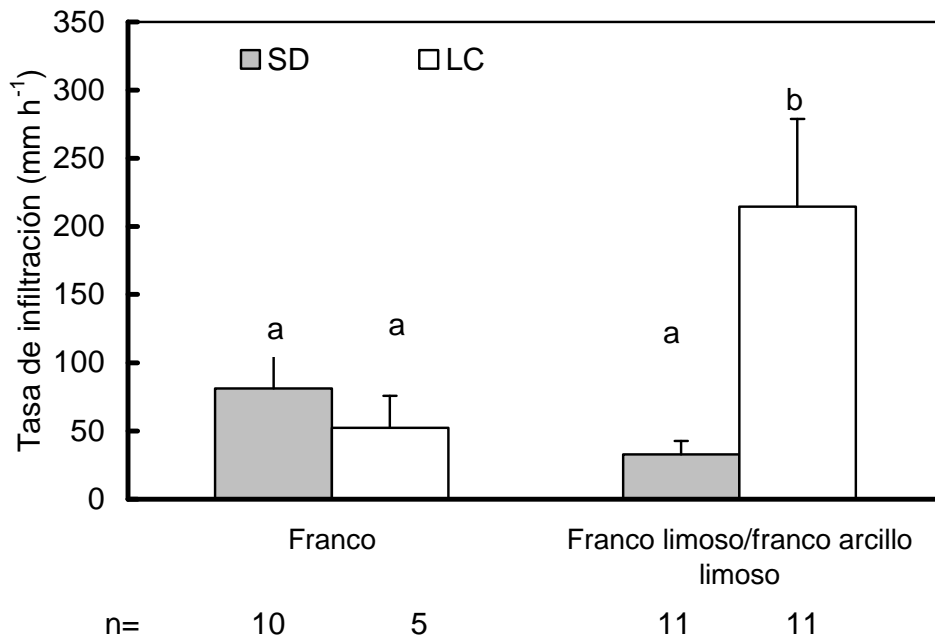


Figura 2.10. Tasa de infiltración para los distintos suelos y manejos. La letra indica las diferencias de manejo dentro de cada clase textural ($P= 0,05$). SD= siembra directa y LC= labranza convencional.

2.3.10 Análisis de componentes principales de las propiedades superficiales del suelo

El análisis de componentes principales considerando propiedades físicas (DAP; RP; CR; espesor del horizonte A e IE) y los componentes de carbono orgánico del suelo (COS; COP y COR) de los primeros 0-15 cm se presenta en la Figura 2.11. Cincuenta y siete por ciento de la variación entre los sitios se explicó con los dos primeros componentes principales. El primer eje del componente principal explicó el 42% de la variación entre sitios. En este eje poseen peso positivo el COR, COS y COP, y es contrabalanceado por la DAP, IE y CR. Por lo tanto, el primer eje claramente distinguió

entre sitios de referencia cuasi-prístinos y los sitios bajo agricultura (LC y SD; Figura 2.11). La calidad del suelo aumenta a medida que aumenta el componente orgánico y decrece la DAP, CR e IE. Estos resultados concuerdan con la lectura del ANVA.

El segundo eje o componente principal explicó un 15% de la variación. La variable de mayor peso positivo en el mismo fue la RP. Otros componentes, en este caso negativos y menores, fueron la IE; el espesor de A y COR. LA RP fue la principal variable que permitió en el segundo eje separar entre SD y LC. La RP puede ser utilizada entonces como indicador de endurecimiento en suelos bajo SD. Como los componentes orgánicos del suelo estuvieron relacionados con la DAP, CR e IE, la evolución de estas propiedades físicas puede ser inferida a partir de la evolución del COS o COP. Ni la DAP ni la CR pudieron distinguir entre los sistemas de labranzas y se puede prescindir de ellas en el set mínimo de indicadores de calidad.

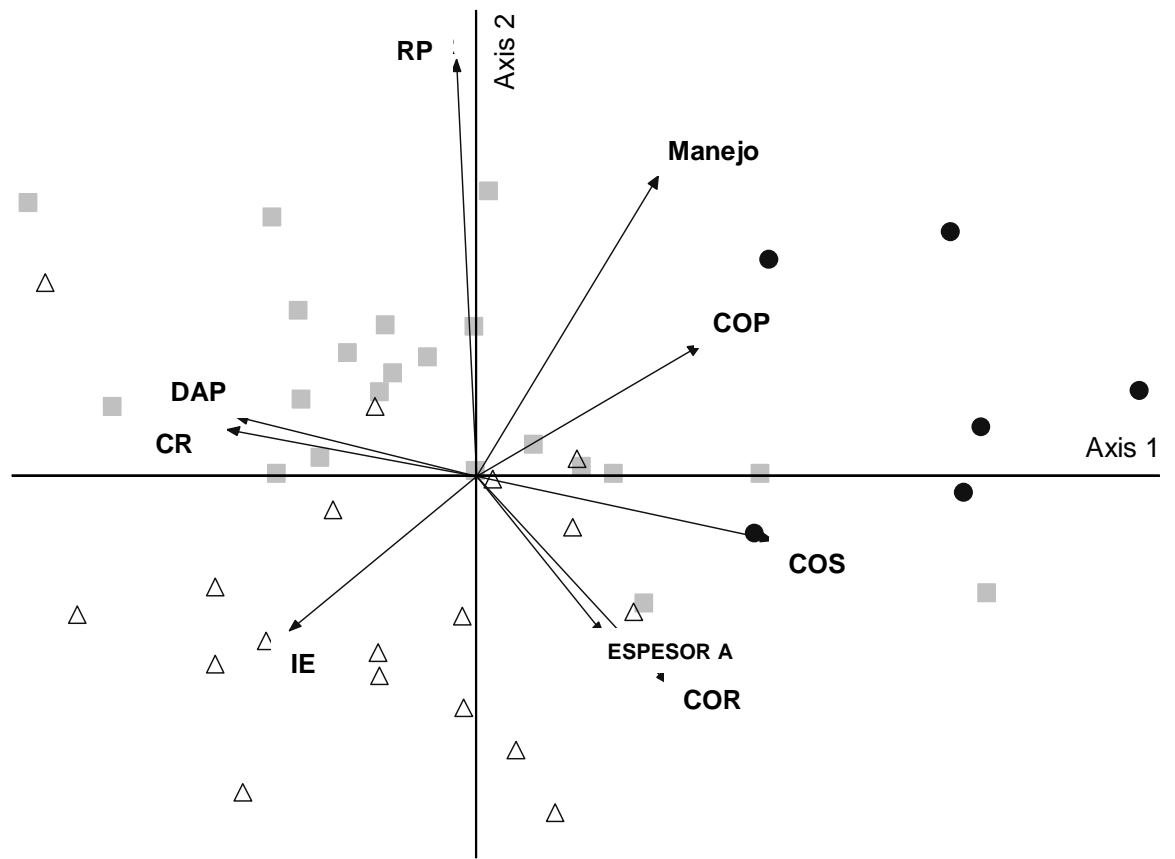


Figura 2.11. Gráfico de componentes principales. Los vectores indican el peso relativo de cada variable en cada eje. Espesor A, densidad aparente (DAP); carbono orgánico del suelo (COS), compactación relativa (CR), carbono orgánico particulado ($> 53 \mu\text{m}$; COP); carbono orgánico resistente ($< 53 \mu\text{m}$; COR); inestabilidad estructural (IE). Manejo del suelo (Manejo). ■ SD: siembra directa; LC: Δ laboreados; y ● referencia cuasi prístinos.

2.4 CONSIDERACIONES FINALES

La primera hipótesis planteada expresaba: “La evolución de las propiedades físicas bajo distintos manejos del suelo está regulada por la textura superficial de los mismos y el contenido de COS”. En general, la evolución de las propiedades físicas en los distintos manejos no presentó interacción con la clase textural del suelo. La excepción fue la TI, siendo similar entre SD y LC en los suelos francos, y mayor bajo LC en los suelos limosos. Por lo tanto, la primera hipótesis planteada es parcialmente rechazada.

La DAP y la IE estuvieron relacionadas con el COS dada esta relación básicamente por el COP. Ello posibilitaría evaluar la evolución de ambas variables físicas monitoreando el COP. De esta manera, se acepta la segunda hipótesis planteada que expresaba: “La DAP y estabilidad estructural de los suelos están directamente relacionadas con el contenido de COS y, especialmente, con su fracción lábil independientemente del manejo del suelo.”

Los sistemas de SD mostraron una fuerte estratificación de los componentes lábiles del COS (COP y CPM). La fuerte estratificación del componente orgánico en SD estuvo asociada a mayor estabilidad estructural. Sin embargo, la forma estructural en los primeros centímetros en SD era frecuentemente de tipo laminar generando menores TI que en LC. De esta manera, se acepta la tercera hipótesis: “En los sistemas de SD se produce una fuerte estratificación de la COP y en menor medida del COS. Ello se traduce en mayor estabilidad estructural, pero no necesariamente en el desarrollo de una forma estructural superficial deseable”.

Los sitios de referencia o cuasi prístinos se diferenciaron claramente de los sitios agrícolas por el contenido de COS y sus fracciones, la DAP, la CR y la IE, mientras que la RP y la IE fueron las propiedades que permitieron discriminar entre SD y LC. Esta sensibilidad diferencial de las variables para reflejar cambios en el manejo permite aceptar la última hipótesis planteada: “Se puede sintetizar la caracterización del estado de la calidad del suelo en la medición de un menor número propiedades”.

**Capítulo 3.- Condición estructural superficial de los suelos
bajo siembra directa: Caracterización y génesis**

3.1 INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo generalmente es caracterizada por su forma, estabilidad y resiliencia. La forma estructural puede ser estudiada desde dos perspectivas. La primera de ellas es según el arreglo de las partículas primarias en agregados. La segunda por el tamaño, forma y continuidad de los poros intra- e inter-agregados resultante de la disposición espacial de las distintas jerarquías de agregados (Gardner et al., 1999). En términos generales, las altas tasas de infiltración se relacionan con la presencia de poros estables mayores a 50 μm , orientados verticalmente, y continuos, expuestos a la superficie de los suelos. En trabajos realizados en la región se ha informado la presencia de una agregación de tipo laminar (Figura 3.1) en los primeros centímetros de los suelos manejados con SD (Barbosa et al., 1997; Morrás et al., 2004; Sasal et al., 2004; Álvarez et al., 2004; De Batista et al., 2005). La detección de una estructura de este tipo, cuyo arreglo espacial genera porosidad horizontal o planar, representaría una restricción para lograr altas tasas de infiltración.



Foto 3.1. Agregación laminar en superficie en planteos de SD en el N de Buenos Aires.

En la actualidad no se conoce, con precisión, cuál es la causa de la formación de estas formas estructurales. Morrás et al. (2004) lo han relacionado con efectos del pasaje de maquinaria, aunque su grado de generalización en el lote, en algunas situaciones, hace suponer otros mecanismos involucrados (Figura 3.1 a y b).

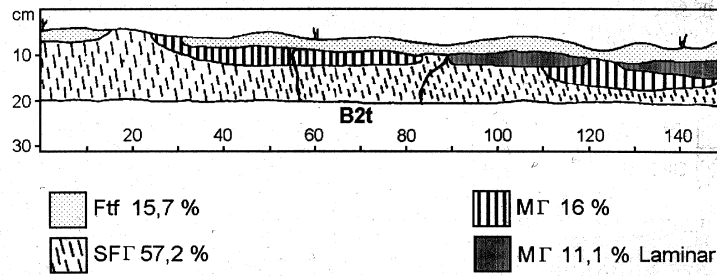


Figura 3.1 a. Perfil cultural con estructura laminar discontinua, de diseño símil a huellas (De Batista et al., 2005).

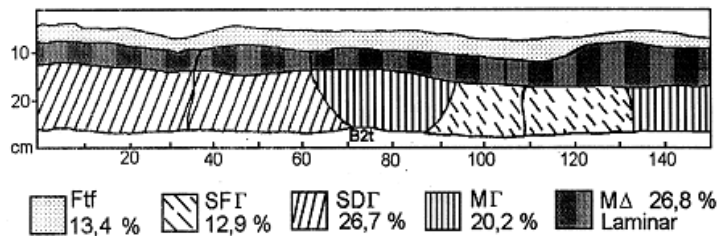


Figura 3.1 b. Perfil cultural con estructura laminar continua (De Batista et al., 2005).

A partir de los datos presentados en el trabajo desarrollado por De Batista et al. (2005) para la Pampa Ondulada se procedió a analizar la relación entre la proporción de estructura laminar en las situaciones evaluadas y los datos de suelo y manejo brindados por los autores. En tal sentido, se pudo establecer cierta asociación entre la presencia de estructura laminar con los años agrícolas, no así con la MO. Shipitalo y Protz (1987) y

VandenBygaard et al. (1999b) mencionan la formación de este tipo estructural en los primeros años de SD en los suelos canadienses. Los autores atribuyen su conformación al reacomodamiento de agregados y partículas luego de dejar de laborear el suelo y al proceso de congelamiento. Durante el mismo, la formación de lenguas de hielo en los poros planares contribuye a consolidar la formación de la estructura laminar. Sin embargo, luego de cuatro años de SD se producía su reversión debido a la actividad biológica, especialmente de las lombrices. Esto coincide con la apreciación generalizada de una evolución favorable de la infiltración luego de unos años de implementación de la SD.

A diferencia de lo hallado en suelos canadienses, en la Pampa Ondulada se observa estructura planar luego de varios años de SD y aún en planteos con una buena rotación de cultivos. Un factor determinante de la presencia de la estructura laminar puede ser la textura superficial de los suelos. Cuando se avanza en sentido O-E en la región en estudio, se evidencia un aumento del contenido en superficie de la fracción limo+arcilla. Debido a su origen biótico (células de gramíneas), la fracción limosa presenta características mineralógicas particulares (Cosentino y Pecorari, 2002). Como se anticipara en general, esta fracción está constituida por limos finos de 2-20 μm , dominada por fitolitos de baja densidad ($2,41 \text{ Mg m}^{-3}$). Los limos de este tipo presentan alta porosidad de tipo lacunar, característica que le confiere una baja resistencia a la ruptura. A su vez, la preponderancia de arcilla de tipo ilítico le otorga a estos suelos baja capacidad de regeneración de la estructura (Taboada et al., 2008). Por lo tanto, ellos presentarían alta fragilidad frente el tránsito no controlado, siendo aún mayor en situaciones con bajo contenidos de MO. En estas situaciones se puede suponer que el estrés generado por el tránsito no es contrareestado por factores biológicos.

Además de los factores de manejo, mayormente vinculados al tránsito de máquinas, existen factores que se vinculan con la respuesta volumétrica del suelo a los cambios de humedad.

Existen distintas metodologías que permiten evaluar las formas estructurales y/o la porosidad resultante. Una de ellas es el perfil cultural que realiza la evaluación a partir de la descripción morfológica del horizonte Ap. Este método, caracteriza la variabilidad estructural delimitando zonas mediante la evaluación del estado interno de los terrones que la conforman y la porosidad visible (Manichon, 1987; De Battista et al., 2005, Figura 3.1 a y b). Otra técnica que permite el estudio morfológico, pero a nivel de microestructura, es la descripción y análisis de cortes delgados de suelo. Su utilización brinda información de la microestructura, incluyendo tamaño, forma y disposición de agregados y poros (Bonel et al., 2005).

Objetivo general

En el presente capítulo se propuso identificar los factores de manejo que se relacionan con la presencia de estructura laminar en planteos de SD continuos. Se busca conocer si existe relación entre la frecuencia y el espesor de la estructura laminar y la cantidad de años de manejo con SD (a partir de la última pastura), por un lado, y la intensidad de tránsito dentro del lote (cabecera y centro de lote), por el otro. Asimismo, se pretende investigar en qué medida la existencia de estructuras planares afecta a propiedades físicas edáficas como la tasa de infiltración, la densidad aparente y la resistencia al corte.

Hipótesis de trabajo

- ✓ En suelos con alto contenido de limo en superficie, como los de la región, bajo SD se genera una capa con estructura laminar, y asociado a ello una menor tasa de infiltración. Esta presencia es independiente de los años de SD luego de la pastura.

- ✓ La conformación de este tipo estructural es resultante del estrés generado por el tránsito. Por lo tanto, dentro del lote, las cabeceras presentan una mayor frecuencia y espesor de la capa con estructura laminar, como consecuencia del tránsito continuo en estas áreas.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo se realizó en un establecimiento ubicado en la localidad de Chivilcoy, provincia de Buenos Aires (34° 55' S, 60° O). El sistema de producción de este establecimiento consiste en rotaciones de pastura con agricultura, siendo la secuencia de cultivos trigo/soja de segunda-maíz-soja de primera todo bajo SD. Al realizar rotación con pastura existe la posibilidad de muestrear lotes con distintos años de agricultura bajo SD partiendo de una condición inicial similar. Se seleccionó un conjunto de lotes que diferían en sus años de agricultura y antecesor inmediato al momento de muestreo (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Principales características de manejo de los lotes seleccionados para el muestreo.

Denominación del lote	Antecesor	Años de agricultura	Número de cultivos
		desde la última pastura	desde la última pastura
LS4	maíz	3	4
LS16	maíz	4	5
SAB	trigo/soja II	6	7
SE21	trigo/soja II	4	5
LS2	maíz	8	11
SC	trigo/soja II	5	7

Los suelos de los lotes son Argiudoles Típicos, familia franco fina, de la Serie O'Higgins. En la Tabla 3.2 se presentan las principales características tomadas de la Carta de Suelos de la Provincia de Buenos Aires, escala 1:50.000 (INTA, 2011). En cada lote se diferencié una zona de cabecera y otra central. La ubicación se consideró como un factor anidado dentro de cada lote, en forma de dos áreas con distintas intensidades de tránsito. El sector de cabecera es donde se realiza el giro de las maquinas, cargas, descargas lo cual conlleva a tener una alta intensidad de tránsito. En cada sector se trazó una transecta de 200 m y se realizaron 20 evaluaciones elegidas al azar del tipo de estructura presente a lo largo de la misma: granular, laminar o masiva. Cuando se determinó la presencia de estructura laminar, se evaluó su desarrollo (mm de espesor). A partir de este censo se calculó en la transecta la proporción de cada tipo

estructural. En cuatro de esos puntos se tomaron muestras para determinar la DAP (Burke et al., 1986) y cilindros para las determinaciones en laboratorio sobre muestras no disturbadas.

Tabla 3.2. Datos Analíticos del Perfil Típico de la Serie O'Higgins (INTA, 2011).

Situación: Latitud: 34°34'12" S Longitud: 60° 42' 57" O Altitud: 75m

Horizonte	Ap	A1	B2t	B3	C
Profundidad de la muestra (cm)	3 a 8	18 a 25	35 a 45	55 a 65	135 a 175
Arcilla < 2 μ m (%)	18,5	21,5	24,5	16,8	6,7
Limo (%)	44	40	35,7	38	34,8
Arena muy fina (%)	35,3	0,7	37,9	42,3	54,4
Arena fina (%)	2	1,2	1,6	2,6	3,7
Arena media (%)	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
Equivalente de humedad (%)	21	22,3	24	20,3	13,6
pH en pasta	5,2	5,2	5,6	5,7	6,7
pH en agua	5,6	5,7	6,2	6,5	7,4
Cationes de intercambio (meq 100gr ⁻¹)					
Ca ⁺⁺	11,3	11,7	11	10	7,8
Mg ⁺⁺	1,9	3	3,4	2,7	2,7
Na ⁺	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
K ⁺	1,9	1,6	1,1	0,8	1,2
Acidez de intercambio	7,3	7,1	5,6	3,8	1,9
Suma de bases (S, meq 100gr ⁻¹)	15,2	16,5	15,7	13,7	11,9
CIC (T, meq 100gr ⁻¹)	18,8	20,2	18,4	16,3	13,7
Saturación con bases (% , S/T)	81	82	85	84	87

La tasa infiltración de agua en el suelo se determinó en laboratorio sobre muestras inalteradas. El primer paso fue hacer percolar un volumen de agua de 400 ml a través de cilindros (10 cm diámetro; 8 cm altura), de modo de homogeneizar la humedad de las muestras de suelos contenidas en los cilindros. Inmediatamente después, se procedió a agregarle una lámina de una pulgada (2,54 cm) de agua. Los cilindros de PVC conteniendo las muestras de suelo inalteradas fueron colocados sobre tamices de modo que el agua drenara sin perder el suelo. Luego el agua fue recogida en la base de los tamices, para cuantificar su volumen. La tasa de infiltración fue calculada sobre la base del tiempo transcurrido desde que se agregó la lámina de agua hasta que ingresó al suelo. Se utilizó un método similar al de campo.

Se determinó la resistencia al corte en el laboratorio sobre las muestras no disturbadas, con un tester de paletas de bolsillo (Pocket Vane Tester; Eijkelkamp). Sobre una muestra compuesta de 20 piques se determinó el contenido de materia orgánica por el método de Walkley and Black (Nelson y Sommers, 1982).

Se aplicó análisis multivariado (componentes principales) para buscar los principales gradientes de variación entre los lotes evaluados. Los gradientes fueron combinaciones lineales de las siguientes características: años desde la última pastura, número de cultivos agrícolas desde la última pastura, cultivo antecesor (1= maíz; 2=trigo/soja II), ubicación (1=centro de lote; 2= cabecera); proporción de estructura laminar, granular, masiva, carbono orgánico, espesor de la estructura laminar. Se utilizó este análisis para determinar los principales gradientes que describen variaciones en la estructura granular y laminar para posteriormente, una vez seleccionados los factores principales aplicar análisis de varianza factorial. Adicionalmente, se estableció la correlación entre las distintas variables estudiadas (Neter y Wasserman, 1974).

Para la realización del análisis micromorfológico del suelo se tomaron muestras no disturbadas de suelo de los primeros 5 cm. Las mismas contemplaban distintas situaciones de antecesores (maíz y trigo-soja II) y de ubicación en el lote (centro y cabecera). Las muestras fueron impregnadas al vacío con resina poliéster y luego se procedió a realizar los cortes delgados. El análisis microscópico y la toma de fotos se efectuaron con un microscopio estereoscópico Leica-Wild MZ8 equipado con sistema de polarización. El análisis micromorfológico fue llevado a cabo por el Dr. Hector J. M. Morrás en el INTA-CIRN, Instituto de Suelos de Castelar.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSION

3.3.1 Análisis del censo de estructura del suelo

En la Figura 3.2 se presenta el análisis de componentes principales. Como puede observarse el primer componente principal ordenó la frecuencia de estructura laminar en el mismo sentido que la ubicación en el lote, correspondiéndose el aumento de este tipo estructural con la posición de cabecera (mayor tránsito). Con signo contrario, o en forma opuesta, se ordenó la estructura granular y, en dicho sentido, cobra importancia el cultivo antecesor. Si el cultivo antecesor fue trigo/soja de II la frecuencia de estructura granular fue mayor y, por lo tanto, la estructura laminar fue menor. En la Foto 3.2 se muestra la estructura laminar encontrada.

Otros posibles factores relacionados con la frecuencia de estructura laminar, fue el número de años de agricultura desde la última pastura (o el número de cultivos

agrícolas) y el carbono orgánico del suelo. Estos factores cobran importancia en el segundo eje, siendo baja la incidencia en el primer eje. El carbono orgánico presentó un valor promedio de 3% sin diferencias entre las condiciones evaluadas. Su elevado valor se correspondió a la conocida estratificación de COS en planteos de SD (Alvarez et al., 1995; Alvarez et al., 2009).

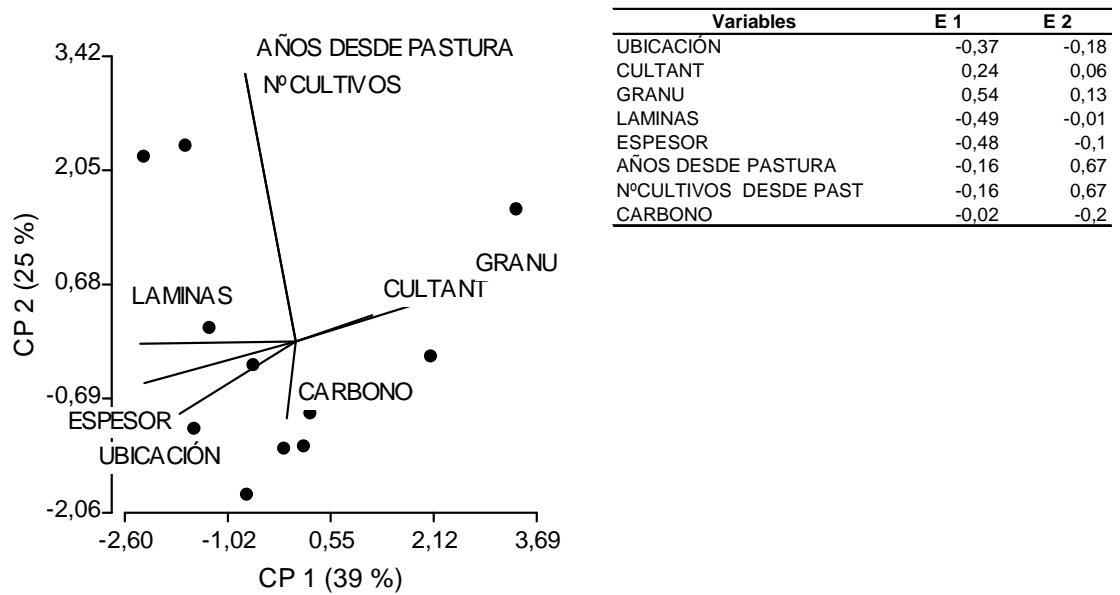


Figura 3.2. Gráfico de componentes principales. Los vectores indican el peso relativo de las variables en cada eje. LAMINAS; GRANU: proporción de estructura laminar o granular en la situación evaluada; CULTANT: cultivo antecesor (1= maíz; 2=trigo/soja II), ubicación (1=centro de lote; 2= cabecera); AÑOS DESDE PASTURA: años desde la última pastura, Nº CULTIVOS: número de cultivos agrícolas desde la última pastura, ESPESOR: espesor promedio de la estructura laminar. Tabla con el valor de los eigenvalues de cada variable en el componente principal 1 y 2.



Foto 3.2. Estructura laminar en los primeros centímetros del suelo.

De los factores evaluados, el cultivo antecesor y la ubicación en el lote (intensidad de tránsito) fueron los factores relacionados con las frecuencias de la estructura laminar y granular. En consecuencia, se procedió al análisis de los datos con diseño de parcelas divididas, donde la parcela principal fue el cultivo antecesor (trigo/soja II o maíz) y la subparcela fue la ubicación en el lote (centro o cabecera).

La frecuencia de estructura tanto laminar (Figura 3.3A) como granular (Figura 3.3B) fue afectada significativamente por la interacción “cultivo antecesor x ubicación”. La menor frecuencia de estructura laminar se presentó con el antecesor trigo/soja II, en la ubicación centro del lote. El resto de las situaciones demostraron altas frecuencias de estructura laminar. La situación inversa ocurrió con la estructura granular. En la Figura 3.4 se presenta la suma de la estructura laminar y masiva- estructura desfavorable- y, como se puede apreciar, es el complemento de la granular distinguiéndose claramente trigo/soja II en centro de lote como la situación de mejor condición estructural. Se comprueba que ambos tipos de estructura (granular y laminar) fueron antagónicos; cuando aparece una, desaparece la otra. La misma tendencia se observó en el espesor de la estructura en láminas (Figura 3.5). Con el antecesor trigo/soja II en el centro de lote, la estructura en láminas alcanzó un espesor de 2 cm, mientras que en el resto de las situaciones rondó los 5,5 cm. Ello indica que las situaciones que presentaron mayor

frecuencia de estructura laminar también presentaron mayor espesor o desarrollo de la misma.

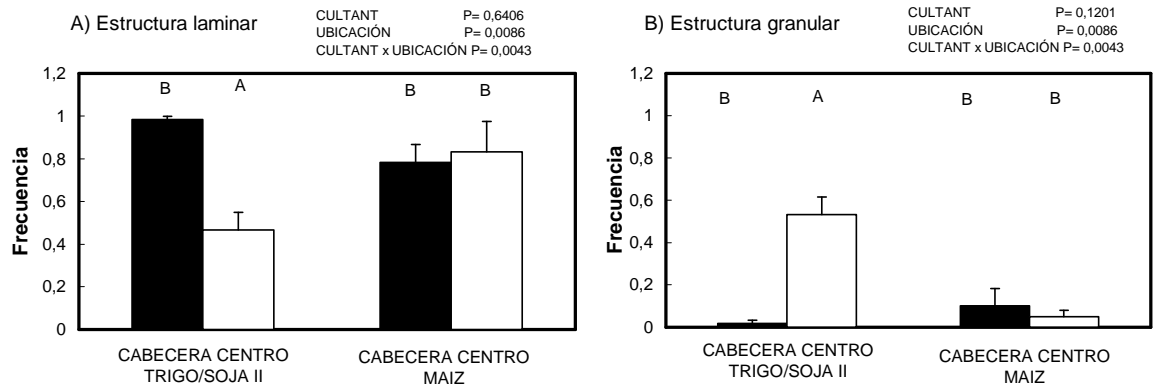


Figura 3.3. A) Frecuencia de estructura laminar para la interacción cultivo antecesor (CULTANT) x ubicación en el lote (UBICACION). Se presenta en el recuadro el resultado del ANVA con diseño de parcelas divididas. Letras distintas indican diferencias significativas entre centro y cabecera para cada antecesor evaluado. **B)** Ídem para la frecuencia de estructura granular.

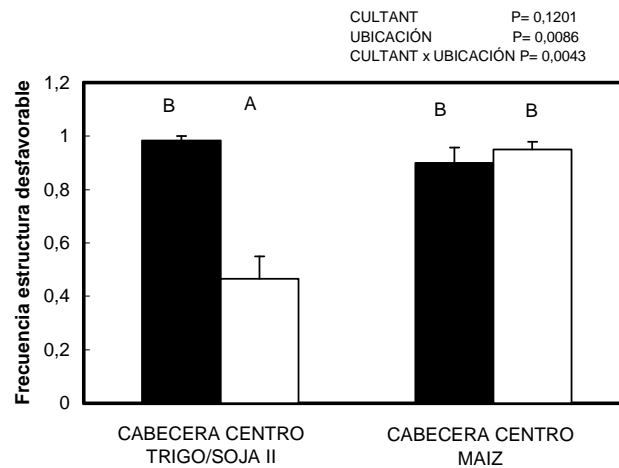


Figura 3.4. Frecuencia de estructura desfavorable (laminar+masiva) para la interacción cultivo antecesor (CULTANT) x ubicación en el lote (UBICACION). Se presenta en el recuadro el resultado del ANVA con diseño de parcelas divididas. Letras distintas indican diferencias significativas entre centro y cabecera para cada antecesor evaluado.

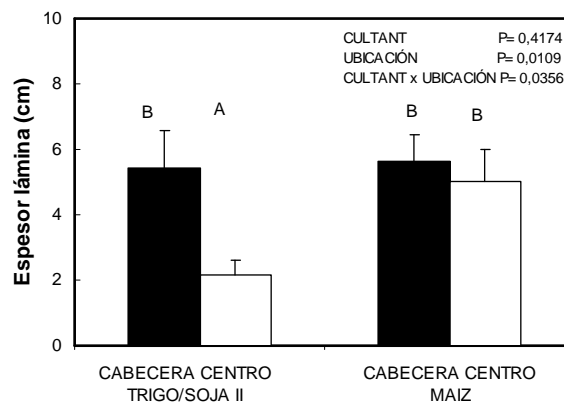


Figura 3.5. Espesor o desarrollo de la estructura laminar para la interacción cultivo antecesor (CULTANT) x ubicación en el lote (UBICACION). Se presenta en el recuadro el resultado del ANVA. Letras distintas indican diferencias significativas entre las situaciones centro y cabecera para cada antecesor evaluado.

Del análisis de los resultados surgen tres ejes de discusión: 1- la amplia generalización de la estructura laminar en las situaciones evaluadas, 2- el efecto positivo sobre la agregación del doble cultivo trigo/soja II y finalmente 3- el efecto negativo dominante del tránsito, lo cual se visualiza por la ausencia de un efecto positivo del doble cultivo en las situaciones de cabecera (alto tránsito).

En referencia a lo generalizado de la estructura laminar en los lotes, no es la primera vez que se menciona este tipo estructural en planteos de SD (Kay et al., 1985; Shipalo y Protz, 1987; VandenBygaard et al., 1999b; Sasal et al., 2006; Álvarez et al., 2009; Bonel et al., 2005; Soracco et al., 2010). Se ha atribuido su formación a que, en ausencia de laboreo, los macroporos creados colapsan y se produce el asentamiento y reconsolidación del suelo, conformando una estructura planar con clara dominancia de porosidad horizontal (Kay et al., 1985; Shipalo y Protz, 1987; VandenBygaard et al., 1999b).

El factor abiótico responsable de consolidar este tipo de estructura laminar en suelos manejados con SD de climas fríos son los ciclos de congelamiento-descongelamiento de lenguas de hielo formadas dentro de los poros (VandenBygaard et al., 1999b). En ausencia de ciclos de congelamiento-descongelamiento, la formación abiótica de agregados está relacionada con la conformación de grietas por alternancia de ciclos de humedecimiento-secado que van llevando a la expansión volumétrica del suelo (Dexter, 1988; Oades, 1993). Los suelos de la Pampa Ondulada presentan arcillas de tipo illítico con baja capacidad de expansión. Sin embargo, en trabajos recientes se estableció que, pese a su carácter limoso, los suelos de la región poseen cierta capacidad de dilatación durante los ciclos de humedecimiento-secado (Barbosa et al., 1999;

Cosentino y Pecorari, 2002; Taboada et al., 2004; 2008). Uno de los mecanismos hasta ahora poco explorados es el desarrollo de “hinchamiento diferencial” por rápido humedecimiento, según lo describe Dexter (1988). Este mecanismo se basa en la generación de estreses de tensión, por el contacto entre el agua (potencial mátrico 0) y capas superficiales de suelo muy seco (potenciales mátricos muy negativos). Como resultado, se generan presiones de aire atrapado en los poros, que dan lugar a la formación de grietas orientadas en forma paralela al frente de humedecimiento (Dexter, 1988). Es posible que este mecanismo pueda tener lugar en el campo en épocas de sequía prolongada, en que una fuerte lluvia humedece repentinamente el suelo, sin llegar a impactarlo como sucede en un suelo manejado con SD. Ello podría explicar la gran difusión de las estructuras planares en el suelo.

El otro mecanismo de agregación y estabilización está asociado con los factores biológicos. En tal sentido, y entrando en el segundo eje de discusión, los resultados muestran que la presencia continua de raíces todo el año en el cultivo trigo/soja de II aumentó la proporción de estructura granular. Ello resalta, la importancia del enredado por raíces o “*binding*” en estos suelos limosos con arcillas poco expansibles, como mecanismo de agregación (Tisdall y Oades, 1982; Oades, 1984; Dexter, 1988; Degens, 1997).

Para corroborar o reafirmar esta idea de la acción de las raíces, se procedió a realizar el censo estructural en una pastura del mismo establecimiento en el tercer año a partir de su implantación. Tanto el censo realizado sobre la cabecera como en el centro del lote de la pastura evidenció agregación granular, lo cual se considera producto del enredado de las raíces (Degens, 1997). En este caso, al tratarse de un cultivo plurianual, que asocia tipos radicales diferentes (gramíneas y leguminosas), se maximiza el efecto

del enredado (Foto 3.3). Este tipo de mecanismo de agregación tiene carácter temporal, según lo establecieron algunos autores (Tisdall y Oades, 1982; Oades, 1984; Dexter, 1988). En efecto, no existió relación entre los años desde la última pastura y la frecuencia de estructura desfavorable (laminar + masiva; Figura 3.6). Se puede observar que ya a los tres años de salir de la pastura se observaron frecuencias de más de 80% de estructura desfavorable. En experimentos de invernáculo, Barbosa et al. (1997) y Taboada et al. (2004) encontraron mayor número de agregados de mayor tamaño y más estables cuando se combinaban ciclos de humedecimiento – secado con la presencia de raíces (raigrás). Los autores destacan como fundamental el humedecimiento-secado para fragmentar y la estabilización biológica para consolidar la estructura. Esta sucesión de mecanismos de formación y estabilización no dependió de la presencia de arcilla expansible. Sólo cuatro meses de ciclos de humedecimiento-secado y raigrás fueron suficientes para lograr la reconstrucción estructural (Taboada et al. 2004).

Otro factor que podría colaborar en la situación de doble cultivo es el estrecho distanciamiento entre las hileras del trigo. La siembra de este cultivo podría generar una ruptura mecánica superficial de la estructura laminar, con posterior estabilización con raíces.

Finalmente, el último eje de discusión fue el tránsito. En las condiciones de cabecera (alto tránsito), independientemente del cultivo antecesor, el tipo estructural dominante fue desfavorable (laminar y masiva). Por lo tanto, hay que considerar al tránsito como un factor adicional que favoreció el desarrollo y persistencia de este tipo estructural. El efecto del pasaje de rodados conduce desde la creación de estructura laminar hasta la estructura masiva. Utilizando un sistema de sensores, Horn et al.

(2003) observaron que la primera pasada del tractor posee un componente de fuerza vertical hasta los 2 cm y luego se produce un desplazamiento horizontal del suelo. Este desplazamiento horizontal es –probablemente- el que resulta en estructura de tipo laminar. A medida que el número de pasadas aumenta, el desplazamiento es principalmente vertical, como consecuencia del deterioro pronunciado de la estructura.

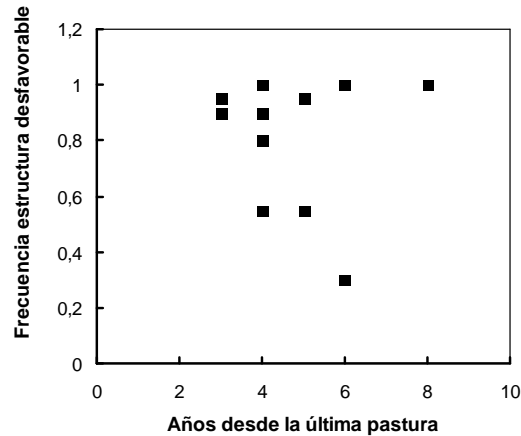


Figura 3.6. Frecuencia de estructura laminar en función de los años desde la última pastura.

Slowinska-Jurkiewiczy y Domzal (1991) evaluaron los cambios estructurales producidos por el pasaje de las ruedas delanteras y traseras del tractor sobre un suelo limoso y otro arenoso. El análisis de la microestructura mostró que el tránsito repetido produjo mayores cambios en el suelo limoso. En este suelo, luego de tres pasadas se formaba una estructura laminar con fisuras regulares horizontales. Se asumió que las mismas eran causadas por el corte del suelo (“*soil shearing*”) y el desplazamiento, como resultado del rodamiento de las ruedas del tractor. Asimismo, alertaron que aunque los cambios de densidad aparente no eran tan importantes, el cambio a este tipo de porosidad horizontal tenía importante impacto sobre propiedades tales como permeabilidad de aire y agua. Soracco et al. (2010) demostraron el efecto de este diseño

de poros sobre la conductividad y la tasa de infiltración. Ambas propiedades adquieren mayor valor cuando las muestras de suelo son orientadas en forma perpendicular a la disposición original en el terreno. En la presente tesis, cuanto mayor fue el espesor o desarrollo de la capa con estructura laminar, menor fue la tasa de infiltración ($r = -0,3373$; $P < 0,05$) y mayor la resistencia al corte ($r = 0,2969$; $P < 0,05$). De este modo se puso en evidencia el efecto negativo de este tipo estructural sobre la dinámica de ingreso de agua al suelo.



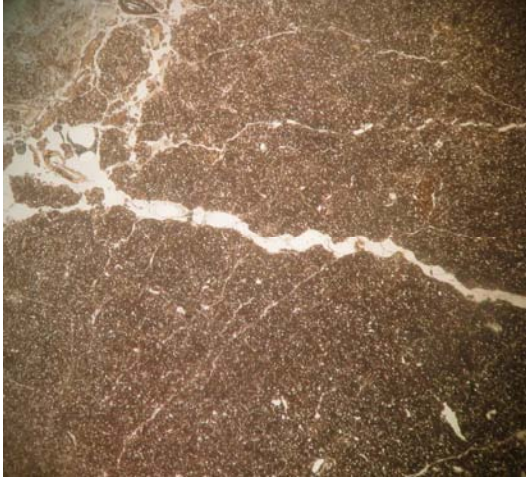
Foto 3.3. Agregación por enredado o “*binding*” producido por la pastura.

3.3.2 Análisis micromorfológico

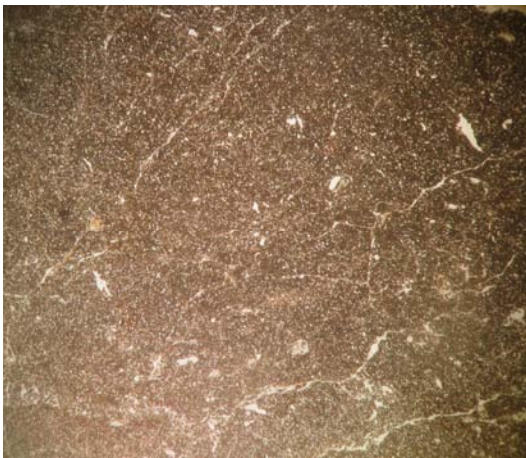
Con el objetivo de caracterizar a otra escala las estructuras dominantes en las distintas situaciones evaluadas se procedió al análisis micromorfológico de muestras de los primeros 5 cm del suelo. Del análisis microscópico surge que todas las muestras tienen una fracción gruesa con distribución al azar, de granos angulosos, euhedrales y subhedrales, con predominancia de cuarzo, feldespatos y plagioclasas, observándose también en poca proporción partículas de vidrio volcánico, fitolitos, y granos de mica y

piroxeno (Fotos 3.4, 3.5, 3.6, 3.7). El tamaño predominante de los granos oscila entre 50 y 100 μm . La fracción fina está constituida por una micromasa órgano-mineral de color pardo-oscuro, lo cual es dado por la abundancia de materia orgánica humificada. La relación grueso/fino es de aproximadamente 85/15, la distribución relacionada es porfírica de espaciado simple, y la fábrica-b indiferenciada.

La muestra del lote LS16, correspondiente al sector de cabecera y antecesor maíz, presenta una microestructura laminar en su parte superior (Foto 3.4.A) y una microestructura fisurada en su parte inferior (Foto 3.4B). En el sector superior de la lámina se presentan fisuras horizontales y subhorizontales gruesas, de 600 μm de ancho promedio, de paredes lisas y onduladas, así como fisuras finas subhorizontales de unos 60 μm de ancho. Estas fisuras definen agregados laminares de unos 5-10 mm de espesor. En la parte media e inferior de la muestra (Foto 3.4B), la masa basal se presenta más densa, con fisuras finas, comunes, de unos 60 μm de ancho, subhorizontales y subverticales. Se observan también algunas cavidades irregulares a redondeadas. La actividad biológica es escasa. Se observan algunos canales rellenos densos incompletos, con poca porosidad interna, particularmente en el sector inferior de la muestra, de 3-4 mm de diámetro. En superficie se presentan restos vegetales poco humificados con tejidos reconocibles; en el sector inferior los restos vegetales son escasos, pequeños, en proceso de humificación.



A- Sector superior de la muestra



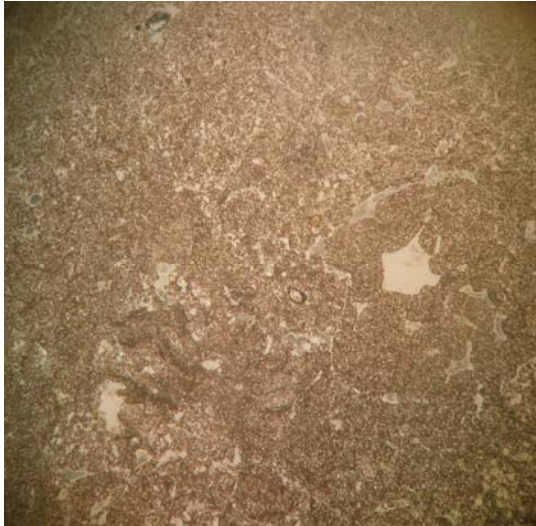
B-Sector inferior de la muestra

Foto 3.4. A y B. Corte delgado de la zona de cabecera correspondiente a antecesor maíz (lote LS 16). El ancho de la foto representa 2,5 cm.

A diferencia de la muestra del sector cabecera, la muestra LS16 correspondiente a antecesor maíz y sector del centro del lote, presenta en todo su espesor una combinación de microestructuras grumosa y esponjosa (Foto 3.5.A y B). En esta muestra no se observó laminación. La porosidad es fundamentalmente de origen biológico, constituida por canales abiertos y rellenos y huecos de empaquetamiento compuesto. Los canales rellenos presentan diversa morfología y, en general, están disturbados. Algunos son grandes, de unos 10 mm de diámetro, con relleno de restos fecales subsféricos, de 1-2 mm de diámetro, soldados. Otros canales de unos 5 mm de diámetro presentan pellets fecales pequeños, subsféricos e irregulares, de unos 150 μm de diámetro, en parte soldados. También se presentan canales rellenos densos, de unos 4-5 mm de diámetro. Se observan restos vegetales pequeños, ocasionales, en diversas etapas de humificación.

La muestra del lote SC con antecesor trigo/soja II, ubicada en el sector de cabecera, presenta una microestructura laminar en su parte superior (Foto 3.6.A) y una combinación de microestructuras laminar y fisurada en su parte inferior (Foto 3.6.B). En el sector superior del suelo se presentan fisuras horizontales anchas, de entre 1,5-3 mm, de paredes lisas y onduladas, que separan agregados laminares de 5-10 mm de espesor. Se observan huecos de empaquetamiento compuesto, entre microagregados de origen biológico y restos vegetales, particularmente en la superficie del suelo. En la porción inferior de la muestra la masa basal es más densa, con fisuras horizontales más finas, algunas de 400 μm y otras de 150 μm . Se observan canales de raíces, algunos con restos de tejidos frescos, de 1,5 mm de diámetro. También en la masa basal entre las fisuras se presentan cavidades redondeadas e irregulares, de unos 300 μm de diámetro.

Los pellets fecales son relativamente poco abundantes, concentrados sobre todo en la parte superior y media de la muestra. En superficie se observan algunos pellets subsféricos de unos 2 mm de diámetro y otros más pequeños de unos 200 μm . Se presentan restos vegetales reconocibles, comunes, en diversos grados de humificación, de colores pardo-anaranjados a negros.

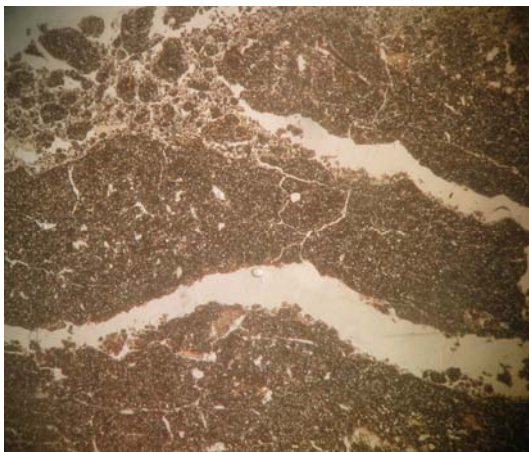


A- Sector superior de la muestra

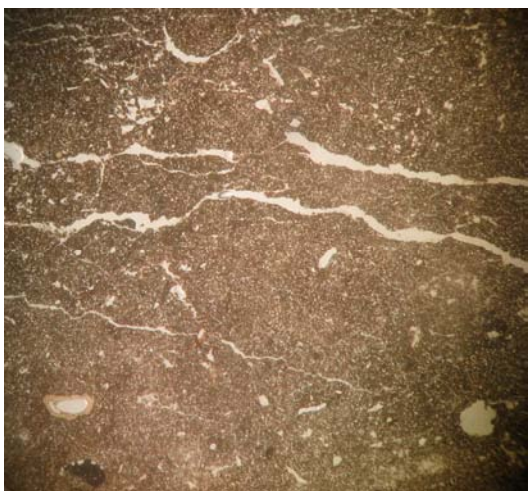


B-Sector inferior de la muestra

Foto 3.5.A y B. Corte delgado de la zona de centro correspondiente a antecesor maíz (lote LS 16). El ancho de la foto representa 2,5 cm.



A- Sector superior de la muestra

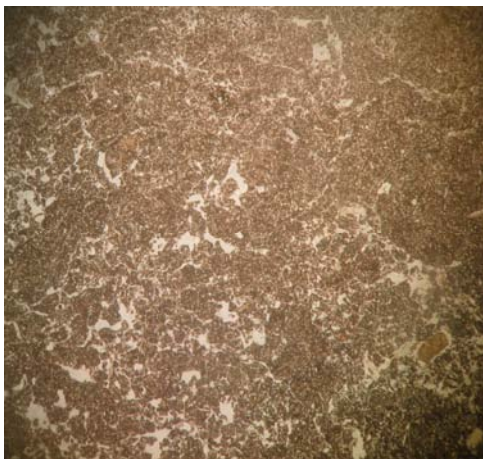


B-Sector inferior de la muestra

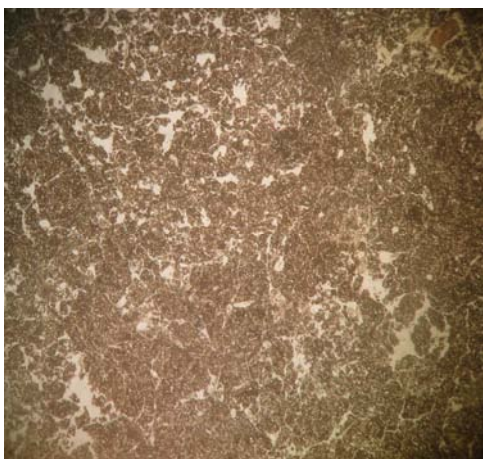
Foto 3.6.A y B. Corte delgado de la zona de cabecera correspondiente a antecesor trigo/soja II (lote SC). El ancho de la foto representa 2,5 cm.

La muestra ubicada en el centro del lote SC (trigo/soja de II) presenta en su mayor parte (Foto 3.7.A y B), tanto en el sector superior como inferior, una microestructura grumosa constituída por microagregados separados de origen biológico. En ciertos sectores la microestructura es esponjosa y en áreas más limitadas es fisurada. Son abundantes los canales rellenos de distinto tipo, disturbados, de límites difícilmente reconocibles debido a la marcada intensidad de la actividad biológica. La porosidad está constituida fundamentalmente por huecos de empaquetamiento compuestos. Se presentan algunas fisuras finas de unos 60 μm , cortas, de paredes lisas, en posiciones

diversas, relacionadas con bordes de canales, agregados biológicos soldados, y con algunos bloques subangulares de unos 5 mm.



A- Sector superior de la muestra



B- Sector inferior de la muestra

Foto 3.7. A y B. Corte delgado de la zona del centro del lote correspondiente a antecesor trigo/soja II (lote SC). El ancho de la foto representa 2,5 cm.

En conclusión, el análisis micromorfológico de los primeros centímetros del suelo muestra una interesante correspondencia con el análisis de estructura realizado *in situ* en el censo. Ambos lotes en cabecera presentan dominancia de estructura laminar o

masiva, mientras que en el centro del lote se observa bioturbación. Este proceso biológico pareció ser más intenso en el caso del antecesor trigo /soja II.

3.4 CONSIDERACIONES FINALES

La presencia generalizada de estructura laminar en el sitio estudiado permite suponer que sería consecuencia del asentamiento del suelo y la consolidación de esta estructura por el mecanismo abiótico de humedecimiento-secado. En el presente trabajo quedó en evidencia el efecto favorable de la presencia de raíces vivas durante todo el año (trigo/soja de II o pastura).

Se demostró que el tránsito es otro de los factores que hacen a la conformación de la estructura laminar, aceptando la hipótesis de trabajo propuesta, que hacía referencia a la conformación de este tipo estructural y su espesor por el estrés generado por el tránsito.

Por otro lado, se observó el rol de la raíces como factor que revierte la formación de láminas. La evidencia es el efecto antecesor (doble cultivo), y el muestreo en la pastura. Sin embargo, este mecanismo parece tener efecto solamente donde no hay alta intensidad de tránsito (centro de lote y pastura).

A mayor estructura laminar se observó menor infiltración y mayor resistencia al corte.

**Capítulo 4.- Descompactación de suelos en siembra directa:
efecto sobre los cultivos y perdurabilidad de la práctica**

4.1 INTRODUCCION

La compactación excesiva causada por el tránsito de maquinarias pesadas constituye un problema importante en suelos agrícolas de diversas regiones del mundo (Gupta y Allmaras, 1987; Hamza y Anderson, 2005a; Spoor, 2006). La preocupación sobre el impacto negativo de la compactación excesiva se ha visto incrementada en los últimos años en la Argentina, en consonancia con la intensificación agrícola y la expansión geográfica de la SD (Senigagliesi y Ferrari, 1993; Sasal et al., 2006; Botta et al., 2007; Álvarez et al., 2009). En este sistema de manejo, la compactación o endurecimiento del suelo es causada por la alta intensidad de tránsito resultante del pasaje de los tractores utilizados en la protección de los cultivos y en la cosecha. Ello ocurre especialmente cuando estas operaciones son realizadas con el suelo húmedo y con alta presión en los neumáticos (Botta et al., 2004).

Gran parte de los suelos pampeanos, en particular los de la Pampa Ondulada, se caracterizan por presentar elevada susceptibilidad a sufrir procesos de degradación física. Ello se debe, fundamentalmente, a su prolongada historia agrícola y su textura limosa (limos finos y muy finos, 2 – 20 μm). Estas características le confieren baja capacidad de regeneración de la estructura y escasa porosidad luego de sufrir la densificación o compactación (Senigagliesi y Ferrari, 1993; Cosentino y Pecorari, 2002; Taboada et al., 2008).

Ha sido suficientemente documentada la influencia negativa que ejerce la compactación excesiva sobre la emergencia de las plántulas, la exploración radical, la producción de biomasa y los rendimientos de los cultivos (Glinski y Lipiec, 1990; Hamza y Anderson, 2005b; Sadras et al., 2005).

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos que muestran mayor sensibilidad a sufrir daños en sus raíces y descensos de rendimientos a causa de la compactación (Erbach et al., 1986; Tardieu, 1988; Amato y Ritchie, 2000; Díaz Zorita, 2000; Álvarez et al., 2006; Taboada y Álvarez, 2007). Ello se debe a que es muy sensible al déficit hídrico debido a su acotado período crítico de definición de rendimiento (Sadras y Calviño, 2001). Este período está centrado en ± 20 días alrededor de floración y coincide en la región con una alta demanda atmosférica. Por lo tanto, la disponibilidad hídrica es la principal limitante del rendimiento de maíz en la Pampa Ondulada argentina (Alvarez y Grigera, 2005). En esta región, las raíces de maíz responden negativamente a la presencia de capas compactas en el subsuelo, pero no siempre con impacto sobre los rendimientos (Díaz Zorita, 2000; Álvarez et al., 2006; Taboada y Álvarez, 2007).

La remoción mecánica de capas compactadas mediante el uso de implementos descompactadores o escarificadores (e.g. “para-till”; paraplow, cultivie) ha tomado creciente difusión en el mundo (Evans et al., 1996; Hamza y Anderson, 2005b; Spoor, 2006; Jin et al., 2007). En nuestro país, la experiencia es más limitada y no siempre fue llevada a cabo con suelos manejados en SD, o con un cultivo sensible como el maíz (Díaz Zorita, 2000; Ferraris, 2004; Botta et al., 2006). En todos estos trabajos se muestran descensos significativos de la resistencia del suelo a causa de la descompactación, pero se sabe poco acerca de su perdurabilidad y de su impacto sobre el rendimiento de los cultivos.

Los antecedentes sobre el efecto de la descompactación sobre los cultivos son variables. Botta et al. (2006) hallaron 24,5% de incremento del rendimiento del cultivo de girasol en un Haplustol Entico de la provincia de La Pampa. En el sur de Australia, con precipitaciones anuales de 273 mm, Sadras et al. (2005) hallaron incrementos entre

0 y 43% en el rendimiento del trigo debido a la descompactación. Por el contrario, otros autores no encontraron directamente beneficios. En el nordeste de China, Jin et al. (2007) no observaron diferencias significativas a favor de la descompactación en SD en los rendimientos de cultivos de trigo y maíz a lo largo de 10 años. A nivel local, en una evaluación en el sur de Santa Fe, Ferraris (2004) atribuyó la falta de respuesta del maíz a la descompactación a la buena condición hídrica de la campaña. Estos antecedentes muestran que el impacto de la descompactación sobre los rendimientos varía en función de las condiciones físicas edáficas, la estación de crecimiento, el cultivo, el manejo, y las condiciones climáticas.

El maíz ha sido siempre un cultivo de importancia en la Pampa Ondulada. Actualmente, es el segundo cultivo de verano de importancia luego de la soja. Sus rendimientos están fuertemente asociados a las precipitaciones y la disponibilidad de nitrógeno (Alvarez y Grigera, 2005). Asimismo, más del 50 % de la superficie cultivada con maíz es manejada en SD en la Argentina (INDEC, 2005). La superficie de maíz cultivada en SD sobrepasa a la cultivada con LC en varias regiones de la Argentina, entre ellas la Pampa Ondulada (INDEC, 2005).

Los resultados obtenidos en el relevamiento regional presentado en el Capítulo 2 de la presente tesis muestran un aumento de la RP, o endurecimiento superficial, bajo SD, así como, menor infiltración en SD respecto de LC en los suelos limosos. No existe a nivel mundial y, menos aún a nivel local una masa crítica de datos que muestren el impacto de la práctica de descompactación y su perdurabilidad. Por lo tanto, resulta de gran interés evaluar el efecto de dicha práctica y su impacto a nivel regional como base de recomendación práctica para los productores y técnicos.

Objetivos:

- 1- Evaluar los efectos de la descompactación con escarificadores (e.g. paratill, paraplow, etc.) sobre las propiedades físicas edáficas y el rendimiento del maíz.
- 2- Cuantificar la residualidad o perdurabilidad de la práctica de descompactación.
- 3- Generar un modelo que permita una valoración económica de la práctica de descompactación.

Hipótesis:

- 1- La utilización de labranza descompactadora mejora el desarrollo radical, pero sólo aumenta el rendimiento en años con estrés hídrico leves.
- 2- En las situaciones donde haya respuesta a la práctica, ésta estará relacionada con la densidad aparente (absoluta o relativa) original del lote previo a la descompactación.
- 3- El impacto positivo de la práctica está restringido al cultivo inmediatamente posterior a la realización de la práctica, y la perdurabilidad de la práctica sobre las propiedades físicas edáficas será mayor en los suelos con mayor contenido de MO.

4.2 MATERIALES Y METODOS

4.2.1 Experimentos a campo con repeticiones

Durante la campaña 2004/05 y 2005/6 se llevaron a cabo seis experimentos en diferentes localidades de la Pampa Ondulada (Figura 4.1; Foto 4.1). En cada uno de los sitios se estableció un experimento de bloques completos al azar, con dos tratamientos: testigo y descompactado con tres repeticiones. En la Tabla 4.1 se brinda información detallada del manejo del suelo y el cultivo, de las características del sitio experimental y de la práctica de descompactación. Algunos establecimientos seguían una rotación con secuencia maíz-soja de primera; y otros aplicaban la rotación maíz-trigo/soja de segunda-soja de primera. Soja fue el cultivo antecesor en todos los sitios experimentales. La práctica de escarificado o descompactación fue realizada a una profundidad promedio de 37 cm, variando de 30 a 45 cm de profundidad (Tabla 4.1). En todas las situaciones se aplicaron fertilizantes nitrogenados y fosforados para eliminar posibles diferencias en la disponibilidad de nutrientes resultante de la descompactación. La práctica de descompactación podría aumentar la disponibilidad de nitrógeno por aumento de la descomposición de residuos o por mineralización. En el caso del fósforo puede incrementar su disponibilidad por mayor exploración radical.

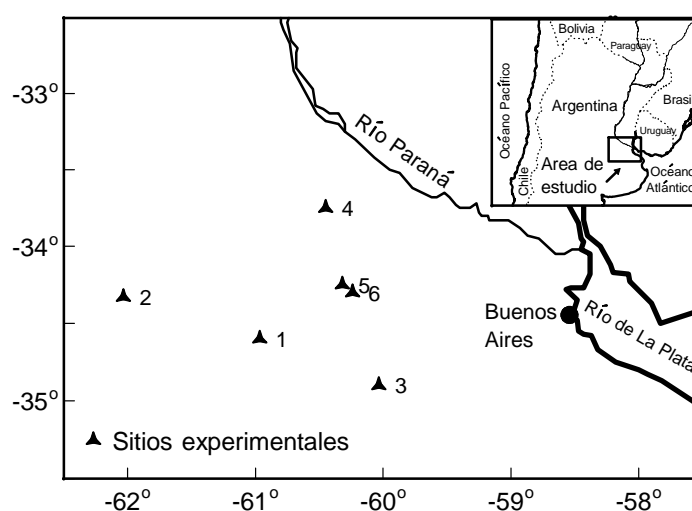


Figura 4.1. Localización de los sitios experimentales.

Tabla 4.1. Principales características del suelo y manejo de los sitios experimentales.

Sitio experimental	SE 1	SE 2	SE 3	SE 4	SE 5	SE 6
Localidad	Junín	San Gregorio	Chivilcoy	Acevedo	Salto Lote 5	Salto Lote 10
Años desde la última pastura	25	12	80	19	8	3
Años bajo SD	4	12	8	10	8	3
Suelo	Hapludol típico	Hapludol típico	Argiudol típico	Argiudol típico	Argiudol típico	Argiudol típico
Serie de suelo	Junín	María Teresa	Henry Bell	Ramallo	Arroyo Dulce	Arroyo Dulce
Clase textural	Franco arenoso	Franco	Franco	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso	Franco arcillo limoso
Arcilla 0-20 cm (g kg ⁻¹)	160	190	190	210	180	220
Limo 0-20 cm (g kg ⁻¹)	270	380	480	690	590	620
Arena 0-20 cm (g kg ⁻¹)	570	430	330	100	230	160
Materia orgánica 0-20 cm (g kg ⁻¹)	27	35	28	30,1	35,8	39,2
Descompactación (días antes de la siembra)	60	30	75	39	53	53
Tipo de maquinaria	Subsolador	Subsolador	Paratill	Ecoltier	Paratill	Paratill
Profundidad de descompactación (cm)	42	45	36	30	35	35



Foto 4.1. Vista del ensayo del Sitio Experimental 5 durante la práctica de descompactación y en dos momentos del ciclo del maíz.

A la siembra de maíz se tomaron muestras compuestas de suelo de 0-20 cm de profundidad en cada sitio experimental para determinar el contenido de materia orgánica (Walkley y Black, Nelson y Sommers, 1982) y caracterizar la textura por el método de la pipeta (Gee y Or, 2002). En el momento de la siembra e inmediatamente antes de cosecha del maíz se realizaron las siguientes determinaciones:

a- Tasa de infiltración (TI) utilizando el método de la USDA (1999) descrito en detalle en el Capítulo 2. Se efectuó una determinación por parcela.

b- Densidad aparente (DAP) con el método del cilindro. Los cilindros fueron tomados en superficie y a los 15 cm de profundidad. Se realizaron dos determinaciones por parcela y por profundidad.

c- Resistencia a la penetración (RP) utilizando un penetrómetro dinámico de cono con punta de 60°. Se realizaron dos determinaciones por parcela hasta 40 cm de profundidad cada 5 cm.

d- El contenido hídrico fue determinado a dos profundidades: 0-20 y 20-40 cm. Para lo cual, se tomó una muestra compuesta de cada parcela. Posteriormente, la misma fue secada a 105 °C hasta peso constante.

A floración del maíz se evaluó la abundancia radical utilizando el método de la cuadrícula (Manichon, 1987; Foto 4.2). Se abrió una calicata con pala en cada parcela quedando la planta de maíz localizada en el medio. Las raíces quedaban expuestas en una de las caras de la calicata y fueron estimadas usando una cuadrícula de 50 cm de ancho por 100 cm de profundidad con divisiones internas de 5 x 5 cm. Para caracterizar la abundancia radical se utilizó una escala semi-cuantitativa de 0 (ausencia de raíces) hasta 5 (máxima abundancia). Se determinó la radiación interceptada (%) en floración

en todos los sitios excepto en SE3. Para obtener la misma, se midieron los valores de radiación fotosintéticamente activa sobre y debajo del canopeo de maíz (5 lecturas por parcela), utilizando un radiómetro lineal de 1 m (LICOR LI-191SA). El índice de verdor (Minolta SPAD-502 chlorophyll meter) se determinó en la hoja inmediatamente superior a la espiga en 20 plantas consecutivas de maíz por parcela.



Foto 4.2. Calicata para cuantificación de abundancia de raíces por el método de la cuadrícula.

En el momento de la cosecha se determinaron el rendimiento de maíz y sus componentes (número de granos m^{-2} y peso medio del grano). Para obtener estos valores se cosecharon manualmente las espigas de 4 metros lineales por parcela. Las muestras de granos fueron secadas en estufa a $60^{\circ}C$ durante 72 horas y pesadas. El peso individual de grano se determinó en tres submuestras de 100 granos de la muestra de grano de cada parcela. El número de granos fue computado dividiendo el peso total base

seca por el peso medio de grano. Las precipitaciones fueron registradas durante el barbecho y el ciclo del maíz en cada sitio.

4.2.2 Experimentos a campo en franjas apareadas

Un segundo grupo de experimentos se realizó en franjas apareadas en campos de producción. Luego de las primeras campañas de ensayos a campo con repetición, la empresa Tecnoagro concurreó a la FAUBA proponiendo la evaluación de descompactación en campos asesorados por la empresa. Es así que en la campaña 2006/07 se diseñó un protocolo acorde con las necesidades planteadas, evaluando un número limitado de propiedades edáficas y rendimiento de maíz por cosecha mecánica. Por otro lado, se proyectó la evaluación de la práctica más allá del primer cultivo, en los sitios donde fue posible en función de los esquemas productivos. Se realizaron seis ensayos de campo durante la campaña 2006/07 en lotes de producción de maíz ubicados en establecimientos de las provincias de Santa Fe y Buenos Aires (Pampa Ondulada) (Tabla 4.2). Los lotes tenían una historia de más de 10 años de agricultura continua en siembra directa, manejados con rotaciones trigo/ soja de segunda – maíz – soja de primera o trigo/ soja de segunda – maíz. Los lotes donde se instalaron los ensayos se caracterizaron por su relieve plano y por ende, no se observaron signos de erosión hídrica. Los suelos fueron Argiudoles típicos que reunieron como característica común el poseer textura franco limosa en su horizonte A. El contenido de materia orgánica promedio fue $31,3 \text{ g kg}^{-1}$ y el contenido de P Bray 1 varió entre 9 y 21 mg kg^{-1} (Tabla 4.2).

Los tratamientos fueron: 1-testigo y 2- descompactado mediante el pasaje de un escarificador (paratill o cultivie). El diseño experimental fue en franjas apareadas en cada sitio (6 x 300 m). La profundidad media de descompactación fue 30 cm, variando entre 35 y 50 cm el distanciamiento entre púas de los escarificadores. Desde el pasaje del implemento hasta la siembra del cultivo de maíz transcurrieron entre 66 a 120 días según el sitio. El cultivo de maíz fue sembrado a mediados del mes de octubre y cosechado en el mes de abril de 2007. Los sitios fueron fertilizados con una dosis promedio de 65 a 100 kg N ha⁻¹ como urea o UAN a la siembra o en estado de seis hojas y 20-30 kg P ha⁻¹ en el momento de la siembra. Posteriormente, en el sitio 8 se sembró soja de primera en octubre de 2007 con una fertilización de 20 kg ha⁻¹ de P. Los sitios 11 y 12 se destinaron al doble cultivo trigo/soja 2da. El trigo se sembró en junio de 2007 con una fertilización media de 67 kg ha⁻¹ de N y 50 kg ha⁻¹ de P y la soja de segunda se sembró a mediados de diciembre de 2007.

Al inicio del ensayo, cuando el maíz se encontraba en el estadio V5-6, se realizó un muestreo compuesto de los suelos hasta 20 cm de profundidad. Se determinó la distribución de tamaño de partículas por el método de la pipeta (Gee y Or, 2002), y a partir de esta distribución, la clase textural. También se determinó el contenido de materia orgánica total por el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). En cada sitio se registraron las lluvias ocurridas mediante pluviómetros instalados en cada establecimiento.

En cada tratamiento se determinaron las siguientes propiedades edáficas: a- DAP usando el método del cilindro (Grossman y Reinsch, 2002), insertando cilindros de 5 cm diámetro y 5 cm altura en las capas 0-5 cm y 15-20 cm (n = 4); b- contenido hídrico gravimétrico mediante secado en estufa a 105° hasta peso constante, cada 20 cm hasta 1

m de profundidad del suelo; c- RP usando un penetrómetro estático digital con punta de 30° (Lowery y Morrison, 2002) (n = 10); d- TI método USDA (1999); y e- el contenido de nitratos en capas de 20 cm hasta 40 cm de profundidad, a través de la diazotación con reactivo SNEDD, sobre muestra húmeda (Daniel y Marban, 1989).

Tabla 4.2. Principales características de suelo (0-20 cm), manejo y ubicación de los sitios de muestreo.

Sitio experimental	SE 7	SE 8	SE 9	SE 10	SE 11	SE 12
Localidad	Santa Emilia	Santa Emilia	Teodelina	Teodelina	Colón	Colón
Serie predominante	Venado Tuerto	Venado Tuerto	Rojas	Rojas	Rojas	Rojas
Materia orgánica (g kg ⁻¹)	31,9	32,6	32,5	30,3	31,1	29,5
P Bray 1 (mg kg ⁻¹)	14	14	16	21	16	9
Limo (g kg ⁻¹)	600	600	494	494	494	494
Arena (g kg ⁻¹)	149	149	277	277	277	277
pH	5,9	6,0	5,6	5,7	5,9	6,0
Descompactación (días antes de la siembra)	65	67	77	80	118	112
Fecha de siembra	12/10	11/10	19/10	13/10	11/10	18/10

Antes de la cosecha del maíz, se midió la RP con control del contenido hídrico gravimétrico en todas las situaciones con el objetivo de evaluar la residualidad de la labor de descompactación. Los cultivos de maíz fueron cosechados mecánicamente. Se evaluó el rendimiento en grano del cultivo en cinco de los seis sitios experimentales,

utilizando tolvas individuales. En el SE 11 no fue posible cosechar debido a las excesivas lluvias otoñales que produjeron anegamiento y por lo tanto, falta de piso.

Para continuar con la evaluación de la residualidad de la práctica de descompactación, se determinó la resistencia a la penetración en el siguiente cultivo de verano; así como los rendimientos y el desarrollo radical de los cultivos subsiguientes al maíz realizados en la campaña 2007/08 de los sitios 8, 11 y 12. En esos lotes se realizaron en febrero de 2008 tres calicatas hasta 1 m de profundidad en cada tratamiento en las cuales se determinó la abundancia de raíces utilizando el método de la cuadrícula (Manichon, 1987). En estos sitios se determinó el rendimiento de trigo y/o soja usando cosecha mecánica con tolvas individuales.

4.2.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico aplicado dependió de si la variable en análisis fue evaluada en ambos diseños (con y sin repetición) o sólo en uno de ellos. De estar medido en los dos, el análisis utilizado fue de t apareada. En el caso del diseño con repeticiones se comparaba el valor medio de ambos tratamientos en cada sitio. Esta misma lectura se utilizó para el caso de evaluaciones disponibles en el ensayo sin repeticiones. Para las variables sólo evaluadas en los ensayos con repeticiones los datos fueron analizados por ANVA. El efecto del tratamiento sobre la distribución de raíces fue analizado para cada sitio en forma individual y también para el conjunto con t-apareada. Los datos fueron transformados si no se cumplía con el requisito de homogeneidad de varianza. Cuando se analizó el comportamiento de la variable a

distintas profundidades, la comparación se realizó dentro de cada capa o estrato. Finalmente, se aplicó un análisis multivariado (componentes principales) para buscar los principales gradientes de variación entre tratamientos y/o rendimiento. Los gradientes fueron combinaciones lineales de las siguientes características evaluadas: arcilla, limo, arena, materia orgánica (MO), densidad aparente (DAP, 0-5 y 15-20 cm), RP (promedio 0-40 cm), humedad gravimétrica (0-40 cm), rendimiento y tratamiento (Testigo =1; Descompactado= 2).

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 Caracterización de suelos y clima

Los suelos evaluados fueron los suelos agrícolas más representativos de la región: Hapludoles y Argiudoles Típicos. Los mismos presentan variaciones en el contenido de limo (270-690 g kg⁻¹), arena (10-570 g kg⁻¹); y MO (27-39,2 g kg⁻¹) de 0-20 cm (Tabla 4.1 y 4.2).

Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo son el principal factor que limita la producción de maíz en la Región Pampeana, alcanzando el máximo rendimiento en los 700 mm (Alvarez y Grigera, 2005). Asimismo, el período crítico de definición de rendimiento se encuentra en torno a floración coincidiendo generalmente con el mes de diciembre en este estudio.

En el presente trabajo, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo presentaron diferencias entre las campañas, siendo mayor la diferencia en las precipitaciones ocurridas en diciembre (Figura 4.2 A y B). En las campañas 2004/05 y 2006/07, las

precipitaciones durante ese mes superaron ampliamente la media de la región, mientras que en la campaña 2005/06 las mismas fueron 50% inferiores a dicho valor.

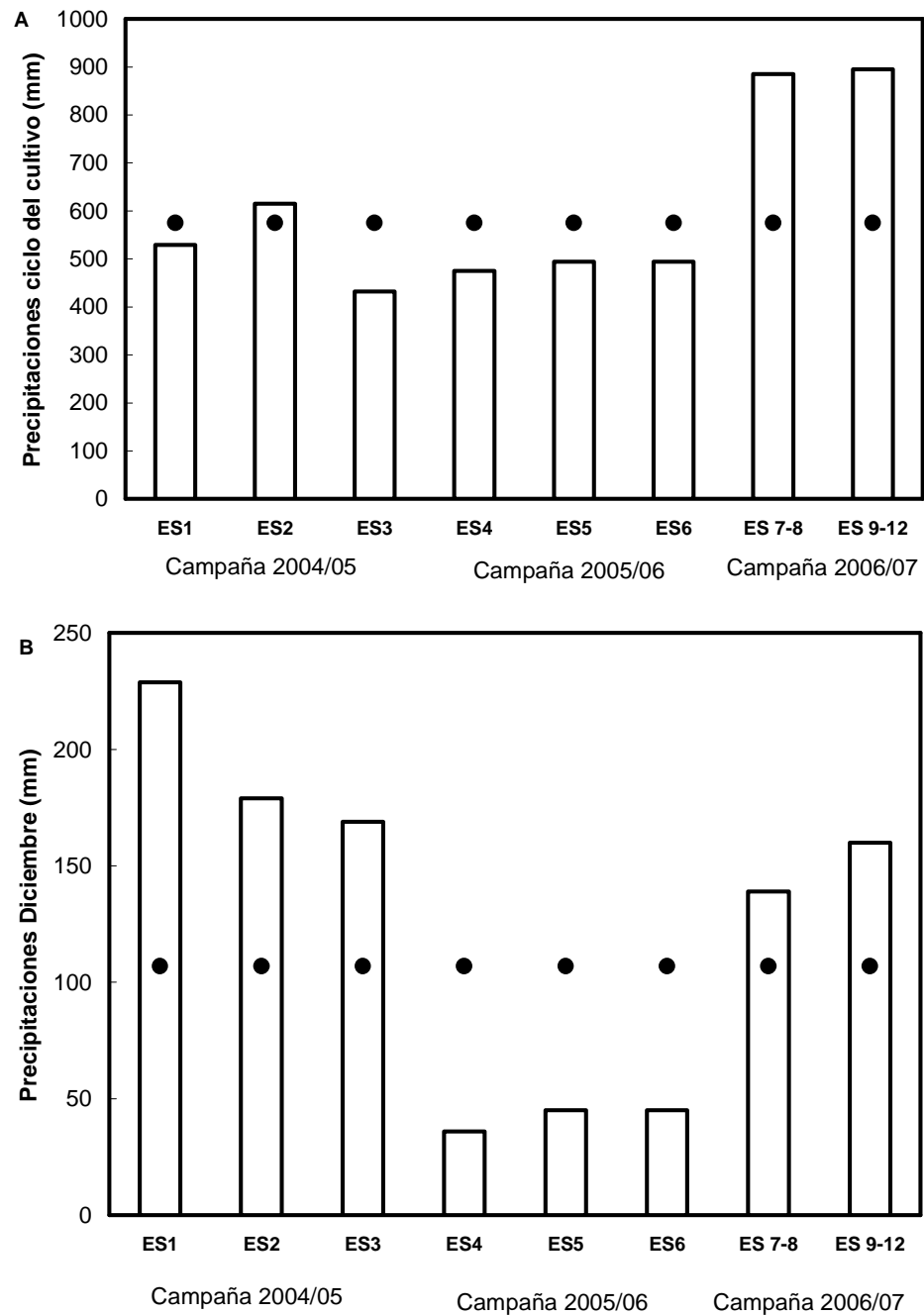


Figura 4.2. A. Precipitación durante el ciclo del cultivo de maíz y en el mes de diciembre en los distintos ensayos. La media histórica de la región está indicada con punto.

4.3.2 Efectos sobre las propiedades edáficas y su perdurabilidad

4.3.2.1 Tasa de infiltración

La TI presentó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos en el momento de la siembra del maíz (Figura 4.3) considerando los 12 sitios. El valor promedio de la TI del descompactado fue 7-veces mayor que en el testigo. Generalmente, se observó elevada variabilidad entre réplicas en la TI medida en los tratamientos descompactados, lo cual se debe al trabajo propio del implemento. Éste se caracteriza por generar áreas de mayor remoción en la zona de la púa y de menor disrupción hacia los laterales (Spoor, 2006). En el campo, al realizar las calicatas se observó el dibujo de la punta y la acumulación de agua en dicho punto. Las TIs determinadas en los testigos a la siembra se clasifican como moderadas a rápidas según USDA (1999). La práctica de descompactación llevó la clasificación a las categorías entre moderadamente rápidas a muy rápidas. Esta clasificación se basa en la TI básica.

En suelos de la región manejados con SD se ha determinado la presencia de estructura laminar (con dominancia de poros horizontales) y debajo de la misma una zona masiva (de mayor densidad) (Sasal et al., 2006; Álvarez et al., 2009; Bonel et al., 2005). La ruptura mecánica de ambas capas favorece la infiltración de agua en el perfil. Los cambios favorables observados en la TI al comienzo del desarrollo de los cultivos incrementan la precipitación que efectivamente ingresa a los suelos. Ello conduciría a generar, entonces, una mayor disponibilidad de agua para los cultivos de maíz.

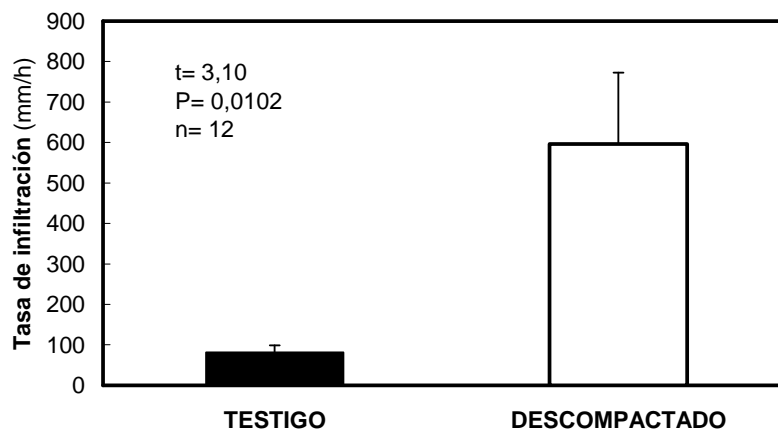


Figura 4.3. Tasa de infiltración para los tratamientos a la siembra del cultivo de maíz considerando los 12 sitios. Se indica error estándar.

Las diferencias en la TI entre tratamientos disminuyeron notablemente al momento de la cosecha del maíz, y sólo en un sitio resultó estadísticamente significativa (ES6; Tabla 4.3). Ello muestra una baja perdurabilidad de la práctica de descompactación y por ende del ingreso de agua al perfil de suelo.

Este efecto de corto plazo podría atribuirse a que la macroporosidad creada por el implemento mecánico fue inestable, y el efecto se revirtió por el reacomodamiento de los agregados y de las partículas del suelo. El sitio que mostró mayor perdurabilidad de la práctica fue el que presentó mayor contenido de materia orgánica y menos años desde la última pastura, lo cual pudo contribuir a una mayor estabilización de la estructura. Los valores de TI a cosecha también presentaron una alta variabilidad en el descompactado, siendo el error estándar medio del testigo 16 mm h^{-1} y del descompactado 167 mm h^{-1} .

Tabla 4.3. Valores de la tasa de infiltración (TI) y error estándar en los tratamientos a cosecha del maíz para los sitios experimentales con repetición (n= 6). Letras distintas entre tratamientos indicar diferencias significativas en el sitio (P<0,05).

Sitio experimental	Cosecha	
	Testigo	Descompactado
SE 1	44,4 ± 20,2	a 114,7 ± 24,2 a
SE 2	43,6 ± 6,2	a 80,9 ± 35,9 a
SE 3	62,9 ± 27,3	a 46,2 ± 35,7 a
SE 4	22,5 ± 4,6	a 1295,7 ± 654,2 a
SE 5	203,9 ± 34,2	a 378,3 ± 193,7 a
SE 6	17,3 ± 6,2	a 398,6 ± 60,5 b

4.3.2.2 Densidad aparente

La DAP fue un parámetro poco sensible a la práctica de descompactación, no detectándose cambios significativos entre los tratamientos ni en la profundidad de 0-5 cm (P= 0,06; n= 12) ni de 15-20 cm (P= 0,33; n= 12) (Figura 4.4). Ello coincide con la informado por otros autores, que detectaron cambios en la RP, pero no en la DAP en ensayos de tránsito creciente (Botta et al., 2004; 2005) y también en experiencias de descompactación profunda (Carter et al., 1996; Hamilton-Manns et al., 2002).

Los valores de DAP de 0-5 cm en el testigo variaron entre 1,05 y 1,32 Mg m⁻³; mientras que en la profundidad de 15 a 20 cm entre 1,18 y 1,46 Mg m⁻³. En el estrato de 15-20 cm, la densidad aparente fue en promedio un 12,5% mayor que en superficie.

La DAP puede servir como indicador de la compactación del suelo y para caracterizar las posibles restricciones al crecimiento radical (Soil Quality Institute, 1999). Las DAP críticas a partir de las cuales se puede esperar que el crecimiento radical se afecte dependen de la textura del suelo. El valor crítico para estos suelos sería

1,55 Mg m^{-3} según los umbrales dados por el Soil Quality Institute (1999) o entre 1,36 y 1,42 Mg m^{-3} según Pilatti y de Orellana (2000). En el presente estudio, los valores de DAP en los testigos fueron siempre inferiores al umbral propuesto por el Soil Quality Institute (1999). En el caso de la DAP crítica según el modelo propuesto por Pilatti y de Orellana (2000), ningún valor de DAP sobrepasó la DAP crítica en 0-5 cm, mientras que de 15 a 20 cm, seis sitios sobrepasaron dicho valor (ES 7 al 12; Figura 4.4).

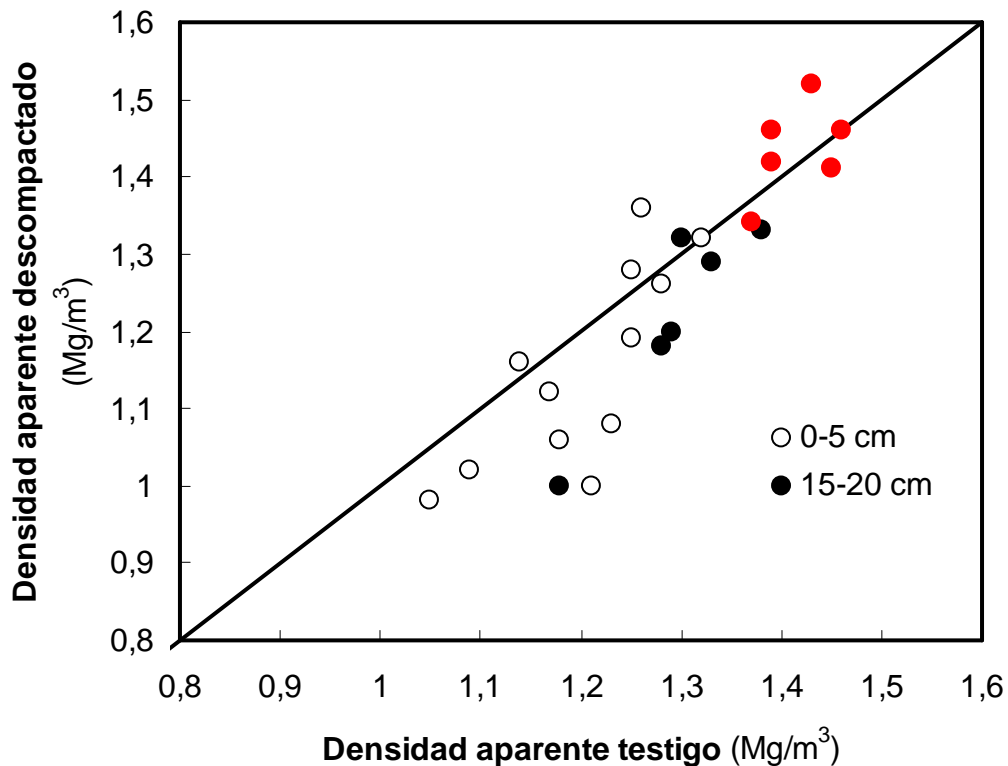


Figura 4.4. Relación entre los valores de densidad aparente en el testigo y descompactado para las profundidades de 0-5 cm y 15-20 cm. Se indica la línea 1:1. En rojo se muestran los valores de densidad aparente de 15-20 cm que sobrepasan los valores críticos de densidad aparente estimados a partir de la función propuesta por Pilatti y de Orellana (2000).

4.3.2.3 Resistencia a la penetración

Las variaciones en la resistencia a la penetración deben ser consideradas en forma conjunta con el contenido hídrico edáfico, debido a la relación negativa existente entre ambos parámetros. La humedad no mostró diferencias entre tratamientos en ninguno de los sitios ni en los momentos de muestreo, permitiendo la comparación directa de resistencia a la penetración entre tratamientos ($P > 0,05$). En la Figura 4.5 se presenta la relación entre la humedad gravimétrica del suelo en el testigo vs. descompactado y la línea 1:1. La RP fue muy sensible a la práctica de descompactación mostrando una importante reducción a la siembra en los suelos descompactados (Figura 4.6). La reducción de RP por la descompactación fue en promedio del 40% de 0-20 cm y de 20% en el estrato de 20-40 cm. Dicha diferencia entre tratamientos se sostuvo hasta el momento previo a la cosecha del maíz (Figura 4.7). El significado de los valores de RP puede ser inferido de los umbrales críticos de resistencia a la penetración definidos por la literatura (Boone et al., 1986; Glinski y Lipiec, 1990). Estos umbrales varían de 1,5 MPa (50% de disminución en el crecimiento radical de maíz) a 3 MPa (detenimiento del crecimiento radical) para punta de 30° y 2-4 MPa para punta de 60°. Los promedios de RP, en general, no superaron los umbrales críticos máximos. Teniendo en cuenta que el nivel de humedad edáfica era en general adecuado en todas las situaciones y profundidades no debe descartarse que los umbrales sean sobrepasados en condiciones de suelo más seco (Gupta y Allmaras, 1987; Glinski y Lipiec, 1990).

En tres de los sitios se evaluó la RP en el momento de la siembra de la soja de primera o segunda según el caso. En ese momento -más de un año desde la descompactación- los tratamientos no se diferenciaban, sino que por el contrario el

tratamiento descompactado presentaba un valor levemente superior al testigo de 0 a 5 cm (Figura 4.8). Cabe destacar, que sólo se evaluaron tres sitios correspondientes a los sitios descompactados en 2006.

Uno de los efectos negativos de una labor de descompactación es dejar al suelo más vulnerable (menor capacidad portante) a la aplicación de nuevos estreses compactantes (Hamza y Andersonb, 2005; Botta et al., 2007). El tiempo de recompactación depende del manejo posterior del tránsito (Evans et al., 1996; Botta et al., 2006). En el momento previo a la cosecha del cultivo de maíz (abril de 2007), el suelo presentaba aún efectos de la labor de descompactación realizada meses atrás. El escenario hídrico a cosecha de ese cultivo de maíz fue extremadamente húmedo pues las precipitaciones en marzo alcanzaron los 250 mm (Figura 4.2A). Por lo tanto, la cosecha del cultivo se efectuó con el suelo con mínima capacidad portante. Un escenario de alta intensidad de tránsito no controlado y altos rendimientos del maíz pudo haber contribuido a determinar una baja residualidad de la práctica de descompactación.

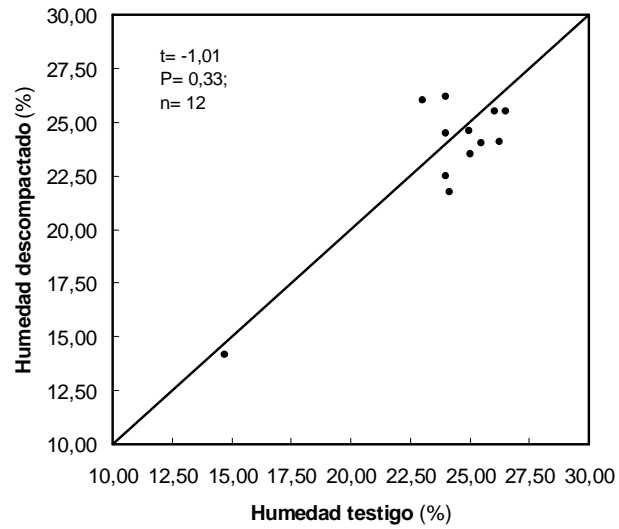


Figura 4.5. Relación entre la humedad gravimétrica del testigo y descompactado en los 12 sitios a la siembra del maíz. La línea indica la relación 1:1.

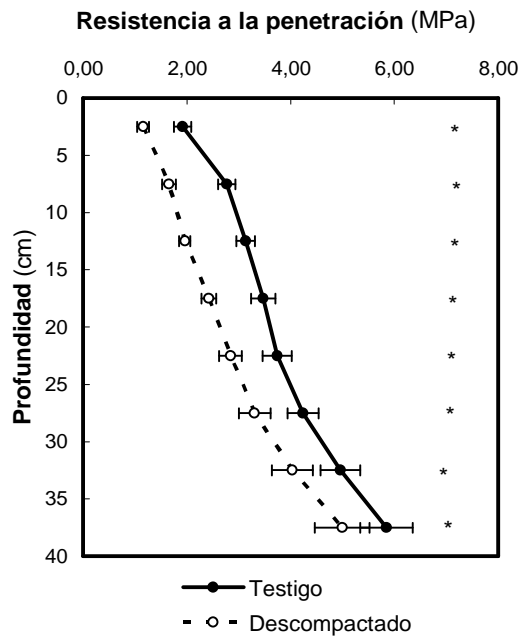


Figura 4.6. Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad para testigo y descompactado a la siembra del cultivo de maíz para los 12 sitios. Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas $P < 0,01$.

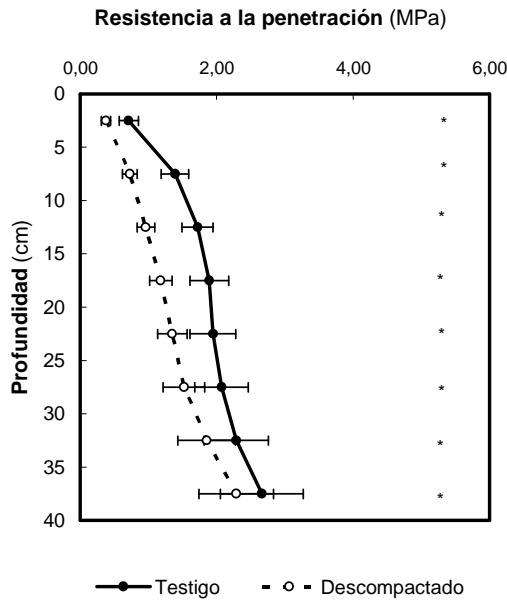


Figura 4.7. Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad para los tratamientos testigo y descompactado previo a la cosecha del cultivo de maíz para los 12 sitios. Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas $P < 0,01$.

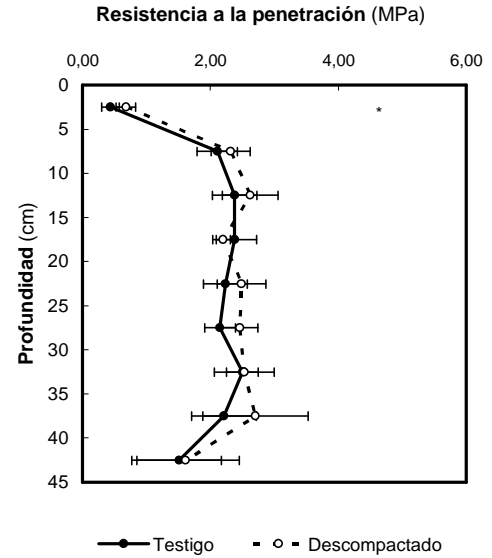


Figura 4.8. Variación de la resistencia a la penetración con la profundidad para los tratamientos testigo y descompactado a la siembra del cultivo de soja de primera o segunda según el sitio para 3 sitios (Sitios 8,11 y 12). Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas $P < 0,05$. Contenido hídrico gravimétrico = 17-22 % en peso. Descompactado en el maíz anterior.

4.3.2.4 Contenido de nitratos y humedad edáfica en V5-6

En la campaña 2006/07 se evaluó el contenido de nitratos en el estadio V5-6 del cultivo de maíz. La Tabla 4.4 muestra los contenidos de nitrógeno disponible para el cultivo. Como es esperable, existió estratificación del contenido de nitratos en profundidad (capa 0-20 cm > capa 20-40 cm). Los valores del estrato superior duplican aproximadamente a los del inferior. El pasaje del escarificador produce la incorporación parcial del rastrojo y la remoción del suelo, lo cual hace prever cambios en la disponibilidad de nitrógeno. En efecto, Díaz Zorita (2000) observó una reducción del 20% de la cobertura por residuos y una tendencia a incrementar la disponibilidad de nitrógeno por la labor de descompactación en planteos de SD en la Pampa Semiárida. Sin embargo, los resultados del presente trabajo no mostraron diferencias significativas en el contenido de nitratos entre los tratamientos testigo y descompactado. Como los análisis fueron realizados en V5-V6, los niveles de nitratos en el suelo pueden estar modificados por la distinta absorción del cultivo según el tratamiento. Asimismo, las intensas lluvias en el mes de octubre pueden haber generado lixiviación de nitratos anulando posibles diferencias. Cabe destacar, que todos los ensayos en las distintas campañas recibieron fertilización nitrogenada tendiente a compensar las posibles diferencias de disponibilidad generadas por una mayor descomposición en el tratamiento descompactado.

Tabla 4.4. Contenido de nitratos a V5-V6 para los sitios experimentales (SE) y tratamientos correspondientes a la campaña 2006/7 de 0-20 y 20-40 cm. P= probabilidad según test de t apareada.

N-Nitratos				
mg kg ⁻¹ suelo				
SE	0-20 cm		20-40 cm	
	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado
7	26	17	10	8
8	14	15	6	6
9	28	27	13	11
10	30	28	16	17
11	13	16	6	8
12	18	15	7	9
Media	21	20	9	10
P	0,44		0,44	

En los mismos sitios experimentales se evaluó la disponibilidad de agua hasta 1 m de profundidad (Tabla 4.5). Los tratamientos no presentaron diferencias de contenido hídrico gravimétrico hasta 1 m de profundidad en V5-V6, siendo los valores de humedad en todas las situaciones superiores a 25 % en peso (Tabla 4.5). El mayor ingreso de agua al suelo, como consecuencia de una mayor infiltración en el tratamiento descompactado pudo haber mejorado la disponibilidad inmediata de agua para las plantas. Sin embargo, ello no se vio reflejado en la medición de humedad edáfica en las

primeras etapas del cultivo. Se debe considerar que el contenido de humedad, al igual que los nitratos, se determinó en el estado de V5-V6. Por lo tanto, su valor depende de la absorción realizada por el cultivo hasta el mencionado estadio. La ausencia de diferencias en la disponibilidad hídrica de los tratamientos fue también observada en los muestreos de RP donde en forma simultanea hasta los 40 cm se evaluó el contenido hídrico.

Tabla 4.5. Humedad gravimétrica (g 100 g⁻¹ suelo) promedio para los distintos tratamientos en el estadio V5-6 del cultivo de maíz campaña 2006/7. El promedio corresponde a 6 sitios (SE 7 al 12). ± Error estándar.

Humedad (g 100 g⁻¹ suelo)		
Profundidad (cm)	Testigo	Descompactado
0-20	24,1 ± 0,46	23,6 ± 0,81
20-40	25,7 ± 0,78	25,4 ± 0,48
40-60	27,1 ± 0,55	26,9 ± 1,09
60-80	25,4 ± 0,60	25,3 ± 1,11
80-100	24,5 ± 0,91	23,9 ± 1,27

4.3.2.5 Efectos sobre el cultivo y perdurabilidad de la práctica

En los ensayos de las primeras campañas se midió la radiación interceptada determinada al momento de floración. La misma no mostró diferencias entre tratamientos (Tabla 4.6). Este parámetro presentó valores entre 76 y 94% para el tratamiento testigo, y entre 72 y 96% para el descompactado. Por otro lado, el índice de verdor determinado con el SPAD no presentó diferencias entre tratamientos para ninguno de los sitios evaluados.

Tabla 4.6. Radiación interceptada e índice de verdor en floración en 5 sitios experimentales (SE) en ambos tratamientos. Valor medio \pm error estándar en cada SE. ANOVA conjunto considerando todos los SE y la interacción SE x Tratamiento.

SE	Radiación interceptada (%)		Índice de verdor	
	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado
1	93,4 \pm 3,8	95,7 \pm 2,6	58,0 \pm 1,8	58,8 \pm 1,2
2	80,4 \pm 1,9	83,4 \pm 0,7	56,4 \pm 1,9	54,9 \pm 0,7
4	76,0 \pm 3,7	72,0 \pm 1,7	53,6 \pm 2,8	53,3 \pm 1,1
5	84,8 \pm 1,0	87,6 \pm 5,5	43,4 \pm 2,5	44,7 \pm 1,4
6	94,2 \pm 0,9	92,3 \pm 0,8	49,0 \pm 1,6	48,2 \pm 1,1

ANOVA			
SE	P<0,001		P<0,001
Tratamiento	ns		ns
SE x Tratamiento	ns		ns

El patrón de abundancia radical en profundidad se evaluó para el cultivo de maíz en las dos primeras campañas hasta el metro de profundidad. El análisis sitio por sitio, mostró diferencias entre ellos (Figura 4.9). En dos sitios hubo interacción tratamiento x profundidad (SITIO 1 y 3). En los sitios 4 y 5 hubo diferencia entre tratamientos, en el 4 a favor del descompactado y en el 5 del testigo. Finalmente, en los sitios 2 y 6 no hubo diferencias entre tratamientos. En la Figura 4.10 se presentan los patrones de abundancia radical en distintas tonalidades lo que permite visualizar mejor la distribución radical.

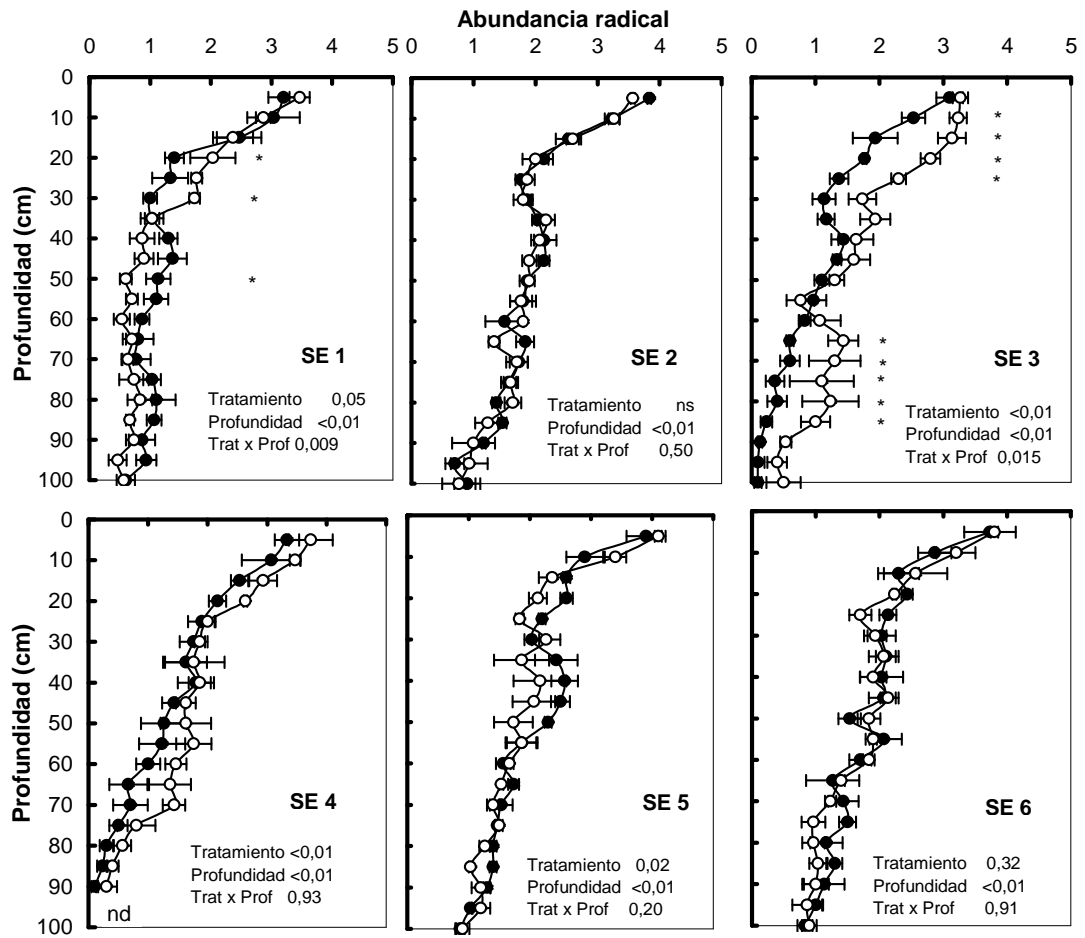


Figura 4.9. Distribución de la abundancia radical en los distintos sitios para los dos tratamientos evaluados (Campaña 2004 y 2005). Círculos llenos testigo y círculos vacíos descompactado. Se presenta el valor de P para el tratamiento, la profundidad y la interacción. SE= sitio experimental. nd: dato no disponible. Escala de abundancia radical: 0 ausencia de raíces y 5 máxima abundancia.

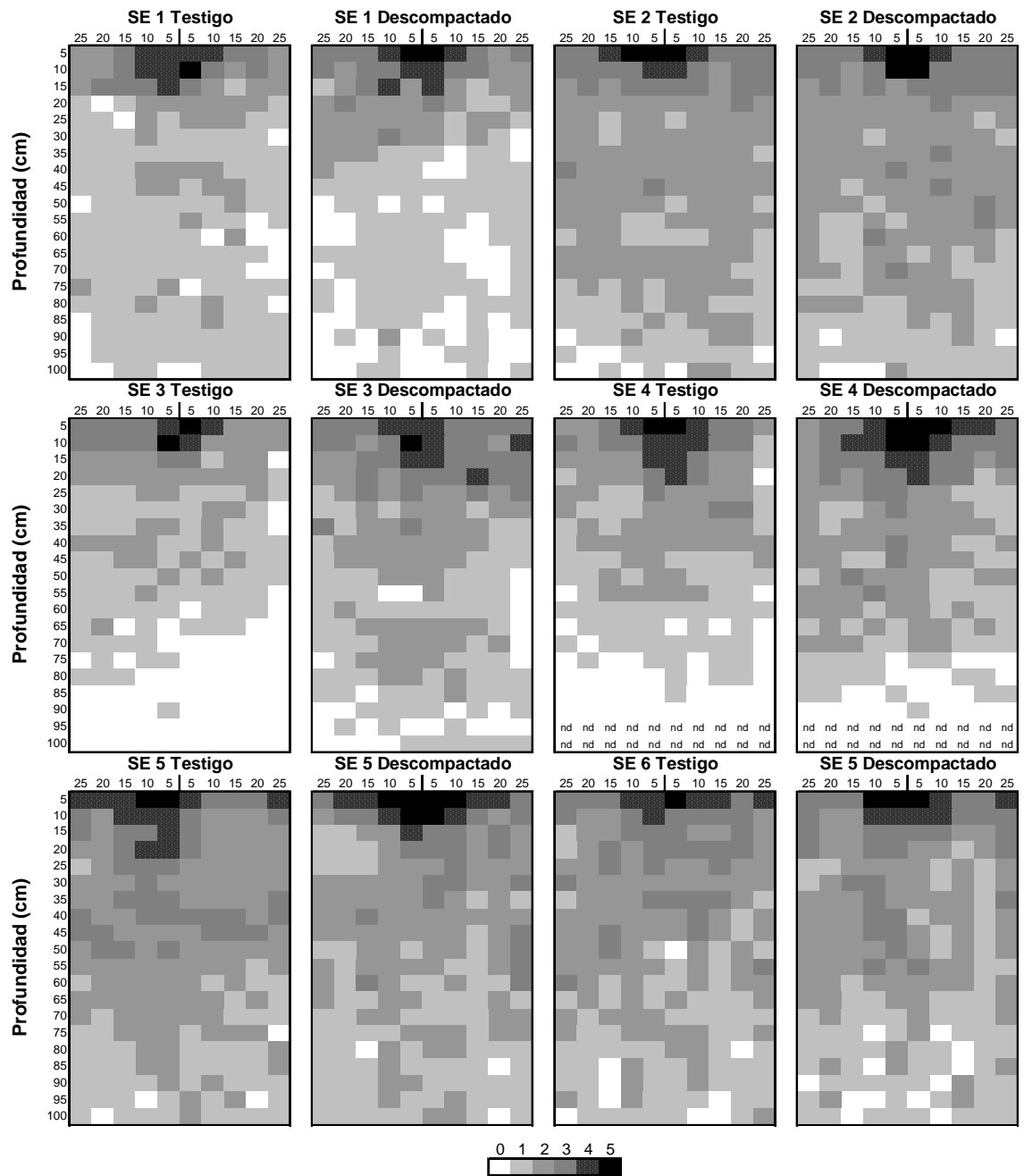


Figura 4.10. Distribución de la abundancia radical en los distintos sitios para los dos tratamientos evaluados. Se presenta la escala correspondiente a los 5 niveles de abundancia evaluados. SE= sitio experimental. nd: dato no disponible. En el centro se indica la planta y la distancia (cm) en sentido horizontal a partir de ella.

Con el objetivo de realizar una evaluación conjunta del efecto de la práctica sobre la abundancia radical, se analizaron todos los sitios en conjunto aplicando un diseño de t-apareada profundidad por profundidad. En este caso, sólo se encontró diferencia en la abundancia radical en el estrato integrado de 0-10 cm, siendo la abundancia 7 % mayor en el tratamiento descompactado (Figura 4.11). Se puede por lo tanto, suponer una mejora en el acceso a recursos – agua y nutrientes. Cabe destacar que en todas las situaciones se observó presencia de raíces hasta el metro de profundidad, y un importante descenso de la abundancia con la profundidad más allá de las diferencias texturales de los suelos. El sitio 4 que corresponde a la serie Ramallo que presenta un horizonte Bt fuertemente textural es el que presenta menor abundancia en profundidad aún en el tratamiento descompactado.

Los datos observados en maíz difieren con lo encontrado en la abundancia de raíces de soja donde se observó que la abundancia era cercana a cero con contenidos de arcilla de 350 g kg^{-1} (Micucci y Taboada, 2006). Esto puede estar relacionado con la diferente arquitectura radical de ambos cultivos, pivotante y en cabellera. Dardanelli et al. (2003) observaron crecimiento en forma de “cumpling” o en forma aglutinada de raíces entre las grietas de los horizontes Bt fuertemente texturales.

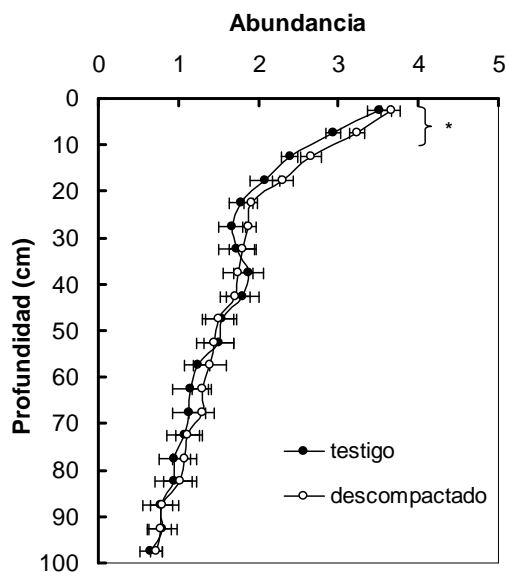


Figura 4.11. Distribución de la abundancia radical promedio de los 6 sitios presentados en la Figura 4.9 para los dos tratamientos evaluados. Se indica con asterisco diferencias significativas al $P < 0,05$ en el estrato promedio de 0-10 cm aplicando un diseño de t-apareada. SE= sitio experimental. Escala de abundancia radical: 0 ausencia de raíces y 5 máxima abundancia.

La abundancia radical no copió las grandes diferencias de la RP observada entre los tratamientos (Figura 4.6). Esto puede deberse a que la humedad del suelo permitió mantener valores de RP compatibles con un buen crecimiento radical.

En los sitios 8, 11 y 12 evaluados en la última campaña de maíz se procedió a muestrear la abundancia de raíces del cultivo de soja (Figura 4.12). El análisis conjunto de los tres sitios indica que sólo se hallaron diferencias significativas entre tratamientos (descompactado > testigo) en la capa de 5 a 10 cm. Similar a lo encontrado en maíz donde el efecto de la descompactación sobre la abundancia radical se encontraba en la

capa de 0-10 cm. Se percibió una tendencia a mayor abundancia radical en el tratamiento descompactado en los sitios que tuvieron doble cultivo, sugiriendo que el cultivo de invierno sembrado inmediatamente después del maíz pudo aprovechar y estabilizar mejor la residualidad de la práctica de descompactación (Figura 4.13).

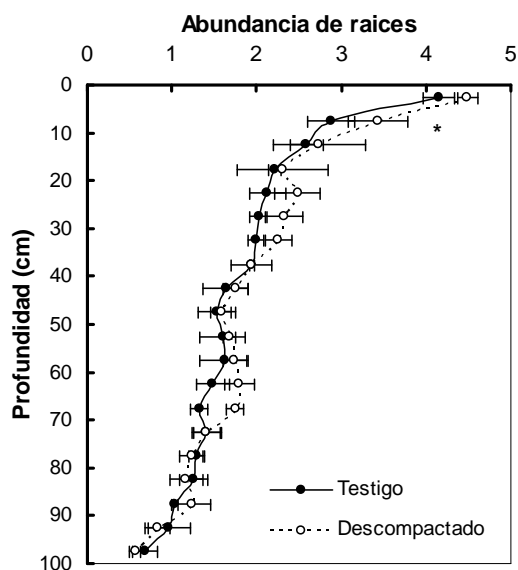


Figura 4.12. Distribución de la abundancia radical de soja promedio de tres sitios correspondientes a la última campaña de maíz evaluada 2007/8. Se indica con asterisco diferencias significativas a $P < 0,05$ en el estrato 5-10 cm aplicando un diseño de t-apareada. Escala de abundancia radical: 0 ausencia de raíces y 5 máxima abundancia.

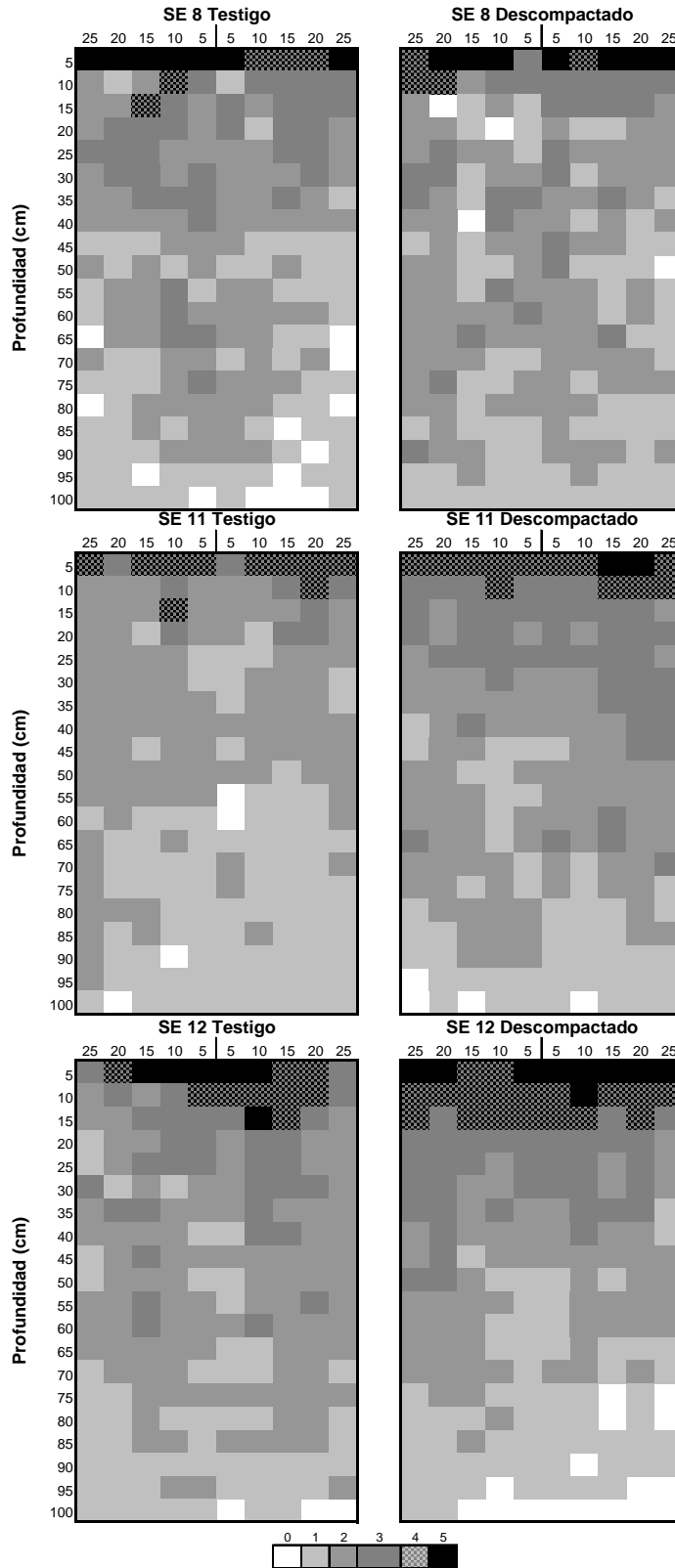


Figura 4.13.

Distribución de la abundancia radical de soja de los tres sitios presentados en la Figura 4.12 para los dos tratamientos evaluados. Se presenta la escala correspondiente a los 5 niveles de abundancia evaluados. SE= sitio experimental. nd: dato no disponible. En el centro se indica la planta y la distancia (cm) en sentido horizontal a partir de ella.

En relación al rendimiento, se realizó el análisis conjunto de los 12 sitios, encontrándose una diferencia estadísticamente significativa ($P < 1\%$); a favor del tratamiento descompactado (Figura 4.14 A y B). El incremento medio fue de 754 (kg ha^{-1}); o expresado en forma relativa 6,2 % (Figura 4.15 A y B). El incremento medio varió entre -328 y 1896 kg ha^{-1} y el relativo entre -2,9 % y 17,9 %. En términos generales, las campañas evaluadas contaron con adecuada disponibilidad de lluvias durante el ciclo, a excepción del 2005, donde las lluvias en el período crítico fueron sustantivamente menores a las precipitaciones históricas (Figura 4.2). Los resultados de la presente tesis encuadran dentro de aquellos antecedentes que hallaron beneficios por parte de la labor de descompactación (Botta et al., 2004; Sadras et al., 2005; Álvarez et al., 2009). La práctica de descompactación suele presentar mayor impacto sobre el rendimiento en condiciones de estrés hídrico moderado, siendo este impacto mínimo o nulo en condiciones de estrés hídrico severo o de alta humedad (Sadras et al., 2005). En este caso, el incremento en el rendimiento de maíz se debió a una mayor disponibilidad hídrica por la mayor infiltración y a una mayor accesibilidad a los recursos (e.g. agua, nutrientes) debido a la menor resistencia a la penetración. Las raíces presentaron mayor abundancia en la capa de 0-10 cm, confirmando una exploración mayor de dicho estrato, aunque su abundancia no copió las grandes diferencias de RP entre tratamientos. Ello puede deberse a que no se produjeron limitantes para el desarrollo radical en los testigos debido a la adecuada humedad edáfica. Sólo un sitio (Sitio 4) presentó una respuesta negativa a la descompactación que cabe destacar. Este ensayo en particular presentaba en evaluaciones intermedias un excelente crecimiento del tratamiento descompactado comparado con el testigo. En V6, el tratamiento descompactado, en dicho sitio, presentaba 2861 kg de MS ha^{-1} mientras que el testigo hasta ese momento

había acumulado 2076 kg de MS ha⁻¹ (P = 0,03). Inclusive alcanzó con 3 días de anticipación la floración, presentando el descompactado una mayor abundancia radical. Sin embargo, en el período crítico de esta campaña se registró un nivel de precipitaciones muy inferior a la media. En consecuencia, el mayor consumo de agua en etapas anteriores a la crítica en el tratamiento descompactado, hizo que llegara con menor reserva hídrica al período crítico impactando desfavorablemente sobre el rendimiento. La situación aquí descrita puede resultar de interés en futuras evaluaciones.

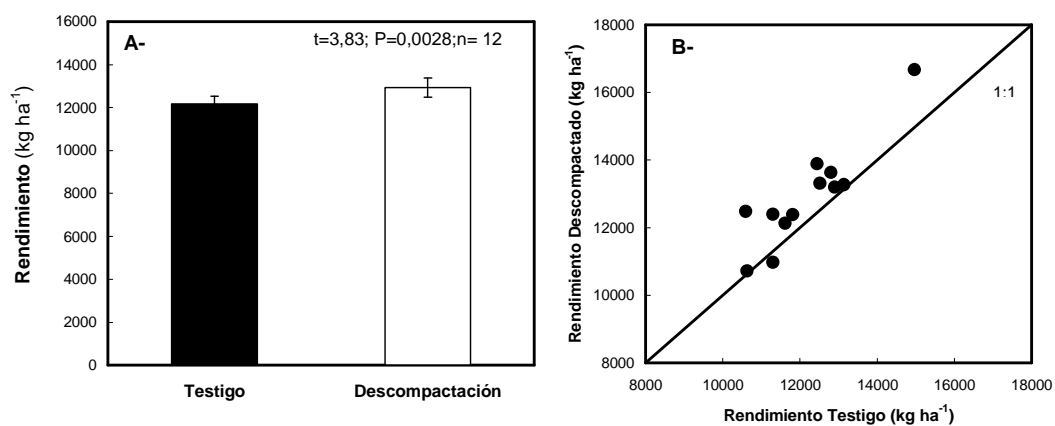


Figura 4.14. A- Rendimiento promedio de los tratamientos para los 12 sitios. Las barras indican el error estándar. B- Rendimientos del tratamiento Testigo vs. rendimiento del tratamiento Descompactado y línea 1:1.

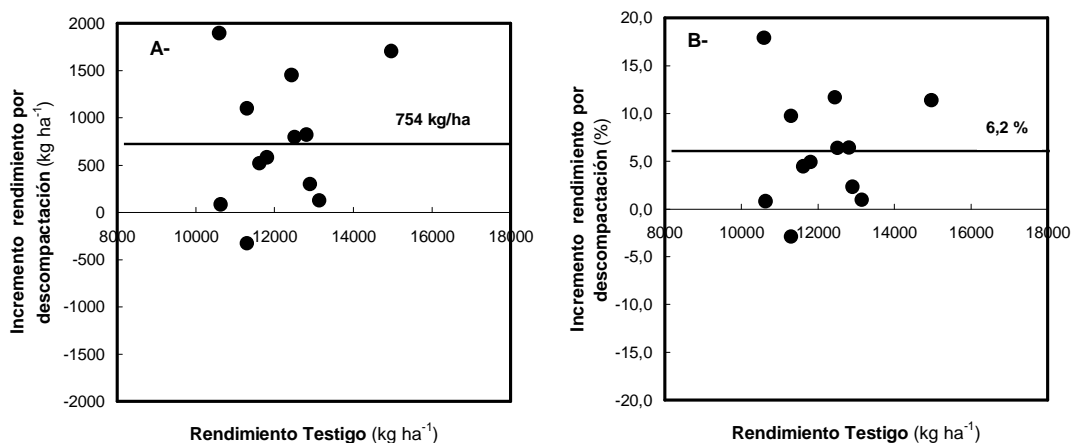


Figura 4. 15. Rendimiento Testigo vs. Incremento del rendimiento. A) expresado en forma absoluta según, Rendimiento Descompactado-Rendimiento Testigo (kg ha^{-1}), y B) en forma relativa rendimiento según, $(\text{Rendimiento Descompactado-Rendimiento Testigo}) * 100/\text{Rendimiento Testigo}$.

En los ensayos con repeticiones se determinaron los componentes del rendimiento del maíz, observándose que los mayores rendimientos de los cultivos estuvieron relacionados con el número de granos más que con el peso de los mismos (Figura 4.16).

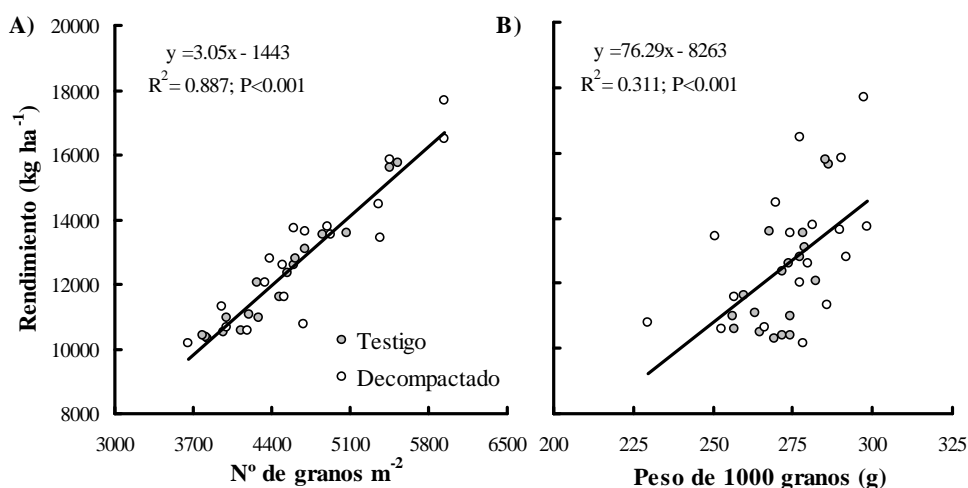


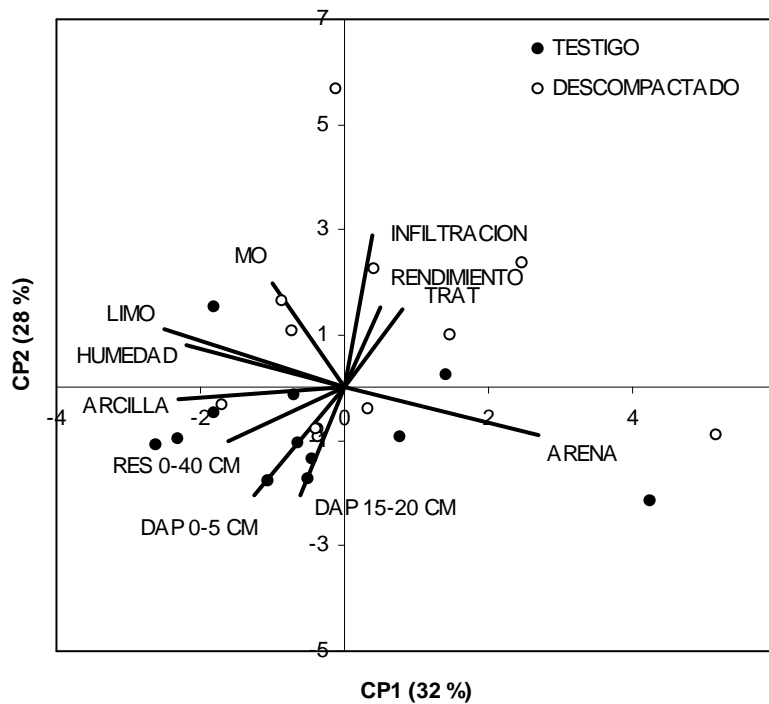
Figura 4.16. Relación entre el rendimiento con A) el número de granos y B) el peso de 1000 granos. Los datos corresponden a las campañas 2004/04 y 2005/06.

En los sitios 8, 11 y 12 se evaluó la residualidad de la práctica de descompactación realizada en el maíz sobre el rendimiento de los cultivos subsiguientes. En dos casos se realizó doble cultivo trigo/soja de segunda, y en el otro soja de primera. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ni sobre el cultivo de trigo ni sobre la soja (Tabla 4.7). Uno de los efectos negativos de una labor de descompactación es dejar al suelo más vulnerable (menor capacidad portante) a la aplicación de nuevos estreses compactantes (Hamza y Anderson, 2005; Botta et al., 2007). El tiempo de recompactación depende del manejo posterior del tránsito (Evans et al., 1996; Botta et al., 2006). Generalmente, la cosecha de los cultivos de verano coincide con condiciones de alta humedad. Por lo tanto, la cosecha de estos cultivos se realiza con baja capacidad portante del suelo. Resulta muy importante la aplicación de prácticas que prevengan la recompactación del suelo o que permitan aumentar la estabilidad luego del pasaje de un descompactador para asegurar la perdurabilidad de la descompactación.

Tabla 4.7. Residualidad de la práctica de descompactación medida sobre los cultivos subsiguientes. Testigo y descompactado en el cultivo de maíz anterior.

Sitio	Rendimiento trigo (kg ha ⁻¹)		Rendimiento soja (kg ha ⁻¹)	
	Testigo	Descompactado	Testigo	Descompactado
8			4826	4923
11	4022	4675	3138	3448
12	5769	6074	4425	4213
P		0,22		0,77

Resumiendo, utilizando el análisis de componentes principales se observa que el primer eje CP1 (32%) separa entre suelos más arenosos (+) contrareestado principalmente por arcilla, limo, humedad y resistencia a la penetración. CP2 (28%) tiene con valor positivo al rendimiento del cultivo, en la misma dirección que la descompactación, la infiltración, y la MO contrareestado por la DAP y la resistencia. O sea, mayores rendimientos están en la dirección o asociados a la descompactación, mayor infiltración y MO y menores DAP y RP. Los dos primeros componentes explican el 60 % de la variación de los datos.



Variables	e1	e2
TRAT	0,13	0,28
MO	-0,19	0,39
ARCILLA	-0,42	-0,05
ARENA	0,49	-0,16
LIMO	-0,46	0,2
RENDIMIENTO	0,10	0,29
INFILTRACION	0,07	0,52
REST	-0,29	-0,18
DAP1	-0,23	-0,38
DAP2	-0,01	-0,39
HUMEDAD	-0,39	0,15

Figura 4.17. Análisis de componentes principales. CP1 y CP2 componentes principales 1 y 2. Variables: ARENA y LIMO: contenido de arena y limo de 0-20 cm, Humedad: hasta 40 cm, RES de 0-40 cm: resistencia a la penetración promedio de 0-40 cm, DAP: densidad aparente de 0-5 y de 15-20 cm, MO: contenido de materia orgánica de 0-20 cm, Infiltración método USDA; Trat: tratamiento: Testigo: 1 y Descompactado: 2. Se presenta la tabla con los eigenvalues de las variables para CP1 y CP2.

4.4 CONSIDERACIONES FINALES

La utilización de labranza descompactadora produjo una disminución de la RP y un aumento de la TI. Asimismo, la abundancia radical aumento en los primeros 10 cm. El incremento de los recursos y del acceso a los mismos, resultó en un incremento promedio del rendimiento del maíz del 6% aún en condiciones de buena disponibilidad hídrica. Ello permite aceptar parcialmente la primera hipótesis planteada.

En relación a la segunda que expresaba *“En las situaciones donde haya respuesta a la práctica, ésta estará relacionada con la densidad aparente (absoluta o relativa) original del lote previo a la descompactación”* no se encontró relación de la respuesta a la práctica de descompactación con la DAP o la RP original del sitio. Más aún, la DAP no resultó una variable sensible a la práctica de descompactación.

Finalmente, la práctica de descompactación mostró residualidad evaluada a través de menor RP previo a al cosecha del maíz. Sin embargo, a la siembra del cultivo de soja siguiente, ya no se observó residualidad de la práctica ni sobre el suelo ni sobre el cultivo. Por esta razón, se acepta la tercera y última hipótesis propuesta que expresaba: *“El impacto positivo de la práctica está restringido al cultivo inmediatamente posterior a la realización de la práctica, y la perdurabilidad de la práctica sobre las propiedades físicas edáficas será mayor en los suelos con mayor contenido de MO”*.

**Capítulo 5.- Funciones de pedotransferencia para estimar la
compactabilidad de los suelos**

5.1 INTRODUCCIÓN

La intensificación de la agricultura y el uso de maquinaria de gran porte han resultado en la compactación de suelos en varias regiones agrícolas del mundo (Gupta y Almaras, 1987; Taboada et al., 1998; Lipiec y Hatano, 2003; Hamza y Anderson, 2005; Álvarez et al., 2009). El pasaje repetido de tractores y otros equipos de peso durante la preparación de la cama de siembra, la siembra, la protección de cultivos y la cosecha condujo a niveles de compactación sin precedentes (Gupta y Allmaras, 1987).

La compactación es mayor cuando se transita con el suelo húmedo y/o se utilizan neumáticos de alta presión en los equipos pesados (Botta et al., 2004; Hamza y Anderson, 2005). La susceptibilidad a la compactación depende de diferentes propiedades intrínsecas del suelo como el COS, la textura y la mineralogía entre otros (Gupta y Allmaras, 1987).

El riesgo de compactación de un suelo puede ser predicho a través del test de compactabilidad de Proctor que se realiza en laboratorio (ASTM, 1982). Este procedimiento estandarizado de ingeniería de suelos determina los cambios de la densidad aparente del suelo en función de su contenido hídrico en respuesta a la aplicación de una energía y procedimiento de compactación estandarizados (Mueller et al., 2003). Los principales parámetros derivados del test de Proctor son la densidad aparente máxima (DMAX), el contenido hídrico crítico (CHC) y la susceptibilidad a la compactación (SUC). En la Figura 5.1 se presenta una curva teórica resultante del Test de Proctor con los parámetros principales.

La DMAX del suelo puede ser utilizada como valor de referencia para estimar la compactación relativa del suelo (Carter, 1990; Beutler et al., 2005). La DMAX se

alcanza a un contenido específico de humedad del suelo llamado CHC. Generalmente, ambos están relacionados con la clase textural del suelo, que resulta de la proporción de arena, arcilla y limo. Sin embargo, el contenido de COS presenta una alta correlación con la DMAX y el CHC en los suelos pampeanos (Díaz Zorita y Grosso, 2000; Aragón et al., 2000). Finalmente, la SC es la pendiente de la rama seca de la curva del Test de Proctor. Se denomina rama seca al sector de la curva correspondiente a los valores de contenido de humedad edáfica inferiores el CHC.

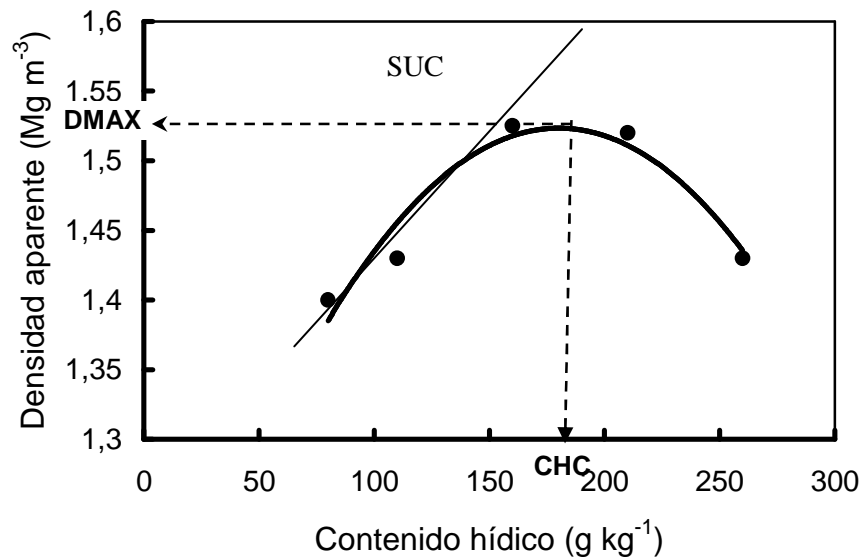


Figura 5.1. Curva teórica de densidad aparente vs. contenido hídrico del suelo obtenida a partir del Test de Proctor. DMAX: densidad aparente máxima alcanzada en el contenido hídrico crítico (CHC). SUC: susceptibilidad a la compactación o pendiente de la rama seca.

La susceptibilidad a la compactación está también determinada por los métodos de labranza, por ejemplo los suelos bajo LC son más susceptibles a la compactación que

aquellos bajo SD (Franzluebbers y Stuedemann, 2008). Este efecto algunas veces se confunde con la estratificación del COS en los suelos bajo SD, que resulta en un mayor contenido de COS superficial y mayor estabilidad estructural que suelos similares bajo LC (Alvarez et al., 2009). A pesar de la amplia difusión de la SD en el mundo (Lal et al., 2007), los modelos de compactabilidad en general no consideran diferentes sistemas de labranza y, más específicamente, SD. La consideración del efecto potencial de la SD en modelos predictivos de la compactabilidad de los suelos, es un factor fundamental, ya que como se enunció en la Introducción más de 100 Mha en el mundo y el 85% de la superficie agrícola argentina son manejadas en SD (Díaz Zorita et al., 2002; Álvarez et al., 2009).

Basados en reportes previos que utilizaron el test de Proctor, se hipotetiza que los suelos bajo SD poseen en superficie menor compactabilidad que los suelos bajo LC. Sin embargo, la realización de los test Proctor insume mucho tiempo y requiere muestrear y transportar varios kilogramos de suelo (alrededor de 30 kg) al laboratorio. Por lo tanto, la posibilidad de estimar los parámetros del test de Proctor (DMAX y CHC) a partir de un conjunto mínimo de análisis de suelo de rutina es una opción viable e interesante para conocer o evaluar la compactabilidad de los suelos sin necesidad de realizar el test. El conocimiento de los parámetros del Test de Proctor y la aplicación de los mismos permitirán al productor o técnico caracterizar el estado de compactación de sus suelos, así como prevenir la misma evitando el tránsito cuando el suelo está en CHC de modo que aporta elementos claros para caracterizar y prevenir la compactación.

Los **objetivos** de este Capítulo son:

1- Elaborar y validar modelos que permitan predecir los parámetros del test de Proctor, DMAX y CHC del suelo, bajo distintos manejos a partir de propiedades edáficas de fácil determinación.

2- Evaluar si existe un efecto del manejo sobre los parámetros del test de Proctor independientemente del contenido de COS.

Hipótesis:

- 1- Los parámetros del test de Proctor pueden ser estimados con buen ajuste a partir de análisis de suelo de rutina.
- 2- Las diferencias en los parámetros de Proctor entre manejos se explican por las diferencias en los contenidos de COS entre los mismos.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Los sitios evaluados en este Capítulo se encuentran distribuidos en toda la Región Pampeana. Esta región abarca un área de alrededor de 60 Mha de suelos derivados de loess, siendo la vegetación original dominante de tipo pastizal (Soriano et al., 1991). La precipitación media anual varía desde 1000 mm en el Este a 600 mm en el Oeste. En el sudoeste, los suelos presentan un horizonte superficial franco arenoso, mientras que en el nordeste los suelos poseen una textura superficial franco-limosa a franco arcillo limosa y un horizonte Bt de fuerte desarrollo (Salazar Lea Plaza y Moscatelli, 1989).

Los datos analizados comprenden datos propios de lotes de producción (62 casos) y otros de trabajos previos publicados de la región (35 casos) (Kruger, 1996; Aragón et al., 2000). Los suelos en su mayoría son Molisoles (Argiudoles Típicos, Abrúpticos y Vérticos; Hapludoles Típicos y Enticos) y en menor proporción Entisoles y Vertisoles. En la Figura 5.2 se presenta la ubicación de los sitios analizados.

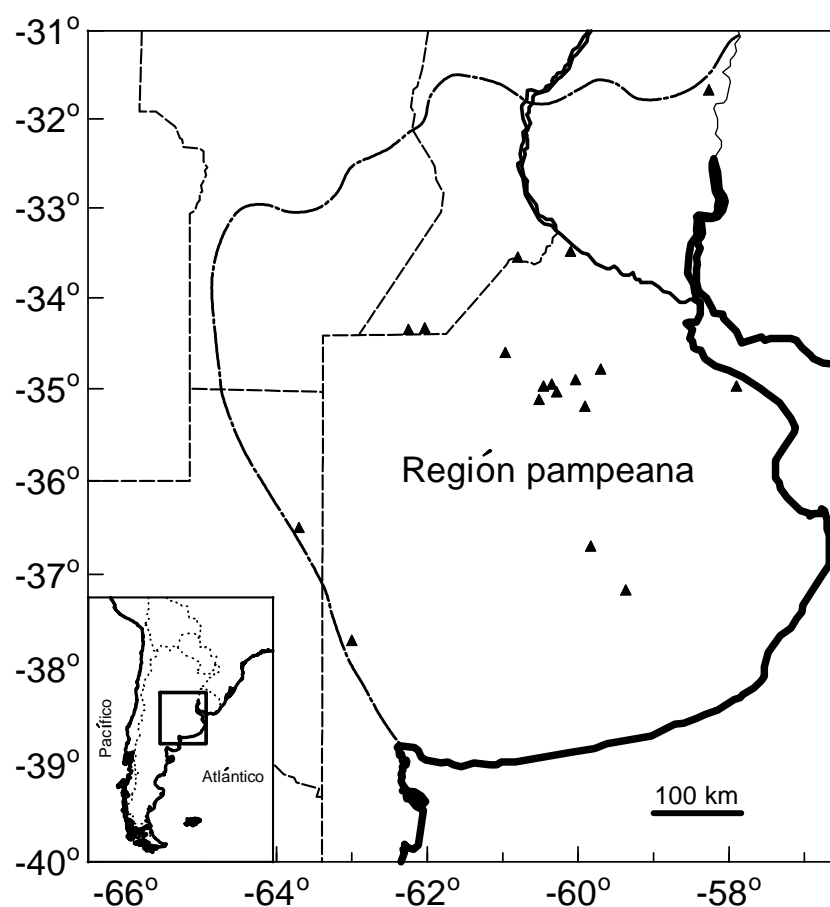


Figura 5.2. Ubicación de las localidades donde se encuentran los sitios evaluados.

Los manejos evaluados incluyen sitios sin cultivar (pasturas, forestaciones y parques de estancia) y sitios con agricultura bajo SD o LC. Los suelos bajo LC son

manejados con disco, cincel o arado de reja y vertedera y luego de la siembra, las malezas son controladas mecánica y/o químicamente. En los sistemas de SD, las malezas son controladas sólo con herbicidas. En cada sitio se determinaron las siguientes propiedades: COS utilizando el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982), y la distribución de tamaño de partícula con el método de la pipeta (Gee y Or, 2002).

La profundidad de muestreo varió entre muestras según el origen de las mismas: 0 – 10 cm o 0 – 20 cm. Adicionalmente, se informó el manejo específico de cada sitio. Las muestras de suelo fueron sometidas a un test de compactación (test de Proctor) en el laboratorio, siguiendo el protocolo de la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (“American Society for Testing Materials”, ASTM, 1982).

Submuestras de aproximadamente 3 kg de suelo seco al aire, luego molido y tamizado, fueron humedecidas para alcanzar un rango de diferentes contenidos hídricos. Cada submuestra humedecida fue compactada en tres etapas o capas en una cámara de compactación (943 cm³). Cada capa o etapa recibió 25 golpes de un martillo (2,5 kg) que cae en forma libre desde una altura de 30,5 cm. A cada una de las submuestras con distintos contenidos de humedad y ya compactadas se les determinó la humedad y la densidad aparente alcanzada (DAP) secando en horno a 105°C hasta humedad constante (aproximadamente 48 horas). La DMAX (Mg m⁻³) y el CHC (g kg⁻¹) se estimaron ajustando una función cuadrática a la relación contenido hídrico de las muestras vs. DAP.

El conjunto total de los datos fue dividido en forma estratificada en dos grupos para formar dos conjuntos de datos independientes: 1- el conjunto de datos de elaboración del modelo o *training set* (n=73) y 2- el conjunto de prueba o *test set* (n=24).

El *training set* fue utilizado para construir distintos modelos predictivos de la DMAX y CHC a partir de propiedades edáficas de fácil determinación o que forman parte de análisis de rutina de los suelos o bien que están disponibles en las cartas de suelo. El *test set* fue utilizado para validar los modelos generados a partir del *training set*. La asociación entre las propiedades del suelo fue evaluada utilizando regresiones simples y múltiples (método Stepwise; Neter y Wasserman, 1974). Adicionalmente, se probó si la incorporación al modelo de regresión múltiple de una variable *dummy* (cualitativa o dicotómica) relacionada con los distintos manejos del suelo mejora el ajuste de los modelos de regresión. En tal sentido, se probaron dos formas de agrupar los manejos: sitios sin cultivar vs. sitios bajo agricultura (LC y SD) y sitios sin laboreo (no cultivados y SD) vs. LC. Se asignó el valor 0 a los no cultivados y a los no laboreados y el valor de 1 a los sitios agrícolas y LC; respectivamente en cada situación. Finalmente, para validar los modelos se evaluó si la regresión lineal entre los valores predichos y los observados presentaban intercepción igual a 0 y pendiente igual a 1.

5.3 RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 5.1 se presentan los valores medios, el rango y el error estándar de las propiedades edáficas utilizadas para desarrollar los modelos, o sea correspondientes al *training set*.

Tabla 5.1. Valores medios, mínimos, máximos y error estándar de las variables del conjunto de datos utilizados para ajustar o generar los modelos (training set). COS: carbono orgánico del suelo; DMAX: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC: contenido de humedad crítico donde se alcanza la densidad máxima. N= 73.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Error estándar
Arcilla (g kg ⁻¹)	256,4	61,0	429,0	10,4
Limo (g kg ⁻¹)	383,6	121,0	679,0	14,8
Arena (g kg ⁻¹)	360,0	73	773	18,4
COS (g kg ⁻¹)	23,12	5,73	61,28	1,17
DMAX (Mg m ⁻³)	1,452	1,140	1,760	0,012
CHC (g kg ⁻¹)	251,6	150,0	431,0	5,97

Se observa un amplio rango de variación entre los valores mínimos y máximos de las distintas propiedades, siendo 5,6 a 10 veces mayores los valores máximos respecto de los mínimos. El contenido de arcillas varió entre 61 y 429 g kg⁻¹, el de arena entre 73 y 773 g kg⁻¹, y el COS de 5,73 a 61.28 g kg⁻¹. El *training set* comprendió 14 situaciones no cultivadas, 21 en LC y 38 bajo SD.

Los valores de DMAX también mostraron un amplio rango de variación (1,14 a 1,76 Mg m⁻³), y un patrón similar presentaron los valores de CHC (150 a 431 g kg⁻¹).

Se encontró una relación negativa entre DMAX y CHC:

$$\text{CHC (g kg}^{-1}\text{)} = 845 - 409 \text{ DMAX (Mg m}^{-3}\text{)}; R^2 = 0,717, P < 0,0001, n = 73$$

Donde,

DMAX representa la densidad aparente máxima obtenida a partir del Test de Proctor y CHC es el contenido hídrico crítico donde se alcanza la DMAX.

Se ajustaron diferentes modelos para predecir los parámetros del Test de Proctor (Tabla 5.2). Para la DMAX, el modelo más simple incluye al COS como variable predictiva. El contenido de COS explica aproximadamente la mitad de la variación de la DMAX de los suelos ($R^2 = 0,501$). El ajuste (R^2) aumenta un 15,8% con la incorporación del contenido de arena como segunda variable independiente en el modelo de regresión múltiple. Un modelo más complejo fue obtenido con la incorporación de una variable *dummy* como tercer variable independiente. Esta variable *dummy* distingue entre las situaciones sin laboreo (suelos no cultivados y SD; valor de la variable *dummy*= 0) y los suelos labreados (LC, valor de la variable *dummy*= 1). Esta regresión múltiple con tres variables explica alrededor del 70 % de la variación de DMAX ($R^2 = 0,711$). Las mismas variables independientes fueron incluidas para predecir el CHC, pero con signos opuestos. Sin embargo, se obtuvieron menores ajustes para el CHC, lográndose una explicación de la mitad de variación del mismo ($R^2 = 0,561$) con el modelo de regresión múltiple que incluye tres variable independientes.

Tabla 5.2. Modelos obtenidos a partir del training set (Tabla 5.1). COS: carbono orgánico del suelo; DMAX: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC: contenido de humedad crítico donde se alcanza la DMAX. A: contenido de arena (g kg^{-1}); M: manejo del suelo, Pastura, parques, monte y siembra directa= 0 y 1 para suelos laboreados. N= 73. CME: cuadrado medio del error.

	Modelos	R²	CME	P
Dmáx (Mg m^{-3})	=1.6246-0,00748 COS (g kg^{-1})	0,501	0,0056	P<0,001
	=1.50343-0,00649 COS (g kg^{-1})+0,0000273 A (g kg^{-1})	0,659	0,0039	P<0,001
	=1.4756-0,00599 COS (g kg^{-1})+0,0000275 A (g kg^{-1})+0,0539 M	0,711	0,0034	P<0,001
CHC (g kg^{-1})	=171+3,483 COS (g kg^{-1})	0,465	1413	P<0,001
	=208+3,176 COS (g kg^{-1})-0,08441 A (g kg^{-1})	0,530	1260	P<0,001
	=240+2,776 COS (g kg^{-1})-0,09166 A (g kg^{-1})-24,8 M	0,561	1193	P<0,001

En la Tabla 5.3 se presenta los valores medios, el rango y el error estándar de las propiedades del suelo correspondientes al conjunto de datos utilizado para la validación (*test set*) de los modelos presentados en la Tabla 5.4. El *test set* estuvo conformado por 24 casos: 2 correspondientes a sitios sin cultivar, 6 a suelos manejados con LC y 16 son sitios bajo SD.

Tabla 5.3. Valores medios, mínimos, máximos y error estándar de las variables del test set. COS: carbono orgánico total; Dmáx: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC: contenido de humedad crítico donde se alcanza la densidad máxima. N= 24.

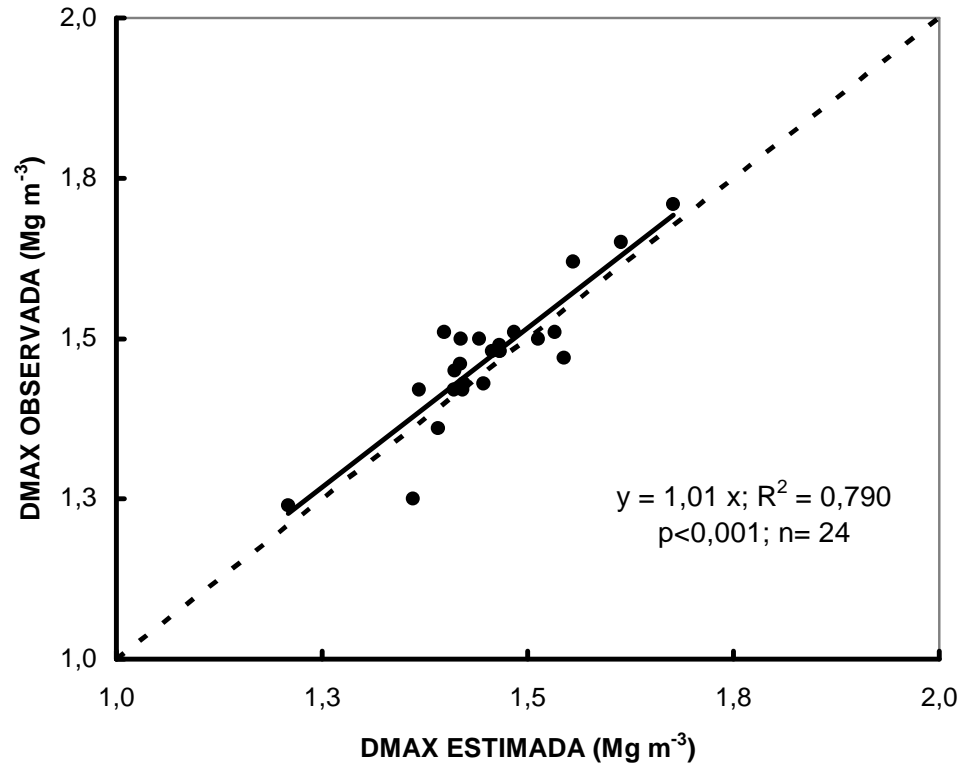
Variable	Media	Mínimo	Máximo	Error estándar
Arcilla (g kg ⁻¹)	263,6	61,0	407,0	15,7
Limo (g kg ⁻¹)	360,9	166,0	520,0	20,0
Arena (g kg ⁻¹)	375,4	250,0	773,0	26,4
COS (g kg ⁻¹)	23,17	9,09	57,09	2,03
DMAX (Mg m ⁻³)	1,47	1,24	1,71	0,02
CHC (g kg ⁻¹)	242,8	150,0	340,0	8,51

El ajuste entre los valores estimados de DMAX y CHC y los observados para todos los modelos se presentan en la Tabla 5.4. El modelo lineal ajustado en todos los casos presentó valores de ordenada al origen que no difirieron de 0 y las pendientes no difirieron de 1. Los ajustes logrados en el *test set* presentaron aún R² aún mayores y cuadrado medio del error menores que los del *training set* (Tabla 5.2 y 5.4).

Tabla 5.4. Validación de los modelos con el *test set*. DMAX: densidad aparente máxima según Test de Proctor; CHC: contenido de humedad crítico donde se alcanza la DMAX. CME: cuadrado medio del error.

DMAX			
Modelo	R²	CME	P
Una variable	0,635	0,0039	P<0,0001
Dos variables	0,764	0,002	P<0,0001
Tres variables	0,790	0,002	P<0,0001
CHC			
Modelo	R²	CME	P
Una variable	0,552	778	P<0,0001
Dos variables	0,712	500	P<0,0001
Tres variables	0,664	971	P<0,0001

Estos resultados indican que los modelos propuestos predicen razonablemente bien los parámetros del test de Proctor en los suelos pampeanos. El mejor modelo predictivo para DMAX fue el que incluyó las tres variables (Figura 5.3). Mientras que en el caso del CHC, se descartó el modelo que incluía la variable *dummy* de manejo teniendo en cuenta el R² y cuadrado medio del error (Figura 5.4). El modelo que mejor predijo las variaciones del CHC fue el que incluyó el COS y el contenido de arena.



$$\text{DMAX ESTIMADA} = 1,4756 - 0,00599 \text{ COS (g kg}^{-1}\text{)} + 0,0000275 \text{ A (g kg}^{-1}\text{)} + 0,0539 \text{ M}$$

Figura 5.3. Relación entre densidad aparente máxima estimada por el modelo (DMAX ESTIMADA) y la densidad aparente máxima observada o medida (DMAX OBSERVADA). COS: carbono orgánico del suelo; A: contenido de arena (g kg^{-1}); M: manejo del suelo, Pastura, parques, monte y siembra directa= 0 y 1 para suelos labreados. N= 24.

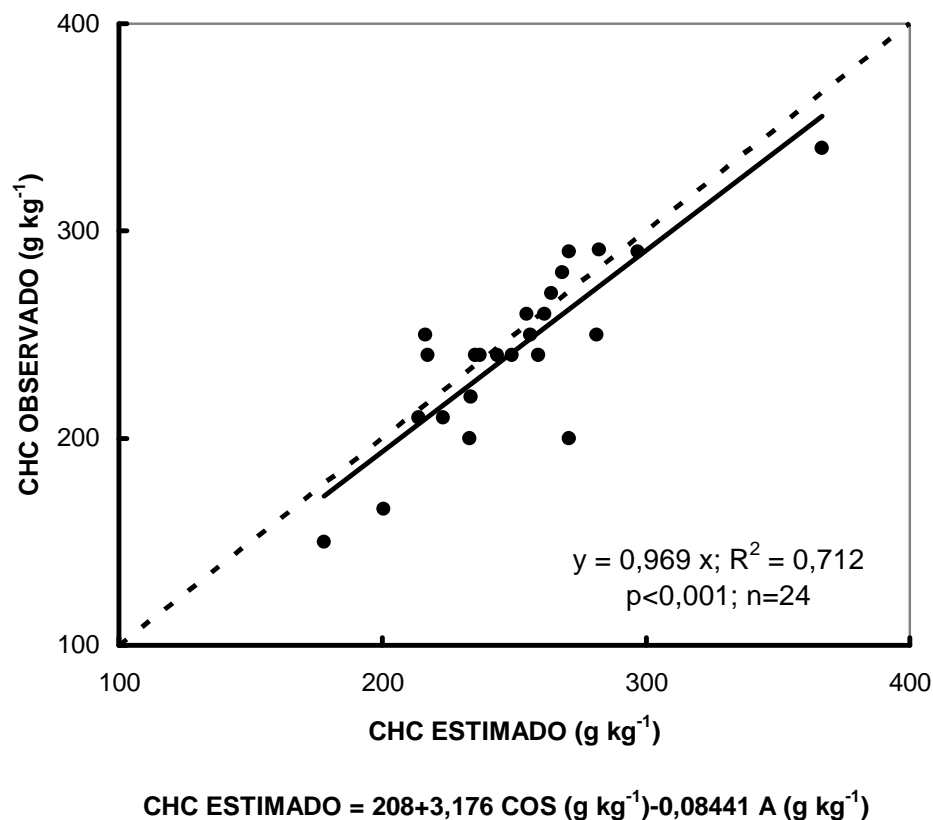


Figura 5.4. Relación entre contenido hídrico crítico estimado por el modelo (CHC ESTIMADO) y el contenido hídrico crítico observado o medido (CHC OBSERVADO). COS: carbono orgánico del suelo; A: contenido de arena (g kg⁻¹). N= 24.

Los suelos de la región Pampeana presentan una amplia variación textural en el horizonte superficial. Esto es consecuencia de la distribución original de los sedimentos o material original, que cambian gradualmente de textura gruesa a fina de sudoeste a nordeste de la región (Díaz Zorita et al., 2002; Álvarez et al., 2009). Los sitios evaluados en este capítulo pueden considerarse como representativos de las clases texturales presentes en esta región (Tabla 5.1 y 5.3). El COS fue la variable independiente que mejor predijo los cambios de DMAX en los modelos de regresión

lineal ajustados utilizando el *training set* (Tabla 5.2), y posteriormente validado con el conjunto de prueba o *test set* (Tabla 5.4). Estos resultados coinciden con trabajos previos en la región pampeana (Quiroga et al., 1999; Aragón et al., 2000; Diaz Zorita y Grosso, 2000), así como de otras regiones del mundo (Thomas et al., 1996; Wagner et al., 1994; Braida et al., 2006). El COS actúa como un amortiguador, resultando en la disipación de parte de la energía aplicada en el test de Proctor o el tránsito llevado a una condición de producción. También contribuye en procesos tales como, unión entre las partículas y entre agregados, pegado, fricción y dilución (Soane, 1990; Braida et al., 2006). Estas son las principales razones que explican la reducción de la DMAX con el aumento del COS. La magnitud de la reducción de la DMAX por unidad de aumento de la COS (g kg^{-1}) fue de $0,00748 \text{ Mg m}^{-3}$ para el *training set*. Este resultado es similar a lo observado por Quiroga et al. (1999) y un 50% menor que lo encontrado por Thomas et al. (1996) y Wagner et al. (1994). Esto sugiere que el impacto del COS sobre la compactación presenta variaciones entre regiones. Estas diferencias son consecuencia de otras propiedades edáficas (Aragón et al., 2000; Braida et al., 2006) o del manejo (Quiroga et al., 1999). En este sentido, en este análisis se observó que la textura del suelo es la segunda variable independiente que contribuye a mejorar la explicación de las variaciones de DMAX. Estos resultados también coinciden con los obtenidos por Aragón et al. (2000) y Diaz Zorita y Grosso (2000). Sin embargo, en este caso la fracción arena es la que mejor describe la variación tanto de DMAX como de CHC. Estudios anteriores hallaron al contenido de limo (Aragón et al., 2000; Pecorari et al., 1993), o limo o arena indistintamente (Díaz Zorita y Grosso, 2000) como mejores estimadores para los suelos de la región. En suelos de África, Nhamumbo y Cambule

(2006) encontraron que la variación de DMAX estaba altamente asociada con los cambios en el contenido de arcilla o limo más arcilla.

La inclusión de una variable *dummy* que considera el manejo permitió generar un modelo predictivo más robusto. Esto indica que ante la aplicación de la misma cantidad de energía del test de Proctor, los sitios bajo LC alcanzan mayor DMAX que los sitios no cultivados o bajo SD, más allá del contenido de COS o de arena. Esto puede deberse a la mayor inestabilidad estructural de los suelos bajo LC. Como fue presentado en el Capítulo 2, los suelos bajo LC presentan una inestabilidad estructural 62% mayor que los sitios no cultivados o bajo SD (Alvarez et al., 2009). La inestabilidad estructural es una de las variables de suelo más sensible a los cambios de manejo. Generalmente, se observan mínimas diferencias en el COS entre SD y LC, junto con amplias variaciones en la inestabilidad estructural (Alvarez y Steinbach, 2009; Alvarez et al., 2009). La mayor estabilidad del suelo permite que el suelo resista mejor la energía de compresión resultando en menores valores de DMAX (Dexter, 1975).

La DMAX es utilizada como densidad de referencia para calcular la compactación relativa del suelo (CR; $CR = (DAP_{actual} / DMAX) * 100$). Carter (1990) y Beutler et al. (2005) calcularon para suelos laboreados (LC) la relación entre la CR y el rendimiento potencial de los cultivos. Encontraron que el rendimiento óptimo se lograba en el rango de CR entre 75 y 83 %. A su vez, si el valor de CR excedía 90% se observaba un decrecimiento del rendimiento. En la región pampeana los valores informados de CR varían entre 60 y 83 % para diferentes sistemas de labranzas (Micucci y Taboada, 2006). Sin embargo, considerando que los valores de DMAX en los suelos sin cultivar o bajo SD son menores, los valores de CR pueden sobrepasar los

límites sobreestimando las pérdidas de rendimiento. En este sentido, Reichert et al. (2009) propone límites de CR mayores para suelos bajo SD. Es necesario en el futuro, realizar investigaciones con el objetivo de obtener valores óptimos de CR para suelos bajo LC y SD, considerando que más de la mitad de la superficie cultivada de la región se maneja en SD continua (Díaz Zorita et al., 2002; Álvarez et al., 2009).

La DMAX del suelo está negativamente relacionada con el CHC (Quiroga et al., 1999; Aragón et al., 2000), lo que explica que la predicción de ambos parámetros estén dados por las mismas variables: COT y contenido de arena (Tablas 5.2 y 5.4). Aragón et al. (2000) determinaron que los valores de CHC están cerca de saturación (74 - 97%) siendo mayores en los suelos finos o con altos contenidos de COS. Mueller et al. (2003) encontraron que el CHC es el valor máximo de contenido hídrico del suelo para un óptimo trabajo, tanto para suelos cohesivos como no cohesivos. Consecuentemente, el CHC del suelo es un importante parámetro para determinar el grado de traficabilidad, ya que el riesgo de compactación es mayor a medida que el contenido hídrico del suelo se acerca al CHC (Gupta y Allmaras, 1987).

Los modelos obtenidos en el presente Capítulo permiten predecir satisfactoriamente los parámetros del Test de Proctor (DMAX y CHC) para Molisoles, Entisoles y Vertisoles bajo distintos manejos. Las estimaciones se realizan a partir de análisis de suelo de rutina o presentes en la carta de suelo (textura), como COT y contenido de arena. Una mejor estimación de la DMAX se puede realizar si se incluye una variable *dummy* acorde con el manejo del suelo. Los sitios LC alcanzan mayores valores de DMAX que los sitios no cultivados o bajo SD, con contenidos similares de COS y arena.

5.4 CONSIDERACIONES FINALES

Los parámetros del test de Proctor pueden ser estimados con buen ajuste a partir de análisis de suelo de rutina como contenido de arena y COS. Sin embargo, se logra una mejor estimación incorporando una variable asociada al manejo, más allá de posibles diferencias en el COS. Los suelos bajo laboreo alcanzan mayor DMAX que las pastura, parques, montes y sitios bajo SD para un mismo valor de COS. Esto puede deberse a una mayor estabilidad estructural, que hace que frente a la imposición de una fuerza estandarizada se alcancen menores valores de DMAX. En relación a las hipótesis planteadas se acepta la primera: “Los parámetros del test de Proctor pueden ser estimados con buen ajuste a partir de análisis de suelo de rutina” y se rechaza la segunda: “Las diferencias en los parámetros de Proctor entre manejos se explican por las diferencias en los contenidos de COS entre los mismos”.

Capítulo 6.- Discusión y conclusiones generales

Argentina es el segundo país del mundo con mayor superficie en SD (Derpsch, 2011). Ello genera un escenario estratégico para el estudio y evaluación del efecto de este sistema de manejo sobre la evolución de la calidad de los suelos, detectando potenciales problemáticas. Los conocimientos emergentes de esta tesis resultan de gran interés tanto a nivel mundial como local, donde prácticamente toda la producción de cultivos de granos se realiza con este sistema. En el Capítulo 2 de la presente tesis se evaluó el estado de la calidad de los suelos, propiedades físicas y componentes orgánicos, bajo distintos manejos. Esta evaluación permitió realizar un diagnóstico, con especial atención en la evolución de la calidad física en los suelos bajo planteos de SD y ahondar en su estudio (Capítulo 3) y alternativas de manejo (Capítulo 4 y 5). El diagrama del racional de la tesis se presenta esquemáticamente en la Figura 6.1 y será la base para el desarrollo de este Capítulo de discusión y conclusiones generales.

Esta discusión fue subdividida en dos etapas, de diagnóstico (a) y de remediación (b) de problemas.

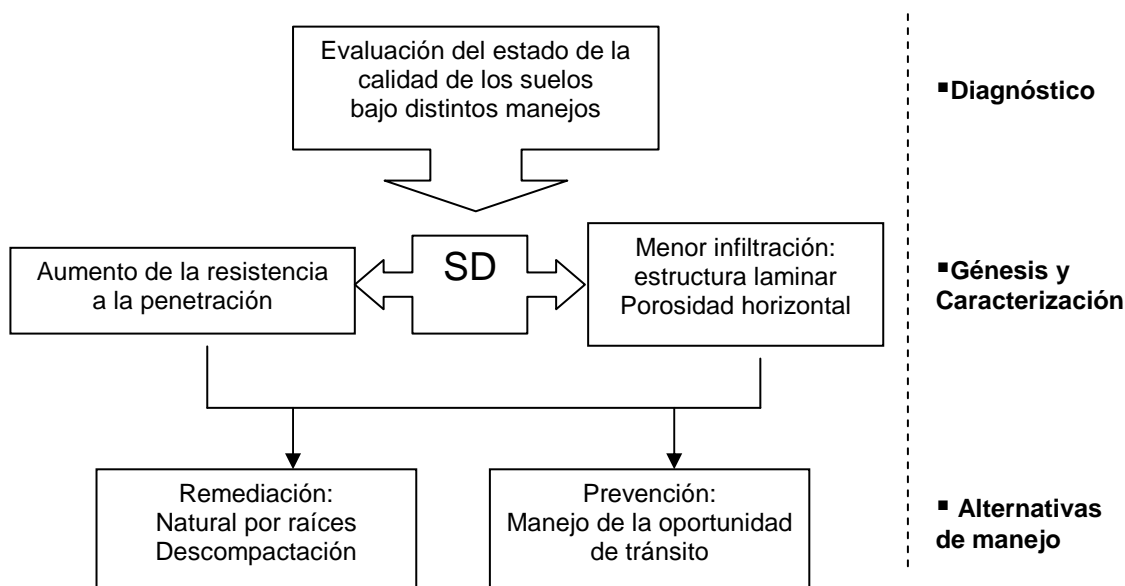


Figura 6.1. Cursograma del racional de la tesis.

a) Diagnóstico de problemas

La calidad de los suelos de referencia o cuasi-prístinos se diferenció marcadamente de los sitios agrícolas, fundamentalmente por un mayor componente orgánico, especialmente la fracción lábil (COP) y menores DAP, CR e IE. Por el contrario, los sistemas con agricultura sólo se diferenciaron por sus IE y RP, que fueron respectivamente menores y mayores en suelos manejados con SD (Figura 2.7). Alvarez y Steinbach (2009) realizaron un metanálisis encontrando que las propiedades que presentaron mayor diferencia entre SD y labranza limitada (cincel y reducida) fueron la RP y la IE. En esta revisión la DAP se diferenció en sólo un 4% comparando SD con arado de reja y vertedera, y una menor diferencia con labranza reducida. Asimismo, Steinbach y Alvarez (2006) hallaron que en los ensayos de larga duración las diferencias en el componente orgánico del suelo a masa equivalente fueron del orden del 5%. Si bien a escala de lote de producción las posibles variaciones de DAP o de COS pueden ser enmascaradas por otras variables como historia del lote, mínimas

variaciones de la rotación o fertilización, lo observado a escala regional en la presente Tesis se correspondió en forma bastante ajustada con los datos emergentes de los ensayos de larga duración, llevados a cabo a lo largo de toda la región pampeana (Steinbach y Álvarez, 2006; Álvarez y Steinbach, 2009). Se observó en los suelos manejados con SD una marcada estratificación de COP y CPM, alcanzando valores similares a las referencias de otros sitios (Franzluebbers, 2002). Franzluebbers (2002) concluye que las elevadas relaciones de estratificación en SD generan efectos favorables en las propiedades físicas y que sería un indicador de un mayor secuestro de COS en el suelo.

En la presente Tesis se observó que los suelos manejados con SD presentaron mayor RP, la que sin embargo no estuvo asociada a mayor DAP. Esta falta de relación indica que no hubo cambios en el volumen total de poros, lo cual permite descartar la ocurrencia de clásicos procesos de compactación, como fue hallado en muchos otros suelos manejados con SD (Lipiec et al., 2005; Alvarez y Steinbach). El aumento de RP debe ser entonces atribuido a un proceso de endurecimiento o “*hardening*”, ya descrito en otros suelos pampeanos manejados con SD (Taboada et al., 1998; Micucci y Taboada, 2006).

Uno de los hallazgos más relevantes de esta Tesis fueron los efectos interactivos de la textura de los suelos y el manejo sobre la TI. Esto significa que pueden esperarse mejoras en TI en los suelos francos bajo SD, pero no así en los suelos franco limosos y franco arcillo limosos. Estas menores TI en los suelos limosos manejados con SD estuvieron asociadas con la presencia de estructuras laminares en los primeros centímetros de los suelos. Por cierto, no es ésta la primera vez que se informan problemas de fertilidad física en suelos manejados con SD (Voorhees, y Lindstrom,

1984; Pierce et al. 1994), pero no cabe duda que los presentes resultados se alejan del escenario más frecuente que es la observación de mejoras físicas en suelos manejados con SD. Varios autores hallaron aumentos de TI por SD, los cuales fueron atribuidos a la formación de bioporos estables, lo cual comienza a ser hallado a partir de 5 años de implementación de SD (Voorhees y Lindstrom, 1984; Rhoton, 2000; Hubert et al., 2007).

Los deterioros físicos aquí hallados van en similar dirección que otros trabajos de años recientes (Sasal et al., 2006; Strudley et al., 2008; Morris et al., 2010). En ellos se halló que a pesar que la estabilidad estructural suele ser mayor en SD, no necesariamente ello da lugar a la formación de mayor macroporosidad y, correspondientemente, mayor TI (Taboada et al., 1998; Micucci y Taboada, 2006; Sasal et al., 2006; Taboada et al., 2008). En un ensayo de 18 años de duración, Lipiec et al. (2005) observaron tasas de infiltración 64% menores en SD que en LC. Ello era consecuencia de la mayor proporción de macroporos en LC. Sasal et al. (2006) compararon la tasa de infiltración de suelos laboreados y manejados con SD en tres ensayos de larga duración localizados en el EEA INTA Pergamino. En dos de ellos, la infiltración fue 25% mayor en los suelos laboreados, mientras que en el tercer ensayo los tratamientos de labranzas no se diferenciaron entre sí. Las diferencias se debieron a la escasa presencia de macroporos orientados verticalmente en los suelos manejados con SD. En su revisión de ensayos de larga duración, Alvarez y Steinbach (2009) notaron que el comportamiento de la TI en los sistemas de labranza dependía de su valor o magnitud. En los suelos con bajas TI (limosos y arcillosos) la SD no sacaba ventajas, mientras que en aquellos con TIs más altas (arenosos), la infiltración fue siempre mayor en SD que en suelos laboreados.

Contrariamente a lo afirmado por Franzluebbers (2002), las elevadas relaciones de estratificación de materia orgánica en SD no generaron efectos favorables sobre la infiltración de los suelos limosos estudiados. Sólo, la IE copió dicha tendencia favorable, pero no lo hicieron ni la TI, ni el COS 0-30 cm, ni la RP. De ello se concluye que no se debe generalizar la evolución favorable de estas propiedades a partir de una adecuada relación de estratificación. De la evolución positiva del COP en suelos manejados con SD, se deduce la evolución también favorable de la DAP y la IE. Ello permite sintetizar el número de variables para caracterizar la evolución de la calidad del suelo o de su salud.

Profundizando en la génesis y caracterización de la estructura laminar, se encontró que la misma está extendida por la región y, a su vez, sumamente generalizada espacialmente en los suelos evaluados. Esta abundancia fue atribuida a que, en ausencia de laboreo, colapsan los macroporos creados previamente en forma mecánica. Se produce así el asentamiento y reconsolidación del suelo, conformando una estructura planar con clara dominancia de porosidad horizontal (Kay et al. 1985; Shipalo y Protz 1987; VandenBygaard et al. 1999b). Estos autores sugieren que la formación abiótica de estos agregados está relacionada con los ciclos congelamiento-descongelamiento, propio de los sistemas productivos donde trabajaron. Estos ciclos terminarían consolidando este tipo de estructura laminar, debido a las lenguas de hielo que se forman dentro de estos poros. En las condiciones ambientales de la Pampa Ondulada, carentes de ciclos de congelamiento-descongelamiento, el proceso puede ser atribuido a la formación de grietas durante la alternancia de ciclos de humedecimiento- secado, que conducen a la expansión volumétrica del suelo (Dexter, 1988; Oades, 1993). A pesar de no contar con arcillas francamente expansibles, pues la illita es la especie dominante en

los suelos pampeanos (Pecorari et al. 1998; Cosentino y Pecorari, 2002; Taboada et al. 2008), se estableció que los suelos limosos pampeanos poseen aún así cierta capacidad de dilatación durante los ciclos de humedecimiento-secado (Barbosa et al., 1999; Cosentino y Pecorari, 2002; Taboada et al., 2004; 2008). Para arrojar luz sobre los factores causantes de este comportamiento levemente expansible, se analizó el desarrollo de “hinchamiento diferencial” por rápido humedecimiento, según lo describe Dexter (1988). Este mecanismo se basa en la generación de estreses de tensión por el contacto entre el agua (potencial mátrico 0) y capas superficiales de suelo muy seco (potenciales mátricos muy negativos). Como resultado, se generan presiones de aire atrapado en los poros, que dan lugar a la formación de grietas orientadas en forma paralela al frente de humedecimiento. Los resultados de esta tesis no permitan avanzar en esta hipótesis, pero ello bien puede ser objeto de futuros experimentos que la confirmen. Es interesante notar que en forma coetánea a la presente Tesis, se llevó a cabo la Tesis de la Ing. Agr. María Carolina Sasal, en la cual se proponía el estudio detallado de esta idea. Se sugiere que una futura interpretación conjunta de los resultados emergentes de ambas tesis puede resultar en una comprensión completa de esta problemática.

La mayor presencia de estructura laminar y de mayor espesor en las cabeceras de los lotes independientemente del cultivo antecesor, lleva a considerar al tránsito como un factor adicional que favorece el desarrollo y persistencia de este tipo estructural. Slowinska-Jurkiewiczy y Domzal (1991) y Paglai et al. (2003) observan la conformación de este tipo estructural en imágenes micromorfológicas como consecuencia del tránsito reiterado. Por otro lado, Horn et al. (2003) con sensores midió el desplazamiento horizontal del suelo en la capa superficial resultante del rodado y que

resulta en estructura de tipo laminar. La asociación de grupos de investigación de física de suelos con los de tránsito de maquinaria, permitiría estudiar en detalle la evolución estructural y mecanismos de resiliencia ante el tránsito en suelos manejados con SD donde la información es escasa. Soracco et al. (2010) evaluaron el efecto de este diseño de poros sobre la conductividad e infiltración, mostrando que ambas propiedades adquieren mayor valor cuando las muestras de suelo en laboratorio son orientadas en forma perpendicular a la disposición original en el terreno. En la presente tesis, cuanto mayor fue el espesor o desarrollo de la capa con estructura laminar menor fue la infiltración ($r = -0,3373$; $P < 0,05$) y mayor la resistencia al corte ($r = 0,2969$; $P < 0,05$). Por lo tanto, se pone en evidencia el efecto negativo de este tipo estructural sobre la dinámica de ingreso de agua al suelo como fue observado en el Capítulo 2.

b) Remediación de problemas

i) Acciones bióticas por las raíces:

Los resultados presentados en el Capítulo 3 muestran que la presencia de raíces en forma continua durante todo el año en el cultivo trigo/soja de II aumentó la proporción de agregación granular. Ello resalta, la importancia del “*binding*” o enredado por raíces en suelos limosos con arcillas poco expansibles como mecanismo de agregación (Degens, 1997). Esto fue confirmado en el censo estructural realizado en una pastura del mismo establecimiento, en el tercer año a partir de su implantación. Independientemente de la cabecera o centro, se observó agregación granular producto del enredado de las raíces. Sin embargo, este tipo de mecanismo de agregación tiene carácter temporal (Tisdall y Oades, 1982; Oades, 1984; Dexter, 1988), por lo que se sugiere como práctica agronómica maximizar la presencia de raíces vivas en estos

sistemas productivos. Una alternativa muy valiosa es la incorporación de cultivos de cobertura que cumplan con esta función y a su vez, al no ser cosechados el tránsito es menor que en el caso del doble cultivo productivo. Se ha demostrado que los cultivos de cobertura reducen la compactación del suelo (Williams y Weil, 2004) e incrementan la macroporosidad (Obi, 1999; Villamil et al., 2006; Restovich et al., 2010), facilitando la infiltración y la aereación del suelo. Además, si las raíces de los cultivos de cobertura son capaces de atravesar capas compactas, podrían constituir una alternativa de corto plazo para regenerar la estructura, sin necesidad de recurrir a la remoción del suelo (Williams & Weil 2004, Álvarez et al. 2010, Chen & Weil 2010). Sería de interés evaluar su acción sobre la orientación de los poros en superficie, buscando aquellos cultivos que favorezcan la reversión de la estructura laminar. La importancia de la raíz viva como mecanismo biótico de agregación fue evaluado por Taboada et al. (2004) donde la agregación y estabilidad estructural se lograban combinando ciclos de humedecimiento – secado con la presencia de raíces (raigrás).

ii) Remoción mecánica de estructuras desfavorables:

En el Capítulo 4 se explora los efectos de la remoción mecánica de estructuras desfavorables a partir del pasaje de descompactadores (*para till, para plow, cultivie*). El cultivo seleccionado fue maíz, pues debido a su estrecho periodo crítico de determinación del rendimiento, es el que evidencia con mayor intensidad el efecto de las compactaciones subsuperficiales (Sadras y Calviño, 2001). En la Figura 6.2 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos. Se observó una mejora de la TI con disminución de la RP, lo cual resulta en mayor agua disponible y exploración radical en los primeros centímetros. Aún en escenarios de buena disponibilidad hídrica (precipitaciones durante el ciclo) y con fertilización, se obtuvo un incremento del 6% en

promedio del rendimiento del maíz. La menor RP persistió –mínimamente- hasta la cosecha del maíz. Este alivio de dureza, sumado a las altas precipitaciones de marzo, características de la región, resulta en una baja capacidad portante del suelo. La residualidad de la práctica no trascendió al cultivo de maíz en las condiciones evaluadas. Sin embargo, cuando se realizó doble cultivo trigo/soja de II se observó una mayor persistencia de la disminución de la RP, reforzando la idea de la importancia del “*binding*” en la construcción de estructura en estos suelos.

En esta tesis no se pudo establecer una relación entre el aumento del rendimiento por la descompactación con las variables edáficas. Por lo cual, se propone seguir explorando con nuevos experimentos o realizar un meta-análisis a partir de publicaciones locales, a fin de lograr un número de casos que permita arribar a un método de diagnóstico para recomendar o no la práctica de descompactación. También surge la importancia de practicar una estrategia preventiva de la recompactación luego del pasaje del implemento, para extender la residualidad de la práctica. Entre ellos, cabe mencionar evitar el tránsito con baja capacidad portante del suelo (Capítulo 5), el control de tránsito (Botta et al., 2007) y la consolidación de estructura a partir del “*binding*”.

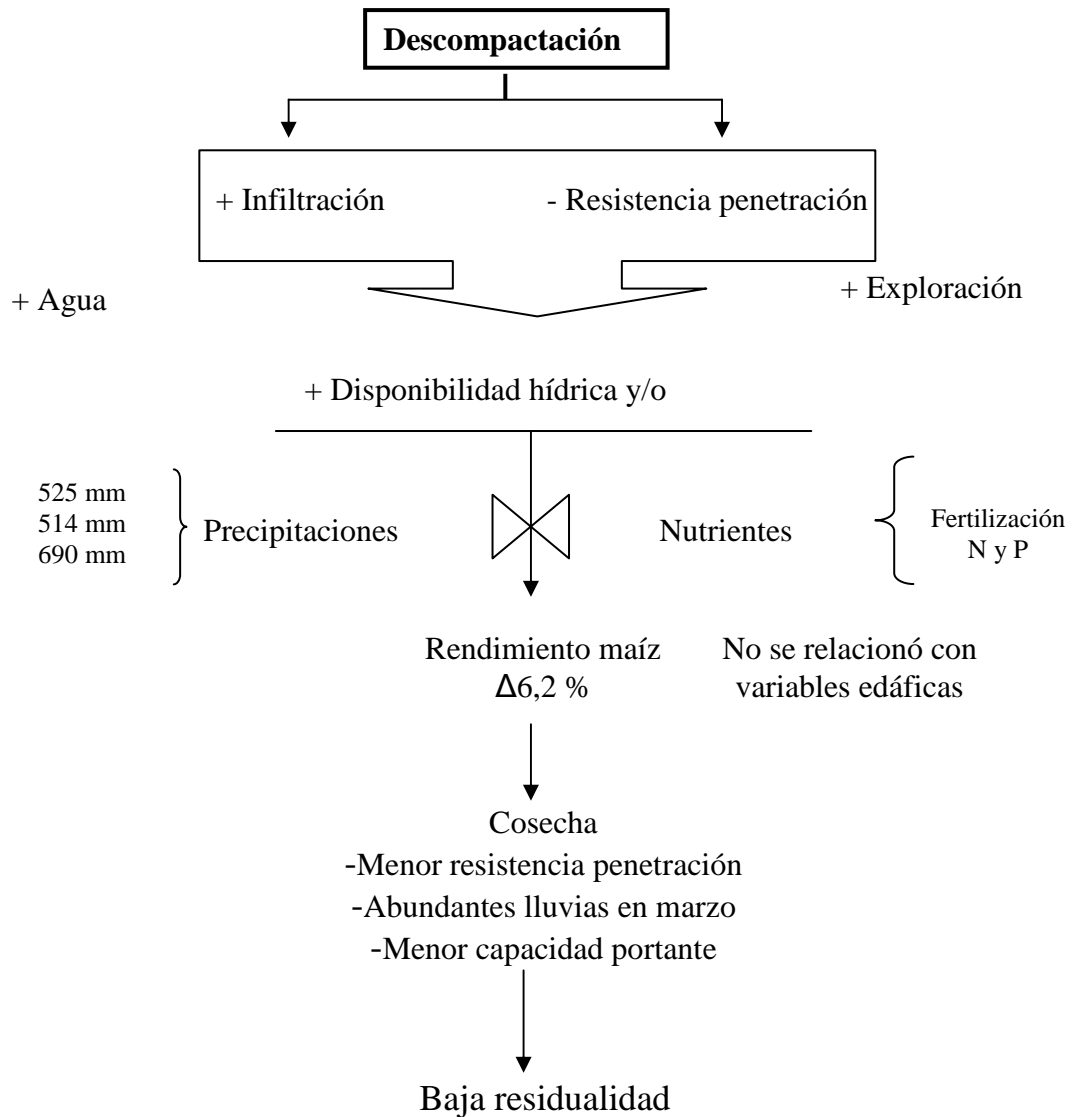


Figura 6.2. Resumen de los resultados del Capítulo 4. Las precipitaciones (pp) corresponden a los ciclos de maíz evaluados.

iii) Control del tránsito agrícola:

En el Capítulo 5 de la Tesis se proponen ecuaciones de pedotransferencia para la región pampeana, mediante las cuales se pueden estimar los parámetros del Test de Proctor a partir de variables de fácil determinación. Adicionalmente, este estudio brinda nueva información sobre el comportamiento de los suelos bajo SD cuando son sometidos a un

estrés de tránsito. La compactación del suelo puede ser evitada si se reduce el tránsito, o bien se aumenta la resistencia del suelo para soportar las cargas aplicadas- capacidad portante-. En este último caso, se reduce la DMAX al aumentar el COS y con la utilización de SD. Asimismo, el productor debe evitar transitar el suelo (cosecha, aplicaciones de protección) con valores de contenido hídrico cercanos a CHC. En la Figura 6.3 se presentan los distintos valores de CHC de suelos con distintos contenidos de COS y arena a modo de que los productores y técnicos puedan de manera rápida conocer el valor CHC de sus suelos, y operar considerando el mismo. Asimismo, abre el interrogante de cómo incidirá el efecto de la SD sobre la DMAX en los umbrales de compactación relativa. Siendo de interés determinar estos umbrales para las situaciones sin laboreo y sobre un mayor número de cultivos. Así se podría predecir el impacto de la compactación sobre el rendimiento de cultivos.

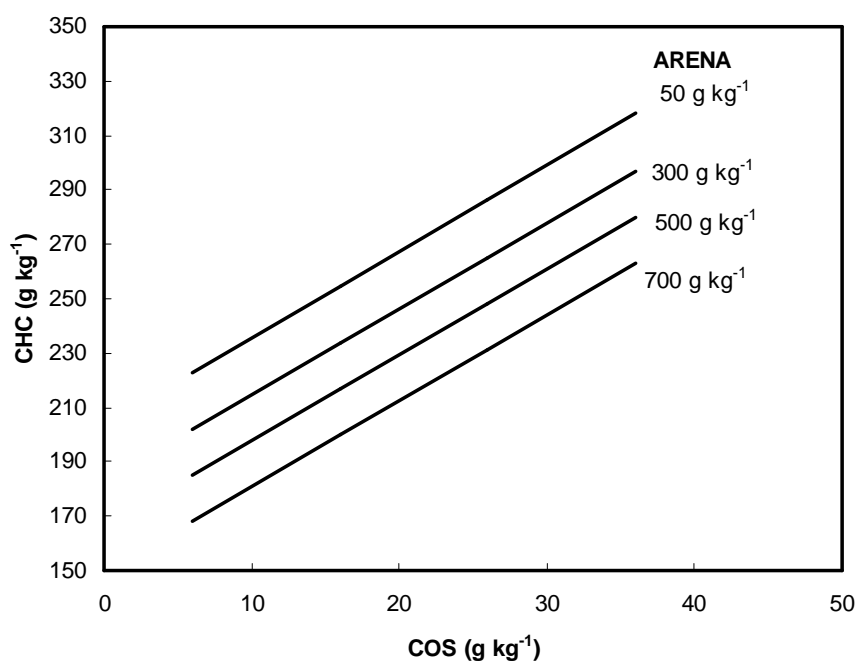


Figura 6.3. Variación del contenido de humedad crítico (CHC) con el carbono orgánico del suelo (COS) y el contenido de arena según modelo Figura 5.2.

RECOMENDACIONES DE INVESTIGACIÓN Y MANEJO

En relación a líneas de investigación futuras se propone:

- Ahondar en el estudio del mecanismo de hinchamiento diferencial por aire entrampado como causa de la conformación y difusión masiva de las estructuras laminares.
- Evaluar el efecto de distintos cultivos de cobertura sobre la calidad estructural de los suelos en planteos de SD, determinando las especies o combinaciones de las mismas que tiendan a mejorar la agregación.
- Trabajar en forma conjunta con los grupos de investigación de tránsito para mejorar la interpretación de los cambios de la calidad física y las distintas alternativas de manejo del tránsito.
- Realizar una recopilación de todos los ensayos de descompactación locales y proceder a su meta-análisis a fin de detectar las variables que permitan predecir el aumento de rendimiento por descompactación.

A partir de los datos emergentes de esta Tesis se sugiere para un buen manejo de la calidad física de los suelos en SD:

- Monitorear la evolución de la RP y la infiltración en planteos de SD continua.

- Propiciar la presencia de raíces vivas que aseguren la agregación por “binding”, el cual parece ser un mecanismo de importancia para la buena estructuración de suelos limosos con arcillas no expandibles. Surge de esta tesis que el suelo debería contar con raíces vivas a lo largo de todo el año (cultivos de cobertura, doble cultivo).
- Aplicar prácticas tendientes a aumentar o mantener el contenido de materia orgánica del suelo, las cuales son las mismas que asegurarían maximizar la agregación por “binding” o enredado.
- Aplicar medidas preventivas de la compactación como el control del tránsito agrícola y transitar con buena capacidad soporte del suelo (altos contenidos de materia orgánica, no transitar el suelo en el contenido hídrico crítico).
- Aplicar medidas correctivas como la descompactación pero asegurar su persistencia con un buen manejo pos-práctica aplicando todas las medidas preventivas posibles descriptas en el ítem anterior.

Bibliografía

- AAPRESID. 2011. Asociación Argentina de productores en Siembra Directa. http://www.aapresid.org.ar/images/cms/assets/docs/aapresid.evolucion_sd_en_argentina_2009.pdf. Acceso: 1/4/2011.
- Allison, LE. 1965. Organic carbon. In: CA Black (ed). *Methods of Soil Analysis (Part 2) Chemical and Microbiological Properties*. Publisher: America Society of Agronomy Inc., Madison, Wisconsin, USA. Pp: 1367-1378.
- Álvarez, C.R., Álvarez, R., Grigera, M.S., Lavado, R.S. 1998. Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 767-773.
- Alvarez, C.R., Taboada, M.A., Bustingorri, C., Gutierrez Boem, F.H. 2006. Soil alleviation in direct drilling: effect on soil physical properties and maize yield. *Ciencia del Suelo* 24:1-10.
- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutiérrez Boem, F.H., Bono, A., Fernández, P.L., Prystupa, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
- Álvarez, C.R., Gutiérrez Boem, F.H., Taboada, M.A., Prystupa, P., Ocampo, J.F., Fernandez, P. L., Moulin, M. 2004. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires. Resúmenes del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (Entre Ríos), 22 al 25 de junio de 2004, p. 238.
- Alvarez, R., Alvarez, C.R. 2000. Soil Organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 184-189.

- Alvarez, R., Díaz, R., Barbero, N., Santanatoglia, O., Blotta, L. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and C-CO₂ production from three tillage systems. *Soil Till. Res.* 33: 17-28.
- Alvarez, R., Grigera, S. 2005. Analysis of soil fertility and management effects on yields of wheat and corn in the Rolling Pampa of Argentina. *Journal of Agronomy and Crop Science* 191: 321–329.
- Alvarez, R., Russo, M.E., Prystupa, P., Scheiner, J.D., Blotta, L. 1998. Soil carbon pools under conventional and no –tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90:138-143.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Till. Res.* 104:1-15.
- Amato, M., Ritchie, J. 2002. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Sci.* 42: 773-780.
- Aragón, A., García, M.G., Filgueira, R.R., Pachepsky, Ya.A.. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: The relationship with organic carbon and water content. *Soil Tillage Res.* 56: 197-204.
- ASTM (American Society for Testing Materials). 1992. Standard test methods for moisture relations using a 5,5 lb (2,5 kg) hammer and 12 inch (304,8 mm) drop. p. 836-842. *In*: ASTM (ed.) Standards in Building Codes. ASTM, Philadelphia.
- Baker, J., Ochsner, T., Venterea, R., Griffis, T. 2007. Tillage and carbon sequestration- what do we really know. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118: 1-5.

- Barbosa, O. A., Taboada, M.A., Cosentino, D.J. 1999. Contracción al secado de agregados en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 17: 1 - 7.
- Barbosa, O.A., Taboada, M.A., Rodríguez, M.B., Cosentino, D.J. 1997. Regeneración de la estructura en un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada en diferentes fases de degradación. *Ciencia del Suelo* 15: 81-88.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., García Roque, C., Vieira Feraz, M. 2005. Optimal relative bulk density for soybean yield in Oxisols. *Res. Bras. Cienc. Solo* 29: 843-849.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R.. 2008. No-tillage and soil profile tillage sequestration: An on-farm assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 693-701.
- Bolliger, A., Magid, J., Carneiro Amado, T.J, Skóra Neto, F., Dos Santos Ribeiro, M.deF., Calegari, A., Ralisch, R., De Neergaard, A. 2006. Taking stock of the Brazilian “zero-till revolution”: a review of landmark research and farmers’ practice. *Adv. Agron.* 91: 47-109.
- Bonel, B.A., Morras, H.J.M., Bisaro, V. 2005. Microstructure and organic matter modifications in an Argiudoll under different conditions of cultivation and conservation. *Ciencia del Suelo* 23: 1-12.
- Boone, F.R., van der Werf, K.H., Kroesbergen, B., ten Hag, B.A., Boers, A. 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. I Mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 34: 155-171.
- Botta, G. F., Jorajuria, D., Balbuena, R., Rosatto, H. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil Till. Res.* 78: 53-58.

- Botta, G., Ressia, J., Rosatto, H., Tourn, M., Soza, E., Ferrero, C., Stadler, S.. 2005. Efectos de la labranza vertical sobre el suelo y el rendimiento del cultivo de girasol (*Helianthus annus* L.). *Agro-Ciencia* 21(2): 5–12.
- Botta, G.F., Pozzolo, O., Bomben, M., Rosatto, H., Rivero, D., Ressia; M., Tourn, M., Soza, E., Vazquez, J. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil Till. Res.* 96: 145 -154.
- Botta, G.F., Joraujuria D., Balbuena, R., Ressia, M., Ferrero, C., Rossato, H., Tourn, M. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus* L.) yields. *Soil Till. Res.* 91: 164-172.
- Braida, J.A., Reichert, J.M., Da Veiga, M., Reinert, D.J. 2006. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30: 605-614.
- Burke, W., Gabriels, D., Bouma, J. 1986. *Soil structure assessment*. A. A. Balkema. Rotterdam, 92 pp.
- Cambardella, C.A., Elliot, E.T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Carter, A., Jordan, V., Stride, C. 2003. *A guide to managing crop establishment*. Soil and Management Initiative, Chester.
- Carter, M. R., Holmstrom, D.A., Cocharne, L.M., Breton, P. C., van Roestel, J. A., Langille, D. R., Thomas, W. G.. 1996. Persistence of deep loosening of naturally compacted subsoils in Nova Scotia. *Canadian Journal of Soil Science* 76: 541-547.
- Carter, M.R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.

- Casanovas, E.M., Studdert, G.A., Echeverria, H.E. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. II Efecto de los ciclos de agricultura y pastura. *Ciencia del Suelo* 13: 21-27.
- Chagas, C.I., Santanatoglia, O.J., Castiglioni, M.G. 1995. Tillage and cropping effects on selected properties of an Argiudoll in Argentina. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 26: 643-655.
- Chen, G., Weil, R.R. 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil* 331: 31-43.
- Cosentino, D.J., Pecorari, C. 2002. Impact of low-density minerals on physical properties of soils of the Pampean region. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- Costantini, A. 2003. *Estoque de Carbono em um Sistema Agrícola do Pampa Argentino*. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Brazil.
- Costantini, A., De-Polli, H., Galarza, C., Pereyra Rossiello, R., Romaniuk, R. 2006. Total and mineralizable soil carbon as affected by tillage in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 88: 274-278.
- D'Haene, K., Sleutel, S., De Neve, S., Gabriels, D., Hofman, G. 2009. The effect of reduced tillage agriculture on carbon dynamics in silt loam soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 84: 249-265.
- Daniel, P., Marbán, L. 1989. Adaptación de un método espectrofotométrico reductivo para la determinación de nitratos. *Boletín de la AACS* 58:3-8.
- Dardanelli, J.L., Calmon, M.A., Jones, J. W., Andriani, M. P., Díaz, M. P., Collino, D. J. 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *Trans. ASAE*, 46: 1265–1275.

- De Battista, J.J., Pecorari, C., Albrecht, R. 2005. Evaluación del estado estructural de suelos con agricultura continua en siembra directa, en: Indicadores de calidad de suelos, Boletín Técnico 4, Estación Experimental Agropecuaria General Villegas: 31-39.
- Degens, B.P. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research* 35: 431-459.
- Derpsch, R. 2011. Situación general de la siembra directa en el mundo. <http://www.rolf-derpsch.com/>. Acceso: 1/4/2011.
- Dexter, A.R. 1975. Uniaxial compression of ideal brittle tilths. *J. Terramech.* 12: 3-14.
- Dexter, A.R. 1988. Advances in the characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11: 199-238.
- Díaz Zorita, M., Duarte, G.A., Grove, J.H. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 65: 1-18.
- Díaz-Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays L.*) productivity. *Soil Till. Res.* 54: 11-19.
- Díaz-Zorita, M., Grosso, G.A. 2000. Effects of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research* 54: 121-126.
- Erbach, D.C., Cruse, R. M., Crosbie, T.M, Timmons, D.R., Kaspar, T.C., Potter K.N. 1986. Maize response to tillage - induced soil conditions. *Trans. ASAE* 29: 690 – 695.
- Evans, S.D., Lindstrom, M.J., Voorhees, W.B., Moncrief, J.F., Nelson, G.A. 1996. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil Till. Res.* 38: 35-46.

- Fabrizzi, K.P., Morón, A., García, F.O. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.
- FAO. 2011. <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>. Acceso: 1/4/2011.
- Ferreras, L.A., Costa, J.L., Garcia, F.O., Pecorari, C. 2000. Effect of no tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern 'Pampa' of Argentina. *Soil and Tillage Research* 54: 31-39.
- Ferraris, G.N. 2004. Descompactación de suelos bajo siembra directa. *Revista de tecnología agropecuaria-INTA PERGAMINO*, Enero-abril: 46-48.
- Franzluebbers, A, Hons, F.M., Zuberer, D.A. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 460-466
- Franzluebbers, A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66: 95-106.
- Franzluebbers, A.J., Stuedemann, J.A. 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.
- Gardner, C.M.K., Layrea, K.B., Unger, P.W. 1999. Soil Texture and structure. Chapter 2. Pp. 7-20. in: *Soil physical constraints to plant growth and crop production*. FAO, Roma, Italia.
- Gee, G.W., Or, D. 2002. Particle-Size Analysis. p. 255-293. In: JH Dane & GC Topp (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Glinski, J., Lipiec, J. 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida. 250 pp.

- Grossman, R.B., Reinsch, T.G.. 2002. Bulk Density and Linear Extensibility. p. 201 – 228. In: J. Dane & G C Top (eds). *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*, SSSA Book Series 5, Madison, WI.
- Gupta, S.C., Allmaras, R.R. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: 65-100.
- Gupta, V.V.S.R., Germida, J.J. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 20: 777-786.
- Hamilton-Manns, M., Ross, C.W., Horne, D.J., Baker, C.J. 2002. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. *Soil Tillage Res.* 68: 109-119.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K. 2005. Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loam sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 54: 273-282.
- Hermle, S., Anken, T., Leifeld, J., Weisskopf, P. 2008. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil Till. Res.* 98: 94-105.
- Horn, R., Way, T., Rostek, J. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil Till. Res.* 73: 101-106.
- Hubert, F., Hallaire, V., Sardini, P., Caner, L., Heddadj, D. 2007. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma* 142: 226-236.

- Hussain, I., Olson, K.R., Wander, M.M., Karlen D.L. 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil and Tillage Research* 50: 237-249.
- INDEC. 2005. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. www.indec.gov.ar. Maddonni, G.A.; S. Urricariet; C. M. Ghersa & R. S. Lavado. 1999. Assessing soil quality in the Rolling Pampa (Argentina), using soil properties and maize characteristics. *Agronomy J.* 91 : 280 - 287.
- INTA. 2011. Datos Analíticos del Perfil Típico de la Serie O'Higgins en: <http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/O'Higgins.htm>. Ingreso: 20/10/2011
- Jin, H., Hongwe, L., Xiaoyan, W., McHugh, A.D., Wenyang, L., Huanwen, G., Kuhn, N.J. 2007. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil Till. Res.* 94: 493-502.
- Jobbágy, E., Jackson, R.B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10: 423-436.
- Kay, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 12: 1-52.
- Kay, B.D., Grant, C.D., Groenevelt, P. H. 1985. Significance of ground freezing on soil bulk density under zero tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:973-978.
- Kay, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 12: 1-52.
- Krüger, H.R. 1996. Compactación en Haplustoles del sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 14: 104-106.
- Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D. 2007. Evolution of the plow over 10000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res.* 93: 1-12.

- Larson, W.E., Pierce, F. J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. p. 175-203. In: Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Vol. 2: Technical papers. Bangkok, Thailand: International Board for Research and Bangkok, Thailand: International Board for Research and Management. IBSRAM Proceedings No. 12(2).
- Larson, W.E., Pierce, F. J. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. En: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A., Eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Soil Science Society of America Special Publication Number 35: 37-51.
- Lavado, R.S., Porcelli, C.A., Alvarez, R. 1999. Concentration and distribution of extractable elements in a soil as affected by tillage systems and fertilization. *The Science of the Total Environment* 22: 185-191.
- Lipiec, J., Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116: 107-136.
- Lipiec, J., Kuś, J., Słowińska-Jurkiewicz, A. and Nosalewicz, A., 2005. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage Research*. 89, 210-22
- Lipiec, J., Kus, J., Słowińska-Jurkiewicz, A., Nosalewicz, A. 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Tillage Res.* 89: 210-220.
- Lowery, B., Morrison, J.E. Jr. 2002. Soil penetrometers and penetrability. p. 363 – 388. In: J.H. Dane & G.C. Topp (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Management, 1991. IBSRAM Proceedings No. 12(2).

- Manichon, H. 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. p. 145-155. In: G Monnier & MJ Goss (eds.). *Soil Compaction and Regeneration*. A.A. Balkema. Rotterdam / Boston.
- Marelli, H., Arce, J. 2000. 25 años del doble cultivo trigo/soja bajo siembra directa. Informe técnico del área suelos y producción vegetal. INTA Marcos Juárez 128: 315.
- McLauchlan, K., Hobbie, S. 2004. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1616-1625
- Michelena, R.O., Irurtia, C.B., Pittaluga, A., Vavruska, F., de Sardi, M.E.B. 1988. Soil degradation in the north area of the Rolling Pampa. *Ciencia del Suelo* 6: 60-66 (in Spanish).
- Micucci, F.G., Taboada, M.A.. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max* Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 86: 152-162.
- Morrás, H., Bonel, B., Michelena, R. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná.*
- Morris, N.L., Miller, P.C.R., Orson, J. H., Froud-Williams, R.J. 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment. A review. *Soil and Tillage Research* 108: 1-15.
- Mueller, L., Schindler, U., Fausey, N.R., Lal, R. 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil Till. Res.* 72: 9-20.
- Neill, C., Melillo, J., Steudler, P. A, Cerri, C. C., Moraes, J.F.L., Piccolo, M.C., Brito, M. 1997. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in southwestern Brazilian amazon. *Ecological Applications*. v.7,n.4, p.1216-1225.

- Nelson, D. W., Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. in Page, A.L., (Ed). Methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy, USA, Agronomy 9, pp. 539-579.
- Neter, J., Wasserman, W. 1974. Applied linear statistical models: regression analysis of variance and experimental design. *In*: R. D. Irwin (ed.), 872 pp., Homewood.
- Nhantumbo, A.B.J.C., Cambule, A.H. 2006. Bulk density test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil Till. Res.* 87:231-239.
- Oades, JM. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Obi, ME. 1999. The physical and chemical responses of a degraded sandy clay loam to cover crops in southern Nigeria . *Plant Soil* 211: 165 – 172.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., Pellegrini, S. 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Till. Res.* 73: 119-129.
- Pecorari, C., Andriulo, A., Ausilio, A. 1993. Aptitud físico-mecánica de los suelos para el laboreo. II Efectos de la textura y de la materia orgánica sobre la densidad aparente máxima de algunos suelos de la región pampeana Argentina. Informe Técnico INTA, 281. 16p.
- Pikul, J.L.Jr, Osborne, S., Ellsbury, M., Riedell, W. 2007. Particulate organic matter and water-stable aggregation of soil under contrasting management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 766-776.
- Pilatti, M.A., de Orellana J.A. 2000. The ideal soil: II. Critical values of an “ideal soil,” for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *J. Sustainable Agric.* 17: 89-111.

- Quiroga, A.R., Buschiazzo, D.E., Peinemann, N. 1996. Soil organic matter particle size fraction of the Semi Arid Argentinian Pampas. *Soil Science* 61: 104-108.
- Quiroga, A.R., Buschiazzo, D.E., Peinemann, N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Till. Res.* 52: 21-28.
- Quiroga, A.R., Ormeño, O., Peinemann, N., 2001. Materia orgánica. Un indicador de calidad de suelos relacionado con la productividad de los cultivos. *Boletín de divulgación técnica N° 70*. EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas", INTA. Argentina
- Reichert, J.M., Sanches Suzuki, L.E.A., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.* 102: 242-254.
- Restovich, S., Andriulo, A., Amémdola, C. 2011. Introducción De Cultivos De Cobertura En La Rotación Soja-Maíz: Efecto Sobre Algunas Propiedades Del Suelo. *Ciencia del Suelo* 29 (1): 61-73.
- Rhoton, F.E. 2000. Influence of time on soil response to no-till practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 700-709.
- Richter, D., Babbar, L.I, Huston, M.A, Jaeger, M. 1990. Effects of annual tillage on organic carbon in a fine - textured udalf: the importance of root dynamics to soil carbon storage. *Soil Sci.* 149: 78-83.
- Sadras, V.O., Calviño, P.A. 2001. Quantification of grain yield response topsoil depth in soybean, maize, sunflower and wheat. *Agron. J.* 93(3): 577-583.
- Sadras, V.O., O'Leary, G. J., Roget, D.K. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91: 131-148.
- Salazar Lea Plaza, J.C., Moscatelli, G. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500000. SAGyP - INTA, Buenos Aires, Argentina. 527 p.

- Sasal, M.C., Andriulo, A., Taboada, M.A. 2004. Orientación de poros en Argiudoles bajo siembra directa continúa. Resúmenes del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (Entre Ríos), 22 al 25 de junio de 2004, p. 44.
- Sasal, M.C., Andriulo, A.E., Taboada, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research* 87: 9-18.
- Senigagliesi, C., Ferrari, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *International Crop Science I*. pp. 27-35. In: DR Buxton; R Shibles; RA Forsberg; BL Blad; KH Asay; GM Paulsen & RF Wilson (eds.). *Crop Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA*.
- Shipitalo, M.J., Protz, R. 1987. Comparison of morphology and porosity of soil under conventional and zero tillage. *Canadian Journal of Soil Science* 67: 445-456.
- Sisti, C. 2005. Estudo de sistemas de uso do solo e rotações de culturas em sistemas agrícolas brasileiros: dinâmica de nitrogênio e carbono no sistema solo – planta - atmosfera. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Brazil.
- Sisti, C., Santos, H., Kohhann, R., Alves, B., Urquiaga, S., Boddey, R. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 76: 39-58
- Slowińska-Jurkiewicz, A., Domzał, H. 1991. The structure of the cultivated horizon of soil compacted by wheels of agricultural tractors. *Soil Till. Res.* 19: 215-226.
- Snedecor, G.W., Cochran, W.G. 1978. *Statistical Methods*. Sixth edition. The Iowa State University Press. Ames, Iowa, 593 p.
- Soane, B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. *Soil Till. Res.* 16: 179-201.

- Soil Quality Institute. 2011. Soil quality test kit guide. En: <http://ocw.tufts.edu/data/32/383298.pdf>.
- Soil Survey Staff. 1994. Keys to Soil Taxonomy, 6th Ed. USDA - Natural Resources Conservation Service.
- Soracco, C. G., Lozano, L. A., Sarli, G. O., Gelati, P. R., Filgueira, R. 2010. Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Till. Res.* 109: 18-22.
- Soriano, A., León, R.J.C., Sala, O.E., Lavado, R.S., Deregibus, V.A., Cauhépé, M.A., Scaglia, O.A., Velázquez, C.A., Lemcoff, J.H. 1991. Río de la Plata grasslands. in Coupland, R.T. *Ecosystems of the world 8 A*, Elsevier, Amsterdam, pp. 367-407.
- Sparling, G.P., Shepherd, G., Kettles, H. 1992. Changes in soil organic C, microbial C and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soils from the Manawatu region, New Zealand. *Soil Till. Res.* 24: 225-241.
- Spoor, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use Manage.* 22: 113-122.
- Steinbach, H.S, Alvarez, R. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean Agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 35: 3-13.
- Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough II, J.C. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Tillage Res.* 99: 4-48.
- Taboada, M. A., Barbosa, O.A., Rodríguez, M.B., Cosentino, D.J. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233 – 244.

- Taboada, M.A., Barbosa, O.A., Cosentino, D.J. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
- Taboada, M.A., Micucci, F.G., Cosentino, D.J., Lavado, R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Tillage Res.* 49: 57-63.
- Taboada, M.A., Alvarez, C.R. 2007. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *R. Bras. Ci. Solo* 32: 769-779.
- Tardieu, F. 1988. Analysis of spatial variability of maize root density. I. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant Soil* 107: 259-266.
- Thomas, G.A., Titmarsh, G.W., Freebairn, D.M., Radford, B.J. 2007. No-tillage and conservation farming practices in grain growing areas of Queensland –a review of 40 years of development. *Aust. J. Exptl. Agric.* 47: 897-898.
- Thomas, G.W., Haszler, G.R., Blevins, R.L. 1996. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test. *Soil Sci.* 161: 502-508.
- USDA. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. USDA-ARS- NRCS-Soil Quality Institute, p. 88.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D., Miller, J.J. 1999 b. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of southwestern Ontario. *Soil Tillage Res.* 51: 139-149.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D. 1999 a. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 79: 149-160.
- Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W., Bullock, D.G. 2006. No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops: Effects on Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1936-1944.

- Voorhees, W.B., Farrell, D.A., Larson, W.E. 1975. Soil strength and aeration effects on root elongation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 948-953.
- Voorhees, W.B., Lindstrom, M.J.. 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 152-156.
- Wagner, L.E., Ambe, N.M., Ding, D. 1994. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. *Trans. Am. Soc. Agricul. Eng.* 37: 1121-1125.
- Waldron, L.J., Constantin, G.K. 1970. Soil resistance to a slowly moving penetrometer. *Soil Sci.* 109: 221-226.
- Walkley, A., Black, C.A. 1965. Organic carbon. Chapter 4. In: Black CA (ed), *Method of soil analysis*. American Society of Agronomy. p. 1372-1375.
- Wander, M.M., Bollero, G.A. 1999. Soil quality assessment of tillage impact in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.
- West, T., Post, W. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1930-1946.
- Williams, S.M., Weil, R.R. 2004. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1403-1409.
-