

**Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos
bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua**

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

María Carolina Sasal
Ing. Agrónoma- UNR - 1997
Magister Cs. del Suelo – UBA - 2003

INTA – Área de Recursos Naturales-EEA Paraná



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis
Adrián E. Andriulo
Ingeniero Agrónomo (UNR)
Doctor en Ciencia del Suelo (Institut National Agronomique de Paris-Grignon)

Co-director
Joël Léonard
Licence de géographie physique (Université Louis Pasteur, Strasbourg)
DEA Sciences de l'Eau et Aménagement (Université Montpellier II)
Doctorat d'hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie (Université Paris VI)

Consejero de Estudios
Miguel A. Taboada
Ingeniero Agrónomo (UBA)
Docteur Fonctionnement des Ecosystemes et Agrosystemes
(Institut National Polytechnique de Toulouse)

JURADO DE TESIS

Director de tesis
Adrián E. Andriulo
Ing. Agr. - Universidad Nacional de Rosario
Doctor en Ciencia del Suelo - Institut National Agronomique de Paris-Grignon

JURADO
Silvia del Carmen Imhoff
Ing. Agr. - Universidad Nacional del Litoral
Dra. en Ciencias Agropecuarias - Universidade de Sao Pablo, Brasil

JURADO
Guillermo Alberto Studdert
Ing. Agr. - Universidad Nacional de Mar del Plata
Doctor - Universidad de Lleida

JURADO
José Luis Costa
Ing. Agr. Universidad de Buenos Aires
Doctor of Philosophy - North Dakota State University

Fecha de defensa de la tesis: 28 de MARZO de 2012

Dedicatoria

A Gustavo y a Lucila, nuestro sueño hecho realidad.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y, particularmente, a las Estaciones Experimentales de Pergamino y Paraná por el aporte económico, la disponibilidad de infraestructura y la colaboración de su personal para la concreción de esta tesis.

A mis Directores de Tesis: a Adrián por su dedicación, su apoyo sincero y su contención en cada etapa del desarrollo de la tesis y a Joël por haber confiado en mí, por estar siempre presente a pesar de la distancia y por brindarme todo su saber. A mi Consejero de Estudios, Miguel, por su tiempo y sus valiosas sugerencias.

A los evaluadores de la Tesis, Silvia, Guillermo y José Luis, por el compromiso asumido y los excelentes aportes para mejorarla.

A mis Compañeros de INTA (Grupo de Gestión Ambiental de la EEA Pergamino y Grupo de Recursos Naturales de la EEA Paraná), quiero agradecerles el apoyo, la comprensión y los consejos en los momentos difíciles. También, les agradezco la conducción de los ensayos, los muestreos, el trabajo en los laboratorios, las críticas a los borradores y a la presentación oral, los asados, los mates...

A Marcelo y a Lila, por ser incondicionales.

A mi familia, por haber promovido en mí el deseo de superación.

A Gustavo y Lucila, los amores de mi vida.

A todos, muchas gracias!

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo, y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Sasal, M.C., Andriulo, A.E. y Taboada, M.A. 2006. SOIL POROSITY CHARACTERISTICS AND WATER MOVEMENT UNDER ZERO TILLAGE IN SILTY SOILS IN ARGENTINIAN PAMPAS. Soil Till Res, 87: 9-18

Sasal, M.C., Castiglioni, M.G. y Wilson, M.G. 2010. EFFECT OF CROP SEQUENCES ON SOIL PROPERTIES AND RUNOFF ON NATURAL RAINFALL EROSION PLOTS UNDER NO TILLAGE. Soil Till Res, 108:24-29

Gabioud, E.A., Wilson, M.G. y Sasal, M.C. 2011. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LE BISSONNAIS PARA ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS. Ciencia del suelo 29: 129-133.

Wilson, M.G., Sasal, M.C. y Caviglia, O.P. 2011. CRITICAL BULK DENSITY FOR A MOLLISOL AND A VERTISOL USING LEAST LIMITING WATER RANGE. EFFECT ON EARLY WHEAT GROWTH. Geoderma (enviado)

Sasal, M.C., Léonard, J. y Andriulo, A.E. 2011. PLATY STRUCTURE IN NO TILLAGE SOILS OF THE ARGENTINEAN NORTHERN HUMID PAMPAS. Soil Till Res (enviado)

ÍNDICE GENERAL

1. Capítulo 1 (Introducción general)	1
1.1.1. El suelo, la agricultura y el ambiente	2
1.1.2. Molisoles	3
1.1.3. Molisoles bajo siembra directa	4
1.1.4. Sistema de cultivo en argentina.....	5
1.1.5. Estado estructural del suelo bajo siembra directa	6
1.1.6. Factores que condicionan la formación de la estructura laminar	8
1.1.7. Estructura bajo sd y su efecto sobre algunos componentes del balance de agua..	10
1.2. Hipotesis.....	11
1.3. Objetivo general	11
1.3.1. Objetivos parciales	11
2. Capítulo 2 (Estados estructurales bajo siembra directa)	12
2.1. Introducción	13
2.2. Materiales y metodos	14
2.2.1. Análisis estadístico	18
2.3. Resultados y discusión	19
2.3.1. Patrón estructural del horizonte superficial.....	19
2.3.2. Porosidad estructural y resistencia de suelo al corte	20
2.3.3. Factores que controlan el desarrollo de la estructura laminar.....	20
2.3.3.1. Antigüedad de la siembra directa.....	20
2.3.3.2. Secuencias de cultivo	22
2.3.3.3. Interacciones entre diferentes estructuras de suelo	23
2.4. Conclusiones	25
3. Capítulo 3 (Factores que intervinieren en la formación de la estructura laminar)	26
3.1. Introducción	27
3.2. Materiales y métodos	29
3.2.1. Caracterización edafoclimática de la zona de estudio.....	29
3.2.2. Efecto del tránsito y de la cobertura (ensayo de campo):	29
3.2.2.1. Mediciones	31
3.2.2.2. Análisis estadístico.....	32
3.2.3. Ciclos de humedecimiento y secado (ensayo de laboratorio)	33
3.2.3.1. Suelo.....	33
3.2.3.2. Ciclos de humedecimiento-secado	34
3.2.3.3. Mediciones	34
3.2.4. Impedimento a la penetración de raíces (ensayo de laboratorio).....	35
3.2.4.1. Preparación de la muestra	35
3.2.4.2. Mediciones de suelo.....	36
3.2.4.3. Análisis estadístico.....	37
3.3. Resultados y discusión	37
3.3.1. Efecto del tránsito y de la cobertura (ensayo de campo)	37
3.3.2.1. Evolución de la estructura laminar.....	42
3.3.2.2. Análisis multivariado de los distintos tipos de estructura hallados	42
3.3.2.3. Propiedades edáficas características de los distintos tipos de estructura	44
3.3.3. Ciclos de humedecimiento y secado (ensayo de laboratorio)	47
3.3.3.1. Evolución de la porosidad total.....	47
3.3.3.2. Fisuras verticales	48
3.3.3.3. Observaciones morfológicas en perfiles verticales.....	49

3.3.4. Impedimentos a la penetración de raíces (ensayo de laboratorio)	52
3.3.4.1. Intervalo hídrico óptimo (IHO).....	52
3.3.4.2. Cambio volumétrico.....	53
3.3.4.3. Crecimiento temprano de trigo	54
3.3.4.4. Relación con los resultados encontrados en los ensayos anteriores.....	56
3.4. Conclusiones.....	58
4. Capítulo 4 (Características de la estructura que da origen a la estructura laminar)....	59
4.1. Introducción	60
4.2. Materiales y métodos	61
4.2.1. Mediciones de campo.....	63
4.2.2. Mediciones de laboratorio.....	64
4.3. Resultados y discusión	66
4.3.1. Patrón estructural del horizonte superficial de largo plazo	66
4.3.2. Numero de ciclos de h-s.....	70
4.3.3. Influencia del tránsito de maquinaria agrícola.....	72
4.3.4. Características de la estructura gamma	75
4.3.4.1. Físicas.....	75
4.3.4.2. Velocidad de drenaje.....	78
4.3.4.3. Estabilidad de la estructura	81
4.4. Conclusiones.....	84
5. Capítulo 5 (Efecto de la organización estructural bajo sd sobre algunos componentes del balance de agua).....	86
5.1. Introducción	87
5.2. Materiales y métodos	89
5.2.1. Mediciones	90
5.2.2. Análisis estadístico.....	91
5.3. Resultados y discusión	92
5.3.1. Patrón estructural del suelo	92
5.3.2. Efecto de la organización estructural sobre componentes del balance de agua....	95
5.3.2.1. Precipitaciones	95
5.3.2.2. Escurrimiento	97
5.3.2.3. Infiltración.....	100
5.3.3. Cobertura en superficie e intensificación de la secuencia.....	106
5.4. Conclusiones.....	108
6. Capítulo 6 (Conclusiones generales).....	109
Bibliografía.....	110

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Principales características de los sitios de estudio.....	30
Tabla 2. Caracterización físico-química inicial del suelo del ensayo de tránsito.....	47
Tabla 3. Categorías de estabilidad estructural (Bissonnais et al. 2002).....	51
Tabla 4: Propiedades químicas y físicas del suelo.....	54
Tabla 5. Propiedades edáficas del horizonte A de un Argiudol ácuico.....	57
Tabla 6. Proporción media de estructuras en 3 momentos de muestreo.....	63
Tabla 7. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales.....	68
Tabla 8. Autovalores y autovectores en 2010.....	69
Tabla 9. Coeficientes de correlación.....	70
Tabla 10: Biomasa aérea y radical y relación aérea/radical de trigo.....	84
Tabla 11. Probabilidad y R^2 Dapf y biomasa aérea y radical.....	84
Tabla 12. Valores medios de densidad aparente de cuatro tipos de estructura.....	88
Tabla 13. Fechas de siembra y cosecha de los cultivos del ensayo de larga duración...	98
Tabla 14. Características de la maquinaria agrícola utilizada.....	112
Tabla 15. Características de los principales mecanismos de desagregación.....	124
Tabla 16. Diámetros medios ponderados de la estructura gamma.....	125
Tabla 17. Porcentaje de distintos tipos de estructura.....	140
Tabla 18. Efecto de la secuencia de cultivos sobre escurrimiento.....	146
Tabla 19. Precipitación que genera escurrimiento.....	148
Tabla 20. Regresiones entre escurrimiento y estructuras laminar y granular.....	151
Tabla 21. Efecto de la secuencia de cultivos sobre Khc y Kh.....	152
Tabla 22. Correlación entre escurrimiento acumulado y espesor con Blue Brillant....	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución geográfica de órdenes de suelo.....	4
Figura 2. Perfil genético de Molisoles de la región pampeana.....	4
Figura 3. Cultivo de soja bajo siembra directa con rastrojo de trigo en superficie.....	6
Figura 4: Evolución de la superficie bajo SD en Argentina.	7
Figura 5. Estructura laminar en ensayo de largo plazo de INTA Pergamino.....	11
Figura 6. Fotografías del horizonte superficial con colorante Blue Brilliant.....	12
Figura 7. Estructura laminar en ensayo de INRA-Mons (Francia).....	14
Figura 8. Diagrama del balance de agua en un cultivo.....	16
Figura 9. Ubicación de los sitios de estudio en la Pampa húmeda norte.....	24
Figura 10. Equipo manual para medición de resistencia de suelos al corte.....	28
Figura 11. Medición <i>in situ</i> de resistencia de suelos.....	29
Figura 12. Perfil cultural representativo bajo siembra.....	30
Figura 13. a) Porosidad estructural y b) Resistencia del suelo al corte.....	32
Figura 14. Relación entre años bajo SD y proporción de estructura laminar en la Pampa Húmeda norte.....	33
Figura 15. Perfil cultural de un Argiudol típico serie Pergamino con 29 años bajo SD.....	35
Figura 16. Perfil cultural de un Argiudol típico serie Hansen con 25 años bajo SD.....	35
Figura 17. Regresión lineal entre ISI y proporción de estructura laminar.....	36
Figura 18. Relación entre estructura laminar y Γ en la Pampa Húmeda norte.....	38
Figura 19. Esquema de procesos en la formación de la estructura laminar.....	45
Figura 20. Plano del ensayo de tránsito. EEA INTA Pergamino.....	48
Figura 21. Fotografía de los tratamientos luego de aplicado el tránsito.....	49
Figura 22. Columnas de suelo para ensayo de h-s.....	53
Figura 23. Dimensiones de las columnas de suelo del ensayo de h-s.....	53
Figura 24. Determinación del Índice de Fisuración.....	55
Figura 25. Perfil del horizonte superficial con ensamblaje de imágenes.....	61
Figura 26. Proporción de estados estructurales de la situación inicial.....	61
Figura 27. Proporción de estados estructurales media en el horizonte superficial.....	62
Figura 28. Proporción media de estructuras en el horizonte superficial.....	64
Figura 29. Evolución de la estructura laminar en monocultivo de soja.....	65
Figura 30. Evolución de la estructura laminar en rotación M-T/S.....	66
Figura 31. Gráfico Biplot del análisis de componentes principales.....	67
Figura 32. Gráfico Biplot del análisis de componentes principales de 2010.....	69
Figura 33. Dendrograma de análisis multivariado de similitud.....	72
Figura 34. Distribución de la proporción de los distintos tipos de estructura en NT.....	73
Figura 35. Altura inicial y final de las columnas de suelo.....	73
Figura 36. Fotografía de la vista de superficial de una columna.....	75
Figura 37. Evolución del índice de fisuración medio.....	75
Figura 38. Valores medios del Índice de fisuración.....	76
Figura 39. Fotografía del corte longitudinal de una columna.....	78
Figura 40. Relación entre espesor de la estructura laminar e índice de fisuración.....	79
Figura 41. Frentes de humedecimiento.....	79
Figura 42. Regresión lineal entre el espesor de la estructura laminar y el cambio de densidad aparente.....	80
Figura 43. Contenido hídrico en función de la densidad aparente.....	81
Figura 44. Cambio volumétrico en función de la densidad aparente.....	82
Figura 45. Crecimiento de raíces entre agregados de la estructura laminar bajo SD.....	86

Figura 46. Crecimiento lateral de la raíz principal de soja en SD.....	87
Figura 47. Ubicación del ensayo de labranzas y rotaciones de INTA Pergamino.....	95
Figura 48. Ensayo de labranzas y rotaciones de larga duración de INTA Pergamino...	96
Figura 49. Sonda Watermark para medición de humedad volumétrica.....	97
Figura 50. Sondas para medición de humedad volumétrica.....	99
Figura 51. Ensayo de drenaje en mesas de succión.....	101
Figura 52. Perfil cultural en Monocultivo de soja realizado en 2005.....	103
Figura 53. Perfil cultural en Rotación M-T/S realizado en 2005.....	103
Figura 54. Distribución de distintos tipos de estructura en monocultivo de soja.....	104
Figura 55. Precipitaciones anuales registradas durante el período de estudio.....	105
Figura 56. Precipitaciones mensuales registradas.....	105
Figura 57. Distribución de distintos tipos de estructura en M-T/S.....	106
Figura 58. Curva de retención hídrica.....	108
Figura 59. Valores medios de potencial agua a campo.....	109
Figura 60. Precipitaciones diarias durante el período de estudio.....	111
Figura 61. Esquema del tránsito de maquinarias.....	113
Figura 62. Distribución de áreas transitadas y no transitadas.....	114
Figura 63. Resistencia de suelos al corte de distintas estructuras.....	115
Figura 64. Valores medios de densidad aparente de estados estructurales.....	116
Figura 65. Porosidad estructural de distintos tipos de estructura.....	117
Figura 66. Carbono total de distintos tipos de estructura.....	117
Figura 67. Valores medios de macro, meso y microporosidad.....	119
Figura 68. Valores medios de drenaje.....	121
Figura 69. Distribución de macroporos >300 μm y 300-60 μm en Gamma.....	122
Figura 70. Diámetros medios ponderados de distintas estructuras.....	123
Figura 71. Parcelas de escurrimiento de INTA EEA Paraná.....	134
Figura 72. Esquema (vista superior sin escalar) de una parcela de escurrimiento.....	135
Figura 73. Fotografía de las parcelas de escurrimiento de EEA Paraná.....	136
Figura 74. Distribución del porcentaje de distintas estructuras.....	141
Figura 75. Relación entre años bajo SD y proporción de estructura laminar.....	142
Figura 76. Regresión lineal entre ISI y porcentaje de estructura laminar.....	143
Figura 77. Regresión lineal entre ISI y porcentaje de estructura granular.....	143
Figura 78. Eventos de lluvia diarios y eventos de escurrimiento en 4 campañas.....	144
Figura 79. Lluvia acumulada anual y precipitación histórica anual.....	145
Figura 80. Relación entre precipitación diaria y escurrimiento.....	147
Figura 81. Regresión lineal entre estructura laminar y escurrimiento acumulado.....	150
Figura 82. Regresión lineal entre estructura granular y escurrimiento acumulado.....	150
Figura 83. Fotografías del horizonte A de 15 parcelas con colorante Blue Brilliant.....	155
Figura 84. Correlación entre espesor con Blue brilliant y escurrimiento acumulado...	156
Figura 85. Correlación entre espesor con Blue brilliant y estructura granular.....	157
Figura 86. Regresión lineal entre estructura granular y escurrimiento acumulado.....	158
Figura 87. Relación entre escurrimiento acumulado observado y simulado.....	159
Figura 88. Regresión lineal entre ISI y el escurrimiento acumulado.....	161
Figura 89. Esquema conceptual de evolución de la estructura bajo SD.....	170
Figura 90. Esquema conceptual del efecto de la estructura sobre el ingreso de agua...	173

ABREVIATURAS

Δ	Estructura delta
AF	Área de fisuras
AT	Área total
C	Carbono
c	Tratamiento con Dap característica de estructura masiva
CC	Capacidad de campo
CC-S	Soja continua con cultivo de cobertura otoño-invernal
CE	Conductividad eléctrica
CO	Carbono orgánico (Walkley-Black)
d	Espesor 0,05-0,2 m
Dap	Densidad Aparente del suelo
Dapc	Densidad aparente crítica
Dap _f	Densidad aparente final
Dap _i	Densidad aparente inicial
Dat	Densidad aparente textural
DMP	Diámetro medio ponderado de agregados estables
DMP _c	Diámetro medio ponderado humectación por capilaridad
DMP _d	Diámetro medio ponderado disgregación mecánica
DMP _e	Diámetro medio ponderado estallido
DMP _m	Diámetro medio ponderado medio
Dr	Densidad de la fase sólida
h-s	Humedecimineto-secado
IF	Índice de fisuración
IHO	Intervalo hídrico óptimo
Kh	Conductividad hidráulica saturada medida en laboratorio
Kh _c	Conductividad hidráulica saturada medida a campo
L	Tratamiento de suelo descubierto con laboreo
M	Maíz continuo
M-T/S	Rotación maíz-trigo/soja 2 ^a
M-T/S SC	Rotación M-T/S sin cobertura
NC	No cultivado
nc	Tratamiento con Dap característica bajo SD
NT	No transitado
P	Pastura
PE	Porosidad estructural
PMP	Punto de marchitez permanente
RC	Resistencia del suelo al corte
RP	Resistencia del suelo a la penetración
s	Espesor 0-0,05 m
S	Monocultivo de soja
SD	Siembra directa
T	Transitado
T/S	Secuencia trigo/soja 2 ^a
Γ	Estructura gamma
θ_A	Contenido hídrico con aireación es insuficiente
θ_{CC}	Contenido hídrico de capacidad de campo
θ_{PMP}	Contenido hídrico a punto de marchitez permanente
θ_{PR}	Contenido hídrico a resistencia del suelo limitante
θ_S	Contenido hídrico a saturación

RESUMEN

Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua

La evolución estructural de los suelos y su relación con la dinámica del agua son aspectos clave en la sustentabilidad de los agro-ecosistemas. La siembra directa (SD) combinada con la simplificación de secuencias de cultivos, generan la necesidad de estudiar nuevos aspectos de la degradación física de suelos cultivados. El objetivo de esta tesis fue identificar factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo SD y analizar las consecuencias de la presencia de estructura laminar y otras estructuras asociadas sobre el balance de agua. Se aplicó el método del perfil cultural en distintos sitios de la Pampa Húmeda norte y se realizaron ensayos de campo (tránsito, cobertura, secuencias) y laboratorio (humedecimiento-secado, intervalo hídrico óptimo) para modelar la evolución de la estructura laminar, identificar sus factores formadores y cuantificar su efecto sobre el funcionamiento hídrico. El desarrollo de estructura laminar está generalizado en la Pampa Húmeda norte. Su proporción en el perfil está asociada con el número de años bajo SD. El tránsito agrícola y la cobertura superficial no afectaron su evolución. La estructura laminar se forma por fisuración por humedecimiento-secado de una estructura masiva subyacente. La distribución de macroporos de esta estructura y su estabilidad, afectan la microfisuración y la formación de agregados elongados. Las raíces contribuyen con el crecimiento lateral y la exploración de la capa superficial del suelo por impedimento en su profundización cuando la densidad aparente es crítica ($>1,44 \text{ Mg m}^{-3}$). La estructura laminar altera el patrón de drenaje y aumenta el escurrimiento superficial en función de su proporción en el perfil del horizonte A. La secuencia de cultivos implementada bajo SD condiciona su formación y en consecuencia el funcionamiento hídrico del suelo. Las ecuaciones generadas permitirán identificar secuencias de cultivos que mejoren la captación de agua para aumentar rendimientos y minimizar riesgos ambientales.

Palabras clave: evolución estructural; suelos limosos; siembra directa; estructura laminar; balance de agua

ABSTRACT

Conditioning factors of the structural evolution of silty soils under no-tillage. Effect on water balance.

The structural evolution of soils and its relation to the dynamics of water are key issues in the sustainability of agro-ecosystems. No tillage (NT), together with the simplification of crop sequences, has generated the need to explore new aspects of the physical degradation of cultivated soils. The aim of this thesis was to identify determinants of the structural evolution of silty soils under NT and analyze the consequences of the presence of platy structure and other associated structures on the water balance. To this end, we applied the method of the cultural profile in different sites of the northern Humid Pampas and conducted experiments both in the field (machinery transit, coverage, crop sequences) and the laboratory (wetting-drying, least limited water range) to model the evolution of platy structure, identify its forming factors, and quantify their effect on the water functioning. The development of platy structure is widespread in the northern Humid Pampas. Its proportion in the topsoil profile is associated with the number of years under NT. Neither the machinery transit nor the surface coverage affected its evolution. The platy structure is formed by wetting-drying cracking of the massive structure underneath. The distribution of macropores of this structure and its stability affect the micro-cracking and the formation of elongated aggregates. The roots contribute with their lateral growth and the exploration of the topsoil since they cannot go further deep when the bulk density is critical ($>1.44 \text{ Mg m}^{-3}$). The platy structure alters the drainage pattern and increases the surface runoff according to its proportion in the profile of A horizon. The crop sequence implemented under NT affects its formation and, consequently, the soil water dynamics. The equations generated will allow identifying the crop sequences that allow improving the uptake of water to increase yields and minimize environmental risks.

Key words: soil structural evolution, silty soils, no-tillage, platy structure, water balance

CAPITULO 1

Introducción general

1.1.1. El suelo, la agricultura y el ambiente

Todos los organismos modifican su ambiente y los humanos no somos la excepción (Vitousek et al. 1997). Aproximadamente 1,5 billones de hectáreas (11% de la tierra del planeta) está cultivada. Debido a que la tierra es absolutamente esencial para la agricultura, la relación entre la degradación de la tierra y la producción de alimentos, merece especial valoración (Pimentel et al. 1996).

El suelo es un recurso natural no renovable en la escala de tiempo de la vida humana (Frossard 2007). Si bien, puede tener un espesor de sólo unos pocos centímetros o a lo sumo de unos metros en la superficie terrestre, tiene un rol esencial en el funcionamiento global del ambiente. Hillel (2004) señala que no es posible manejar efectiva y sustentablemente un medio tan vital, complejo y vulnerable como el suelo a menos que comprendamos sus atributos, funciones internas e interacciones con el ambiente. Nortcliff (2007) sintetiza así las funciones del suelo: producción de alimento y otras biomásas; almacenaje, filtrado y transformaciones; hábitat y origen de genes; ambiente físico y cultural para la humanidad y fuente de materias primas.

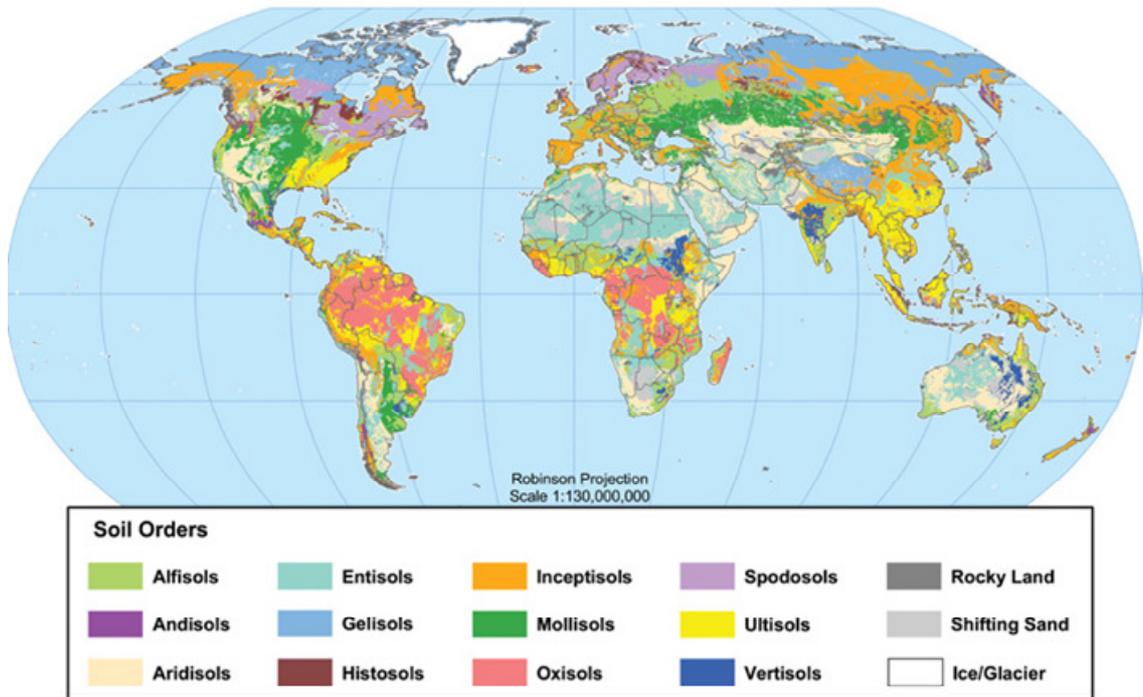
En el pasado, los suelos fueron básicamente considerados soporte de la producción agrícola. Este objetivo promovió programas de mejoramiento (obras para drenaje, labranzas) y abastecimiento (nutrientes, agua) del suelo. Estas prácticas fueron exitosas en aumentar la producción primaria. Sin embargo, afectaron negativamente otras funciones del suelo que impactaron sobre el ambiente (King 2007). En efecto, aproximadamente 85% de las tierras agrícolas del planeta están degradadas por erosión, salinización y compactación, entre otros procesos (Walker, Salt 2006).

La expansión de la agricultura está ampliamente reconocida como una de las más significativas alteraciones que tuvo el ambiente global. Actualmente se sabe que la intensificación de la agricultura, que en los últimos 50 años generó incrementos sustanciales en la producción de alimentos, puede tener consecuencias ambientales negativas a escalas local (como aumento de la erosión, compactación, disminución de fertilidad y reducción de la biodiversidad), regional (como la contaminación del agua subterránea y la eutrofización de cursos de agua superficiales) y global que incluye el impacto sobre el clima (Matson et al. 1997). Por esto, preocupa su sustentabilidad en el largo plazo y su efecto sobre el medio ambiente. En este sentido, el mayor desafío para la ciencia en el siglo XXI está enmarcado en el “desarrollo sustentable” que integra dos necesidades: el incremento de producción mundial de alimentos y la protección del ambiente (Matson et al. 1997).

1.1.2. Molisoles

Un componente fundamental de la producción agrícola global son los Molisoles. Se encuentran tanto en zonas semiáridas como subhúmedas, ocupando el 7% de la superficie libre de hielo, por lo general bajo cubierta de pastizales. Se sitúan en las latitudes medias: en las grandes planicies de los Estados Unidos, en Mongolia y las estepas rusas, en el sur de Australia, en el sur de África, en Brasil y en la Pampa Argentina (Figura 1). En general, son oscuros, ricos en materia orgánica y bases y provenientes de loess (Figura 2).

Global Soil Regions



US Department of Agriculture
Natural Resources
Conservation Service

Soil Survey Division
World Soil Resources
soils.usda.gov/use/worldsoils

November 2005

Figura 1. Distribución geográfica de órdenes de suelo. Fuente: NRSC

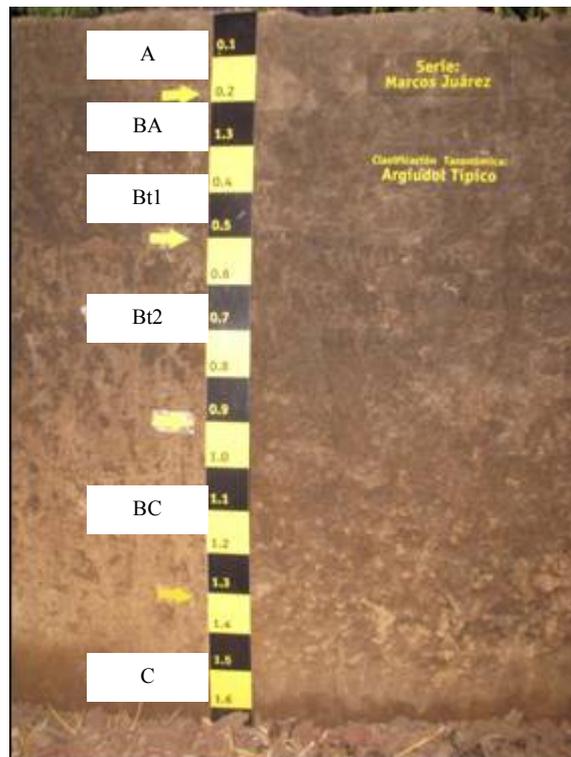


Figura 2. Perfil genético con la secuencia de horizontes característica de los Molisoles de la región pampeana.

El término loess, que significa “suelto” en idioma alemán, fue acuñado originalmente para denominar a los sedimentos limosos de origen eólico depositados en Europa y asociados con los diversos avances glaciares. Son depósitos masivos de granulometría comprendida entre 0,05 mm y 0,002 mm (por lo tanto, limosos), con proporciones variables de arena y arcilla. En Argentina, la zona bajo manto de loess cubre entre el 25% y el 30% del área total del país, aproximadamente 800.000 km² (Moll et al. 1988; Redolfi 1993).

El comportamiento físico de los suelos limosos de clima húmedo ha sido considerablemente estudiado por muchos autores. En general, se caracterizan por su susceptibilidad a compactarse, a formar estructura masiva y homogénea (Voorhees, Lindstrom 1984; Alakukku 1998; Topp et al. 2002). La escasa capacidad natural de regeneración de porosidad se agrava en suelos bajo uso agrícola debido al tránsito continuo y no controlado de implementos agrícolas y se mitiga con labores de remoción del suelo. Sin embargo, es también ampliamente conocido que el laboreo convencional conduce a una degradación edáfica generalizada de los suelos agrícolas, la cual incluye pérdidas de espesor del suelo por erosión, degradación estructural y reducción de los stocks de carbono y de nutrientes.

1.1.3. Molisoles bajo siembra directa

Para atenuar la degradación de suelos, varias décadas atrás se desarrollaron diversos programas de transferencia de adopción de sistemas de labranza conservacionistas como la reducción de laboreos, la utilización de labranza vertical y más recientemente, la siembra directa (SD). En 1935, con la fundación del Servicio de Conservación del Suelo de los EE.UU., se estimuló la creación de equipos de investigadores dedicados al laboreo de conservación en universidades norteamericanas. Paralelamente, en los países del norte de Europa, la combinación de los efectos negativos causados por el laboreo excesivo, particularmente con suelos húmedos, llevó a muchos investigadores a plantearse una reducción de las labores.

La SD comprende una serie de prácticas agronómicas que permiten un manejo del suelo con una perturbación mínima de su composición, estructura y biodiversidad (European Conservation Agriculture Federation, 1999). En términos generales, la cobertura de rastrojos en superficie (Figura 3) produce una mejora de la conservación del agua en el perfil, una reducción del escurrimiento superficial y una amortiguación del impacto de los rodados de los implementos agrícolas. En sus comienzos, debido a la inexistencia de herbicidas adecuados, las malezas constituían un factor limitante para el desarrollo de éste sistema. A fines de 1950, la empresa Imperial Chemical Industries (ICI) lanza al mercado el Paraquat (Gramoxone) e inicia estudios de investigación y difusión de la SD en Australia y luego en Brasil (Ekboir 2001, Fernández-Quintanilla, 1997).



Figura 3. Cultivo de soja (*Glycine max*) bajo siembra directa con rastrojo de trigo (*Triticum aestivum L.*) en superficie.

La FAO realiza y publica informes continuamente sobre la adopción global de la agricultura conservacionista. La SD se practica actualmente en alrededor de 95 millones de hectáreas en el mundo: aproximadamente 47% de esta superficie corresponde a América Latina, 39% a Estados Unidos, 9% a Australia y cerca de 3,9% a Europa, Asia y África (Derpsch 2005). En los últimos años, una gran expansión del área bajo SD (más de un millón de ha) ha sido reportada en China y Kazajstán. El área bajo SD está avanzando también en Europa. Hay alrededor de 650.000 ha en España, 200.000 ha en Francia y 200.000 ha en Finlandia. En Argentina, la superficie bajo SD ha ido incrementándose en los últimos 30 años hasta superar, en la actualidad, las 19 millones de ha (Figura 4). Actualmente, datos de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID) indican que el 69 % de la superficie agrícola se encuentra bajo este sistema de labranza (Ferrari 2010).

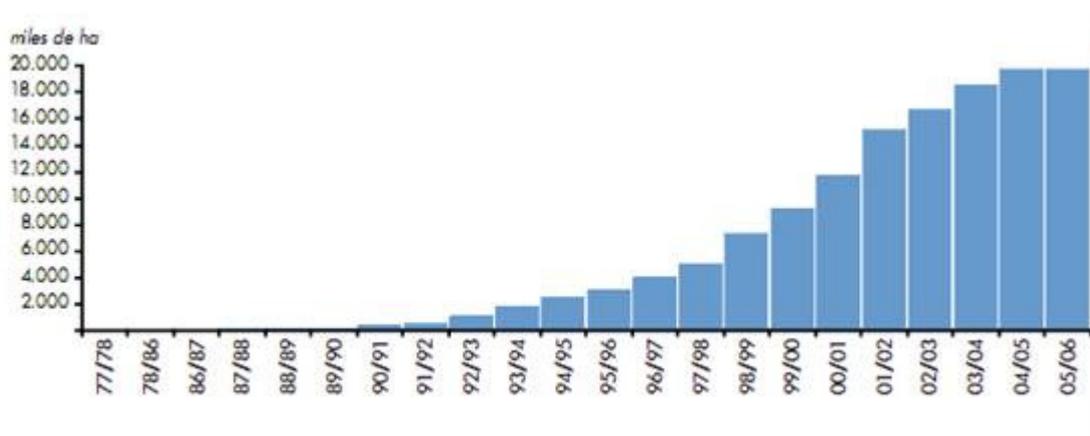


Figura 4. Evolución de la superficie bajo SD en Argentina. Periodo 1977/78-2005/06. Fuente: AAPRESID

1.1.4 Sistema de cultivo en Argentina

La SD en Argentina apareció como respuesta técnica al problema de degradación de los suelos laboreados y erosionados de la región pampeana. Sin

embargo, su difusión respondió fundamentalmente a razones económicas (reducción en el uso de combustibles fósiles) y a su simplicidad operativa. Así, desde 1993 hasta mediados de la década de 2000 la SD se expandió exponencialmente debido a la incorporación de las variedades de soja genéticamente modificadas y a la reducción del precio del glifosato posterior al vencimiento de su patente.

Esta simplificación en el manejo de los sistemas de producción, los acuerdos contractuales por arrendamiento de tierras en quintales de soja y la tendencia alcista de su precio internacional condujeron a un aumento de la superficie cultivada con esta oleaginosa. Así, los productores desbalancearon la rotación de cultivos, disminuyendo la superficie con cultivos de invierno (principalmente trigo) y produciendo el desplazamiento de pasturas hacia zonas marginales para la producción agrícola. Así, se generalizó el monocultivo de soja con operaciones culturales y de protección del cultivo simplificadas.

Como norma general, cualquier monocultivo es excluido como buena práctica agrícola, ya que impacta sobre la sustentabilidad del sistema en el largo plazo. En particular, el monocultivo de soja o su elevada frecuencia en la rotación generan balances negativos de carbono (C) y nutrientes debido a la rápida velocidad de reciclado de sus residuos con baja relación C:N que conduce a la degradación del suelo (Caviglia, Andrade 2010). Resultados de ensayos de largo plazo con alta frecuencia de soja confirman la reducción de los contenidos de C, N y P en el suelo (Studdert, Echeverría 2000; Alvarez 2001; Satorre 2005; Barbagelatta, Melchiori 2007; Salvagiotti et al 2008; Andriulo et al. 2008). Además, las secuencias de cultivo con alta frecuencia de soja son ineficientes en la captura de otros recursos como la radiación y/o el agua debido a que el suelo permanece con largos períodos de barbecho (Caviglia, Andrade 2010). Estos períodos sin cultivos y con baja cobertura de residuos en superficie contribuyen a tener pérdidas de agua por escurrimiento y de suelo por erosión (Sasal et al. 2010; Darder et al. 2010).

1.1.5. Estado estructural del suelo bajo siembra directa

Las distintas sucesiones de cultivos afectan no sólo la cantidad y calidad de residuos de cultivos que se incorporan al suelo, sino también la distribución y el tipo de sistemas radicales que intervienen directamente en la agregación y la estabilidad edáficas (Domzal et al., 1991). Además, las modificaciones de la estructura edáfica inducidas por las labranzas, o su ausencia, afectan las propiedades de transferencia, de almacenamiento y mecánicas del suelo.

Numerosos autores coinciden en que el principal problema de degradación física en los suelos limosos manejados con SD es la densificación del horizonte superficial originado por causas naturales (Connolly 1998; Neyde et al., 2003; Bresson, Moran 2003) o antrópicas (Hamza, Anderson 2005). Su impacto sobre el establecimiento, crecimiento y rendimiento de los cultivos ha sido considerablemente estudiado (Arvidsson, Håkansson 1996; Håkansson, Reeder 1994, Håkansson 1994; Lipiec et al., 1991; Oussible et al., 1992; Soane, Van Ouwerkerk 1995). Debido a su alta resistencia a la penetración y baja porosidad estructural, una capa densa confina las raíces de los cultivos a desarrollarse en capas superficiales, reduciéndose así tanto el volumen de suelo que puede ser explorado para el abastecimiento de agua y nutrientes como las

tasas de infiltración y aireación (Díaz-Zorita et al., 2002; Hammel 1994). Además, la densificación del horizonte superficial tiene impacto a escala regional debido al efecto negativo sobre el balance de agua ya que incrementa las pérdidas de agua por escurrimiento y, en consecuencia, disminuye la recarga potencial de acuíferos o traslada las zonas de recarga a posiciones relativamente más bajas del paisaje.

El proyecto de estimación global de la degradación de suelos (GLASOD) indicó que 68 Mha de tierras cultivables del mundo están afectadas por compactación, fundamentalmente debido al tránsito (Oldeman et al. 1991). El tránsito de la maquinaria agrícola con equipos de tamaño y peso creciente y las operaciones, fundamentalmente de cosecha, con humedad de la superficie del suelo más elevada que la óptima para el tránsito de ruedas, se encuentran entre las principales causas de la formación de una estructura masiva en el horizonte superficial de los suelos agrícolas (Buschiazzo et al. 1998; Quiroga et al. 1999; Radford et al. 2001; Richard et al. 1999; Roger-Estrade et al. 2004).

Aunque el agro-ecosistema es de naturaleza compleja y está en continuo cambio, la mayoría de los trabajos que describen características edáficas bajo SD abordan aisladamente la descripción de algunos “indicadores” de ciertas características de la porosidad edáfica, la agregación o algunas propiedades hidrológicas en situaciones contrastantes de tipos de suelo o climas luego de transcurrido cierto número de años de SD (Dabney et al. 2004; Hubbard et al. 2001; Kay, VandenBygaart 2002; Lal, Vandoren 1990). En general, la comparan con situaciones testigo bajo labranza convencional. Sin embargo, es escasa la bibliografía sobre la evolución de la estructura del suelo bajo SD y raramente se realiza un análisis integrado entre las modificaciones inducidas en los estados estructural e hídrico del suelo. Particularmente, Argentina carece de una cronosecuencia de mediciones reproducibles de la estructura de suelos bajo SD para analizar y comprender su evolución desde su adopción masiva en la década de 1990.

En los últimos años, algunos trabajos informaron observaciones de campo de una estructura laminar (con agregados alargados orientados paralelamente a la superficie del suelo) dentro de los primeros diez centímetros del horizonte superficial de suelos limosos bajo SD (Figura 5) (Alvarez et al. 2009; Ball, Robertson 1994; Bonel et al. 2005; Morrás et al. 2004; Pagliai et al. 1983; Sasal 2004; Sasal et al. 2006; Shipitalo, Protz 1987; Soracco et al. 2010; VandenBygaart et al. 1999). Se ha identificado que la importancia de la presencia de estructura laminar radica en que restringe el ingreso de agua al suelo.



Figura 5. Estructura laminar de los primeros centímetros de un Argiudol típico bajo SD. Ensayo de largo plazo de INTA Pergamino.

En trabajos previos y mediante la comparación de ensayos de larga duración en Pergamino, se determinó que la presencia de estructura laminar reduce al menos un 17 % la infiltración básica con respecto a una situación bajo SD sin esta estructura (Sasal et al. 2006). Para ejemplificarlo, la Figura 6 muestra una fotografía del horizonte superficial de un Argiudol ácuico bajo SD donde se realizó una medición de infiltración con permeámetro de disco conteniendo colorante *Blue Brillant* (Sasal et al. 2010). Posteriormente, se abrió un pozo de observación donde la coloración en el perfil edáfico indica la circulación del agua. Puede observarse que a diferencia del resto del perfil, la estructura laminar de 3 cm de espesor no fue coloreada por el pigmento. Este ejemplo gráfico sintetiza la función de la estructura laminar como limitante al ingreso y circulación de agua en el horizonte superficial bajo SD.



Figura 6. Fotografía del horizonte superficial de un Argiudol ácuico bajo SD donde se realizó medición de infiltración con colorante *Blue Brilliant*.

Si bien muy pocos trabajos abordan el estudio en particular de la estructura laminar, las evidencias de campo y los resultados encontrados indican que no aparece sistemáticamente en todas las situaciones bajo SD analizadas (Sasal et al. 2006; Álvarez et al. 2006). Por ende, se desconoce la importancia a escala regional de este tipo de estructura y, además, existe controversia sobre los factores que intervienen en su formación.

1.1.6. Factores que condicionan la formación de la estructura laminar

Existen varios factores que, con diversa preponderancia, han sido señalados por distintos autores como condicionantes de la formación de la estructura laminar bajo SD. Muchos trabajos europeos y canadienses atribuyen su formación a la creación de fisuras horizontales por cristales de hielo durante el invierno (Pardini et al. 1996; Hussein, Adey 1998; VandenBygaart et al. 1999). Evidentemente, esta explicación no es aplicable a las condiciones climáticas de la Región Pampeana.

La agregación en forma horizontal se atribuye también a los planos de debilidad causados por las presiones del tránsito (Bullock et al. 1985; Horn et al. 2003; Pagliai et al. 2003). Sin embargo, también se ha detectado estructura laminar continua en el horizonte superficial de situaciones con tránsito controlado, como por ejemplo un ensayo de largo plazo en Francia (INRA-Mons). Esta estructura está caracterizada por agregados alargados, paralelos a la superficie del suelo (Figura 7), y se desarrolla en forma continua, aún en sitios que en 16 años no han tenido pasaje de ruedas (Foy 2003).



Figura 7. Estructura laminar de los primeros centímetros del suelo bajo SD. Ensayo de tránsito controlado de largo plazo en INRA-Mons (Francia).

Al prescindir de los laboreos, el cambio de un sistema agrícola laboreado a uno bajo SD continuo incrementa la cohesión del suelo por el contacto partícula a partícula y la cementación, proceso conocido como “age-hardening” (Caron et al. 1992). Bajo SD, los cambios estructurales del suelo sólo pueden lograrse por procesos naturales entre los que se mencionan: la porosidad generada por la actividad biológica de raíces y fauna edáfica (canales) y las fisuras producidas por el congelamiento-descongelamiento (c-d) y/o por el humedecimiento-secado (h-s) (Voorhees 1983; Samouelian et al. 2003). En este sentido, Stengel et al. (1984) y Stengel y Bourlet (1987) indicaron que los suelos menos adecuados para la práctica de SD son aquéllos con un bajo índice de fisuración (sin arcillas expansibles) porque poseen escaso potencial para reestructurarse.

Las características mineralógicas de los suelos limosos no promoverían procesos de fisuración de importancia, debido a su escasa cantidad de arcillas expansibles. Sin embargo, la formación de estructura laminar por fisuración horizontal de una estructura densificada podría estar favorecida: i) por la actividad de las raíces de los cultivos que exploran la capa superficial siguiendo fisuras horizontales, y que poseen dificultades de profundización debido a la existencia de impedancias mecánicas subsuperficiales (capa masiva) e ii) por la escasa cobertura de residuos de cultivos en superficie, que es incapaz de atemperar los cambios de humedad edáfica superficial que acentúa los ciclos de h-s.

Sumado a esto, las circunstancias climáticas generan relaciones causa-efecto entre el estado estructural edáfico y el funcionamiento hídrico. Por ejemplo, el estado hídrico edáfico condiciona el riesgo de compactación por tránsito de la maquinaria agrícola y también, las variaciones en el estado hídrico edáfico pueden constituir una vía de reestructuración por ciclos de humedecimiento-secado.

Probablemente, no haya para analizar un sólo factor que origine la estructura laminar sino un conjunto de factores interrelacionados. Aunque quedaron sin respuesta muchos interrogantes en relación a su origen, la comparación entre ensayos de labranzas con diferentes rotaciones en Pergamino, pareciera adjudicar la aparición de este tipo de

estructura a secuencias de cultivos con elevada incidencia del cultivo de soja (Sasal et al. 2006). Probablemente, el accionar conjunto de diferentes combinaciones de secuencias de cultivos y condiciones climáticas puede imprimir diferentes estados estructurales a los suelos limosos bajo SD. Esto genera nuevos interrogantes relacionados al impacto de diferentes arquitecturas radicales, momentos de siembra y cosecha, tránsito y aportes diferenciales de residuos así como también de la influencia de características intrínsecas de los distintos tipos de estructuras presentes bajo SD sobre la evolución estructural.

1.1.7. Estructura bajo SD y su efecto sobre algunos componentes del balance de agua

Las variaciones temporales y espaciales en el estado estructural del horizonte superficial del suelo afectan su comportamiento hidrológico. La comprensión del funcionamiento hídrico bajo SD presupone analizar los términos de la ecuación del balance de agua (Figura 8) -infiltración, escurrimiento superficial, evapotranspiración y drenaje profundo- que se modificarán en función de la evolución de la estructura edáfica. El parámetro más evidente para cuantificar diferencias entre sistemas o efecto de un tipo de estructura presente en el perfil de suelo es el volumen de agua perdida por escurrimiento superficial.

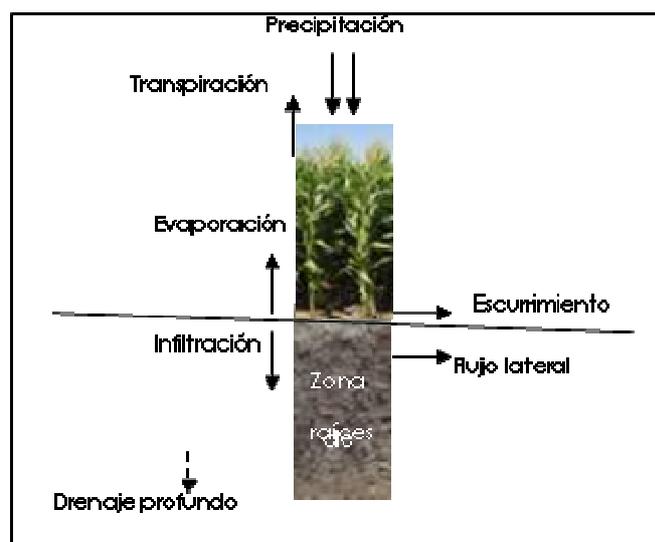


Figura 8. Diagrama del balance de agua en un cultivo

En los sistemas de producción agrícola, el agua disponible para los cultivos es un factor determinante de su rendimiento. Así, la pérdida de agua por escurrimiento superficial afecta el contenido de agua disponible para los cultivos, genera erosión hídrica y facilita el transporte de plaguicidas, nutrientes y otros solutos hacia cuerpos de agua (Tebrugge, During, 1999). Para mejorar la captación del agua de lluvia en el suelo bajo SD, no sólo es necesario analizar las características de las estructuras limitantes al ingreso del agua (continuidad, espesor y ubicación en el perfil), sino también hay que evaluar las características de las precipitaciones, de la cobertura y del tiempo de ocupación del suelo por los cultivos. La evaluación del impacto de distintos estados estructurales encontrados bajo SD sobre componentes del balance de agua permitirá

diseñar estrategias, a fin de asegurar que la evolución de la estructura edáfica no constituya una limitante a su sustentabilidad en el largo plazo.

1.2. HIPOTESIS

El horizonte superficial de suelos limosos bajo SD tiene un patrón estructural que combina distintas estructuras, con elevada frecuencia de aparición de estructura laminar cerca de la superficie. Esta estructura laminar es originada por fisuración horizontal, por ciclos de h-s, a partir de estructuras masivas generadas por aumentos de cohesión de las partículas edáficas y, eventualmente, incrementada por el tránsito con bajo volumen de cobertura.

La estructura laminar de los suelos manejados con SD altera el patrón de drenaje, restringe el ingreso de agua al suelo y aumenta el escurrimiento superficial en función de su proporción y continuidad en el perfil del horizonte A. La secuencia de cultivos implementada bajo SD condiciona la formación y las características de esta estructura. La comparación de la implementación de diferentes secuencias de cultivos permite identificar aquellas más sustentables.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Investigar la evolución de la estructura de los suelos limosos bajo SD, identificar los factores que la condicionan y medir las principales consecuencias hidrológicas de la presencia de diferentes tipos de estructuras en suelos bajo SD y su efecto sobre el balance de agua.

1.3.1 OBJETIVOS PARCIALES

- I. Caracterizar los estados estructurales existentes bajo SD a escala regional (Capítulo 2);
- II. Identificar las causas de la formación de la estructura laminar (Capítulo 3);
- III. Identificar características de la estructura que da origen a la estructura laminar (Capítulo 4).
- IV. Evaluar el efecto de la organización estructural bajo SD sobre algunos componentes del balance de agua (Capítulo 5).

CAPITULO 2

Estados estructurales bajo siembra directa

2.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos más frecuentemente cultivados en la región Pampeana Húmeda norte son los Molisoles desarrollados a partir de sedimentos eólicos (limosos) bajo pastizales, con regímenes údicos y térmicos. El Subgrupo de suelos (US Soil Taxonomy) más representativo de la región es el Argiudol típico (Hall et al., 1992). En esta región, se ha simplificado el sistema de producción de cultivos en las últimas dos décadas siendo las características más destacables de este proceso la elevada frecuencia del cultivo de soja en la rotación y el manejo con SD. Así, la relativa homogeneidad del suelo, del sistema de producción agrícola y de las condiciones climáticas, hacen a esta región interesante para estimar la evolución de la estructura del suelo relevando lotes de diferente antigüedad bajo SD.

Para poder abordar la evolución de la estructura, es necesario valerse de una metodología adecuada que permita evaluar la variación temporal y espacial de la estructura observada a campo, integrando los estados estructural e hídrico del suelo (Roger-Estrade et al., 2004). La técnica del perfil cultural es un método de descripción morfológica semi-cuantitativo de la estructura de suelos cultivados. Permite diferenciar visualmente distintas estructuras en el perfil de suelo, clasificarlas por las características macroscópicas que le imprimen los sistemas de cultivo y mapearlas (Manichon 1987), sin el disturbio que genera un muestreo o un tamizado, e independientemente de la humedad del suelo al momento de la medición (Boizard et al. 2002). En los últimos años, el alcance de esta metodología se ha potenciado con su combinación con el análisis de imágenes (fotografías).

La complementación de la técnica del perfil cultural con el análisis del sistema de porosidad, permite corroborar en laboratorio los tipos de estructura identificados visualmente a campo (Stengel 1979). Sin embargo, no exime al primer método de la subjetividad que imprime la habilidad del operador, al delimitar zonas o espesores correspondientes a los distintos tipos de estructura. Por ello, se propone la medición de resistencia al corte de suelos (RC) como herramienta de medición *in situ*, para discernir cuantitativamente qué tipo de estructura se presenta en cada perfil analizado.

En general, la mayoría de los trabajos que describen el estado estructural del horizonte superficial de los Argiudoles bajo SD de la región, informan densificación del horizonte por aumento en la cohesión de las partículas del suelo cuando se suspenden los laboreos (Senigagliesi, Ferrari 1993, Taboada et al., 1998; Cosentino y Pecorari, 2002), o por capas compactadas por tránsito o por antiguos pisos de arados o rastras (Alakukku et al. 2003). En efecto, los sistemas de labranza sin disturbio de suelos con alto contenido de limo y con arcillas de tipo illitas pueden conducir a la formación de estructuras masivas por vía natural o antrópica. Su impacto negativo sobre la circulación del agua, el desarrollo de los cultivos y los rendimientos ha sido extensamente estudiado (Arvidsson, Håkansson 1996; Lipiec et al. 1991; Oussible et al. 1992; Soane, Van Ouwerkerk 1995). Sin embargo, la evolución de esta estructura masiva o la caracterización de otros tipos de estructura presentes bajo SD son, al presente, aspectos considerablemente menos estudiados.

Muchos autores han informado observaciones de estructuras laminares en el horizonte superficial bajo SD en esta región (Alvarez et al. 2009; Bonel et al. 2005; Morrás et al. 2004; Sasal et al. 2006; Soracco et al. 2010). Debido a que estos resultados han sido obtenidos fundamentalmente en ensayos de largo plazo o en lotes de producción, no se ha sistematizado la información para conocer la importancia regional de la presencia de la estructura laminar en los suelos bajo SD. Además, el análisis del patrón estructural del horizonte superficial del suelo en función de algunas variables factibles de analizar a escala regional, como los años de duración de la SD o la secuencia de cultivos, puede contribuir a identificar factores que condicionan la evolución de la estructura del suelo bajo SD en suelos limosos.

Las hipótesis planteadas en este capítulo son:

- el horizonte superficial de los suelos limosos bajo SD tiene un patrón estructural que combina distintas estructuras con características mecánicas y de porosidad bien diferenciadas,
y
- la frecuencia de aparición de la estructura laminar en suelos limosos bajo SD de la región Pampeana Húmeda Norte es elevada y está asociada a la duración de la SD y a la secuencia de cultivos.

Los objetivos de este capítulo fueron:

- i) caracterizar los tipos de estructura presentes en horizontes superficiales de Argiudoles bajo SD de la región Pampeana Húmeda Norte,
y
- ii) evaluar la ocurrencia de estructura laminar y determinar los factores que controlan el desarrollo de la estructura laminar a escala regional.

2.2. MATERIALES Y METODOS

La Pampa Húmeda Norte cubre alrededor de 165.000 km² y está localizada entre 31° y 35° S y 58° y 63° W (Figura 9). Tiene superficie ondulada con pendientes de 0,5-2%. La región tiene clima subhúmedo (lluvia anual ≈1000 mm) y templado. Aproximadamente, 75% de las lluvias ocurren en primavera y verano. Las temperaturas en invierno raramente son inferiores a 0°C y los veranos son muy cálidos. Entre 50 y 75% de la superficie de la región se usa anualmente para cultivos agrícolas (Hall et al. 1992). Los principales cultivos son la soja (S), el doble cultivo trigo/soja (T/S) y el maíz (*Zea mays*) (M).

Se seleccionaron 25 sitios en lotes agrícolas (Figura 9) siguiendo cuatro requisitos: i) tipo de suelo Argiudol típico fino, illítico, térmico (US Suelo Taxonomy)/Luvic Phaeozem (WRB), ii) lomas bien drenadas y sin fases por erosión, iii) bajo SD continua (solo herbicidas para control de malezas y al menos tres años sin labranza), y iv) provisto de registros detallados de rotación de cultivos y de manejo del suelo. Los datos de ocho de estos sitios ya habían sido publicados (De Battista et al., 1997; Ferreras et al., 2001; Gerster y Vidal 1997), mientras que los restantes 17 sitios fueron colectados entre 2008 y 2010. La textura de los horizontes A fue franco limosa con 200-300 g kg⁻¹ y 600-650 g kg⁻¹ de arcilla (<2 μm) y limo (50-2 μm), respectivamente. El

horizonte argílico frecuentemente presenta leves impedimentos a la permeabilidad del agua y la penetración de raíces, pero el anegamiento raramente ocurre.



Figura 9. Ubicación de los sitios de estudio en la Pampa húmeda norte (Google Earth, Septiembre 2010).

Todos los suelos fueron muestreados durante el invierno, luego de la cosecha de los cultivos de verano. Cada sitio de muestreo fue localizado con un GPS (Global Positioning System). Además, se realizó una encuesta en cada sitio para recopilar información sobre las secuencias de cultivos, la duración de la SD (años), el porcentaje de soja en la secuencia de cultivos (Número de años con soja / Número de años de cultivo continuo x 100), el tránsito de maquinaria, fechas de siembra y cosecha y duración del barbecho. Las principales características de los sitios seleccionados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales características de los sitios de estudio

Series de Suelo	Fuente	Número de años bajo SD	Cultivos Secuencia	Número de años de cultivo continuo	Número de años con soja	Porcentaje de soja en la secuencia	Índice de Intensificación de la secuencia (%)
Los Cardos	De Battista et al. (1997)	4	T/S	10	3	75	0.75
Los Cardos	De Battista et al. (1997)	4	T/S	10	3	75	0.75
Humboldt 2	De Battista et al. (1997)	4	T/S	4	3	75	0.75
Villa Eloisa	Gerster y Vidal (1997)	4	S-T/S-S-T/S	4	3	75	0.58
Loma alta	De Battista et al. (1997)	5	T/S	9	4	80	0.75
Clason	De Battista et al. (1997)	5	T/S	7	4	80	0.75
Casilda	Ferreras et al. (2001)	6	T/S-S-M-T/S-M-S	30	4	67	0.56
Villa Eloisa	Gerster y Vidal (1997)	9	PPPP-T/S-S-T/S	4	3	33	0.66
Pergamino		9	T-P-P-S-T/S-S-M-S-S	10	5	56	0.59
Pergamino		9	T-P-P-S-T/S-S-M-S-M	10	4	44	0.60
Tezanos Pinto		11	M-T/S	14	6	55	0.63
Don Yrés		11	S-M	11	6	55	0.46
Pergamino		11	T-P-P-S-T/S-S-M-S-S-S-S	12	7	64	0.48
Pergamino		11	T-P-P-S-T/S-S-M-S-M-T/S-M	12	5	45	0.61
Granero		12	M-T/S	12	6	50	0.63
Tezanos Pinto		12	S	40	12	100	0.42
Tezanos Pinto		12	M-T/S	40	6	50	0.63
Tezanos Pinto		12	T/S	40	12	100	0.75
Hansen		16	M-T/S	39	8	50	0.63
Pergamino		19	S	28	19	100	0.42
Pergamino		22	S	31	22	100	0.42
Pergamino		24	S	33	24	100	0.42
Hansen		25	M-T/S	25	12	50	0.63
Pergamino		26	M-T/S	28	13	50	0.63
Pergamino		29	M-T/S	31	15	52	0.63

S= soja, T/S= doble cultivo trigo/soja, M= maíz, P= pastura

Se evaluó el estado estructural del suelo en un perfil de 1 m de ancho y 0,3 m de profundidad, excavado en forma perpendicular a la dirección de siembra, usando la metodología del perfil cultural (Manichon 1987). Esta metodología de descripción morfológica de un corte longitudinal del horizonte superficial está basada en la observación de la porosidad visible de terrones y su arreglo espacial.

Los perfiles de suelo se fotografiaron a una distancia de 0,6 m y cada 0,35 m en dirección lateral. Las fotografías se ensamblaron para obtener la imagen del perfil completo. El área cubierta por diferentes tipos de estructura se midió usando el software ImageJ (Rasband W., National Institute of Health, Bethesda, Maryland, USA) luego de la delimitación manual. Se identificaron cuatro tipos de estructura:

1. Delta (Δ): zonas compactas con estructura masiva delimitada en base a la ausencia de porosidad visible, con elevada cohesión y con caras de ruptura lisas (Manichon 1987; Guerif et al. 1994).

2. Gamma (Γ): zonas de estructura masiva con porosidad estructural claramente visible entre agregados constitutivos y terrones.
3. Granular: estructura con gránulos que aparece principalmente cerca de la superficie del suelo y está asociada a la presencia de raíces.
4. Laminar: estructura con agregados delgados y poros preferencialmente orientados en forma horizontal.

La proporción de diferentes tipos de estructuras de suelo observadas en el perfil se calculó relacionando el área medida y el área total del horizonte A. El espesor de la estructura laminar también fue medida a campo y se registró su continuidad en el corte longitudinal del perfil del suelo.

En cada tipo de estructura se tomaron muestras para realizar el análisis del sistema de porosidad (distribución de poros por origen). Este es un análisis físico cuantitativo de la estructura que discrimina la fase sólida del suelo de la fase de vacíos, complementaria, que constituye la porosidad del suelo (Stengel 1979). El espacio poroso se divide en: (i) volumen poroso textural: resultante de la distribución espacial de las partículas elementales dependiente de la constitución mineral (arcilla, limo, arena) y orgánica del suelo y su ensamblaje así como del tenor de agua y (ii) volumen poroso estructural: presente entre los agregados estructurales y directamente ligado a acciones antrópicas, climáticas y biológicas.

La distribución de poros por origen se basa en la clásica determinación a campo de densidad aparente (Dap) con el método del cilindro (Burke et al. 1986), que se complementa con la técnica de densidad aparente textural (Dat) en kerosén (Stengel 1988). La Dat considera el volumen ocupado por la parte sólida y el espacio de poros texturales. Se determina a partir de la Dap de agregados de 2-3 mm de diámetro a la humedad de campo, estimada usando impregnación en kerosén y el método de peso hidrostático basado en el principio de Arquímedes (Monnier et al. 1973; Stengel 1979). Se extrajeron muestras de suelo no disturbadas (cilindros de 0,03 m altura y 0,05 m de diámetro) para determinar Dap de cada tipo de estructura. Luego, se obtuvo la porosidad estructural (PE) a partir de Dap y Dat ($PE = (1 - (Dap/Dat)) \times 100$). Esta técnica se utilizó para corroborar que las zonas identificadas con estructura masiva Δ se caracterizaran por tener PE despreciable.

La RC se midió *in situ* para cada tipo de estructura de suelo en 15 de los 25 sitios. Se utilizó un equipo manual (Eijkelkamp) con una paleta de 35 mm de altura y 19 mm de diámetro compuesta de 8 palas (Figura 10). La paleta fue enterrada en la pared vertical del perfil de cada tipo de estructura (3 repeticiones) y se realizó una torsión suave (Figura 11). El valor de torque (Newton-metro) aumenta para alcanzar su valor máximo justo antes de la ruptura del suelo, luego descende. El valor de torque máximo fue registrado. La ventaja de realizar esta medición, en este estudio, es que puede brindar información local para cada estado estructural.



Figura 10. Equipo manual para medición de resistencia de suelos al corte.



Figura 11. Medición *in situ* de resistencia de suelos al corte en el perfil del horizonte superficial del suelo.

Finalmente, se calculó un índice de intensificación de la secuencia (ISI) relacionando el número de meses ocupados por cultivos en el año con el número total de meses del año (Caviglia y Andrade 2010; Sasal et al., 2010) (Tabla 1). Por ejemplo, un monocultivo de soja ocupa anualmente (12 meses) aproximadamente 5 meses y un doble cultivo trigo/soja de segunda fecha de siembra ocupa 9 meses (5+4) en el año, siendo el ISI 0,42 y 0,75, respectivamente.

2.2.1. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza y test LSD para los datos de PE y RC, usando el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute Inc. 1989). Se realizaron análisis de regresión simple para explicar relaciones entre número de años bajo SD, número de años con soja, número de años de agricultura continua e ISI con la proporción de tipos de estructura encontrados usando el procedimiento REG de SAS (SAS Institute Inc. 1989). También se usó análisis de correlación (Proc CORR) para relacionar las proporciones de diferentes tipos de estructuras del suelo.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSION

2.3.1. Patrón estructural del horizonte superficial

Los sitios muestreados registraron 4 a 29 años consecutivos de SD, 4 a 40 años sin pasturas y 3 a 24 años con presencia de soja dentro de la rotación de cultivos, representando entonces una proporción de 33 a 100% soja con respecto a los demás cultivos (Tabla 1). Aunque cada uno de los sitios analizados tuvo un manejo diferente, mediante las observaciones pudo revelarse un patrón general de organización vertical de la estructura del suelo. La Figura 12 muestra un ejemplo de un perfil con los cuatro tipos de estructura identificados: granular, laminar, Γ y Δ .

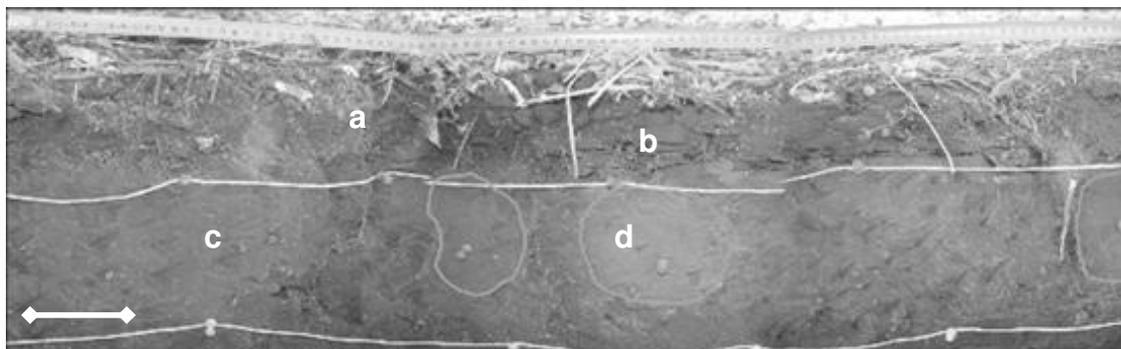


Figura 12. Perfil cultural representativo bajo siembra directa (a) estructura granular; (b) estructura laminar; (c) estructura Γ y (d) zonas Δ . Longitud de la barra = 10 cm

En 72% de los sitios, los primeros centímetros presentaron una estructura granular esponjosa bien explorada por raíces. Todos los sitios exhibieron una estructura laminar horizontal desarrollada directamente desde la superficie del suelo o justo debajo de la estructura granular (ejemplo en Figura 12). La estructura laminar con característicos poros planos interconectados tuvo 2 a 10 cm de espesor, y representó 4,5 a 58% del total del área vertical del horizonte A. La estructura laminar se presentó predominantemente continua (68% de los sitios) y no circunscripta sólo a áreas con huellas de rodados. Estos resultados sugieren que la presencia de la estructura laminar está extendida en los suelos de la región, revelando que la formación de la estructura laminar bajo SD es la regla más que la excepción.

Debajo de la capa de estructura laminar, se observó una zona con estructura Γ (con porosidad estructural) en todos los sitios. Esta representó 30 a 75% del total del área del horizonte A, con zonas localizadas con estructura Δ (compactada, con porosidad no visible) dentro de esta capa Γ en 44% de los sitios. Sin embargo, estas zonas Δ fueron generalmente despreciables ya que no representaron más de 20% del horizonte A. Se observó desarrollo de raíces dentro de los poros alargados (planos), separando agregados en las zonas con estructura laminar, y también entre terrones de la estructura Γ .

2.3.2. Porosidad estructural y resistencia de suelo al corte

El análisis de la porosidad estructural y de la resistencia del suelo al corte de cada tipo estructura identificada para 15 sitios (Figura 13) fue revelador por dos aspectos. Por un lado, las diferencias claras y significativas ($p < 0,05$) entre los valores de ambas variables para los 4 tipos de estructuras identificadas mostró la importancia de la aproximación morfológica por observación visual para clasificar la estructura del suelo. En particular, el uso del equipo manual para medición de RC resultó un método sencillo para corroborar *in situ* la observación visual de las estructuras. Por otro lado, analizando los valores de PE y de RC, las estructuras granular y Δ parecen definir respectivamente el mejor y el peor estado del suelo, respectivamente, en términos de compactación. En este sentido, los tipos de estructura Γ y laminar son intermedios. La estructura Γ puede ser considerada como una “buena” estructura, en comparación con Δ . Sólo considerando la PE o la RC se puede sugerir que su evolución hacia una estructura laminar es deseable. Sin embargo, sólo un mayor conocimiento de cómo se desarrolla la estructura laminar, i.e. desde una estructura previamente compactada o no, podría contribuir a definir si el desarrollo de la estructura laminar contribuye a la regeneración o la degradación del suelo.

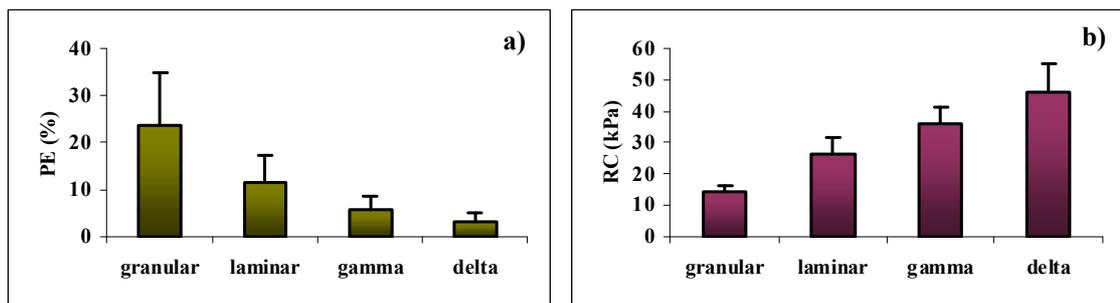


Figura 13. a) Porosidad estructural (PE) y b) Resistencia del suelo al corte (RC) para los cuatro tipos de estructura identificados en el horizonte superficial bajo SD. Las barras indican desvío standard.

2.3.3. Factores que controlan el desarrollo de la estructura laminar

2.3.3.1. Antigüedad de la siembra directa

Se encontró una relación significativa, que podría aproximarse a una curva cuadrática ($y = -0.2239x^2 + 7.092x - 12.338$; $R^2 = 0,60$), entre el número consecutivo de años bajo SD (x) y la proporción de estructura laminar en el perfil del horizonte superficial (y) (Figura 14). Se registró una tendencia general hacia un incremento en la proporción de la estructura laminar durante los primeros 15 años bajo SD. Esto es consistente con los hallazgos de Kay y VandenBygaart (2002), ya que ellos informan que 15 años de SD fue la duración que proveyó información confiable a los efectos acumulados de la SD sobre la porosidad total, fragmentación, compactación, actividad de la fauna suelo y distribución de la materia orgánica. Esto es esperable ya que mientras los cambios inducidos por labranzas y tránsito pueden ocurrir en un lapso de tiempo relativamente corto (días), los cambios debidos a variaciones en la población y actividad de organismos o en las características de la materia orgánica son más lentos (años o hasta décadas) (Kay y VandenBygaart 2002).

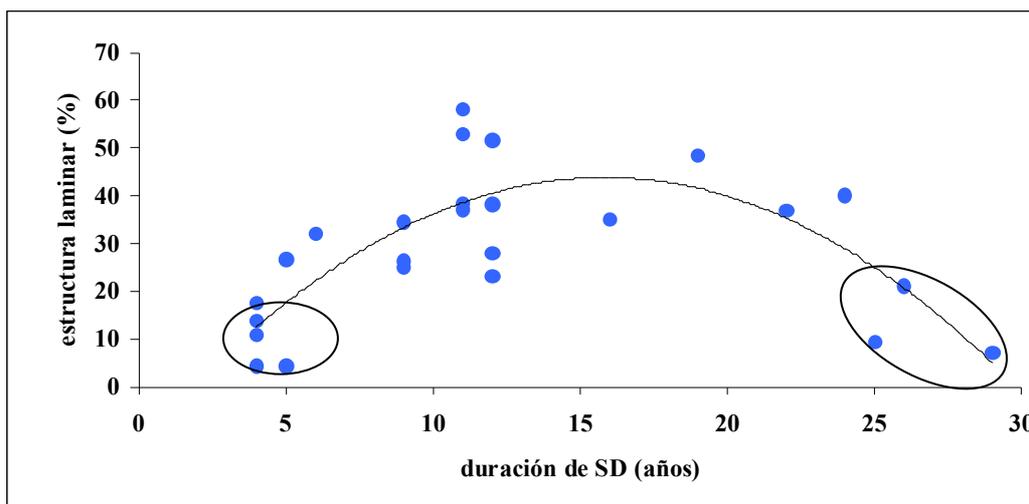


Figura 14. Relación entre años bajo SD y proporción de estructura laminar en el perfil del horizonte superficial en la Pampa Húmeda norte. Los círculos muestran sitios con estructura laminar discontinua.

Luego de 10 a 15 años, la proporción de estructura laminar tiende a estabilizarse y puede disminuir luego de 20-25 años, aunque esta disminución observada está sustentada por un bajo número de observaciones (Figura 14). La dificultad en obtener sitios con una larga historia de SD se debe a la relativa reciente adopción de esta práctica en la región y a que sistemas de SD continuos son interrumpidos con labores ocasionales.

La baja proporción de estructura laminar en los primeros años de SD y en el largo plazo (Figura 14) coinciden con una capa discontinua de estructura laminar. A largo plazo, las interrupciones (discontinuidad) observadas en la capa de estructura

laminar tenían estructura granular asociada a la actividad biológica, fundamentalmente raíces de los cultivos (Figuras 15 y 16). Especialmente en aquellos sitios con $ISI > 0,6$, los primeros centímetros presentaron estructura granular. En consecuencia, este tipo de relación cuadrática (Figura 14) podría ser el resultado de la combinación de dos procesos: 1) la formación inicial de la estructura laminar, que disminuye con la profundidad y la disminución de la influencia de las condiciones externas y 2) el desarrollo tardío de estructura granular desde la superficie, en detrimento de la estructura laminar.

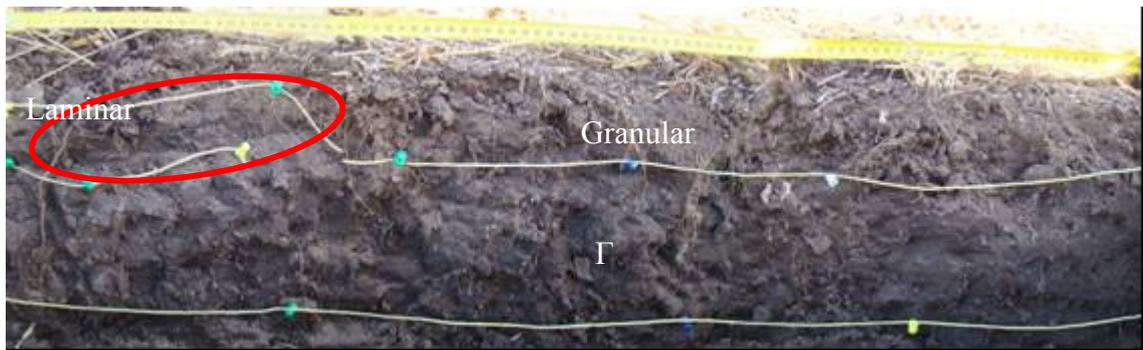


Figura 15. Perfil cultural del horizonte superficial de un Argiudol típico serie Pergamino con 29 años bajo SD.

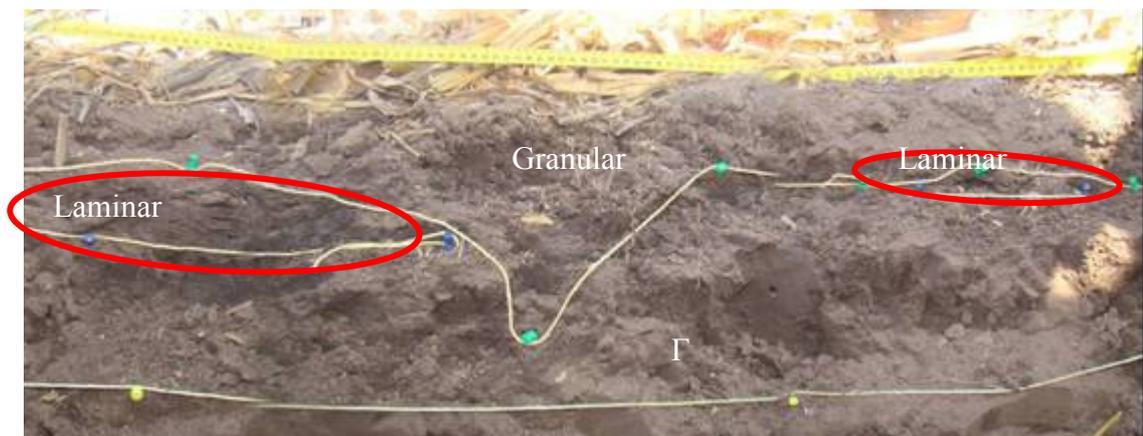


Figura 16. Perfil cultural del horizonte superficial de un Argiudol típico serie Hansen con 25 años bajo SD.

2.3.3.2. Secuencias de cultivo

Pueden considerarse una suma de factores condicionantes del patrón estructural del suelo y de su evolución bajo SD. Ni la duración de la agricultura continua ni la presencia de soja en la rotación de cultivos se relacionaron con la proporción de estructura laminar. Sin embargo, el grado de intensificación del sistema de cultivo, medido como ISI, parece afectar el desarrollo de la estructura laminar. La Figura 17 muestra una relación negativa entre el ISI y la proporción de estructura laminar ($R^2=0,57$, $p<0,01$). A mayor ISI, menor la proporción de estructura laminar.

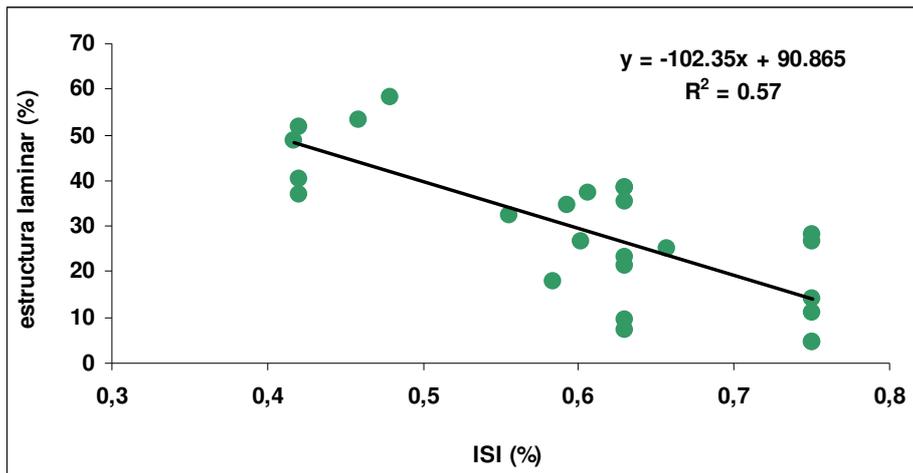


Figura 17. Regresión lineal entre el índice de intensificación de la secuencia (ISI) y la proporción de estructura laminar (%).

Aunque el término intensificación puede asociarse con un incremento en la productividad a través de un incremento en el uso de insumos, también puede asociarse a un incremento en la captura de recursos disponibles (como radiación y agua) y al mejoramiento en el rendimiento de cultivos por unidades de tiempo y superficie (Caviglia y Andrade 2010). En este sentido, el índice de intensificación de la secuencia depende básicamente del período del año ocupado por cultivos (con raíces activas) en cada secuencia. Numerosas variables están implícitamente relacionadas con el ISI, como por ejemplo la agregación, la distribución de poros por tamaño y la orientación o la estabilidad de la estructura, que están afectadas por la cantidad y la calidad de los residuos de cultivos así como por el tipo y la distribución del sistema radical (Domzal et al. 1991, Sasal et al. 2006). Además, otra característica importante de la secuencia de cultivos, como la condición de humedad del suelo durante la cosecha, está integrada en este índice. Por ejemplo, en aproximadamente cinco años entre diez, la cosecha de soja se lleva a cabo durante un período de elevadas precipitaciones a fin de verano-comienzo del otoño en la región (Rebella, de Zeljkovich 1980), mientras que el maíz y el trigo usualmente se cosechan en condiciones de suelo seco.

En trabajos previos se encontró relación negativa entre el ISI y el escurrimiento o la erosión hídrica y relación positiva con el contenido de carbono del suelo (Darder et al. 2010; Novelli et al. 2009; Sasal et al. 2010). Las secuencias más intensificadas, con períodos de barbecho despreciables, tuvieron los mayores valores de ISI que fueron asociados con las menores tasas de escurrimiento y erosión hídrica. Por el contrario, el monocultivo de soja tiene el menor valor de ISI. Esta asociación entre bajos valores de ISI e indicadores de degradación de suelos sustenta la idea de que el desarrollo de estructura laminar es negativo para las propiedades del suelo. Esto es coherente con hallazgos anteriores que la estructura laminar restringe el ingreso de agua al suelo (Sasal et al. 2006).

2.3.3.3. Interacciones entre diferentes estructuras de suelo

Las proporciones de estructura laminar y Γ estuvieron negativamente correlacionadas mientras que la estructura laminar fue independiente de las proporciones de estructuras granular y Δ . La Figura 18 muestra tres modelos propuestos para analizar la relación entre las estructuras laminar y Γ : a) un modelo de regresión lineal simple ($R^2=0,56$) (línea punteada roja), b) un modelo simple de “reemplazo” $\Gamma = \Gamma_0 - \text{laminar}$ (línea punteada azul) y c) un modelo lineal “restringido” $\Gamma = \Gamma_0 - b \times \text{laminar}$, con la restricción de que la suma de proporciones de estructuras $\Gamma + \text{laminar}$ sea siempre ≤ 100 (línea continua roja). El último modelo previene de valores erróneos como estructuras laminar+ Γ que exceden el 100% en el modelo de regresión simple. El modelo simple de reemplazo considera que las proporciones de estructuras laminar y Γ son totalmente complementarias (e independientes de las estructuras Δ o granular). El modelo de mejor ajuste (lineal “restringido”) indica que la estructura laminar se desarrolla en detrimento de Γ pero también parcialmente de estructuras Δ y granular. Además, como la presencia de la estructura Δ es despreciable en la mayoría de los casos, la proporción de estructura granular es dependiente de la suma de las estructuras $\Gamma + \text{laminar}$ ($R^2=0,77$).

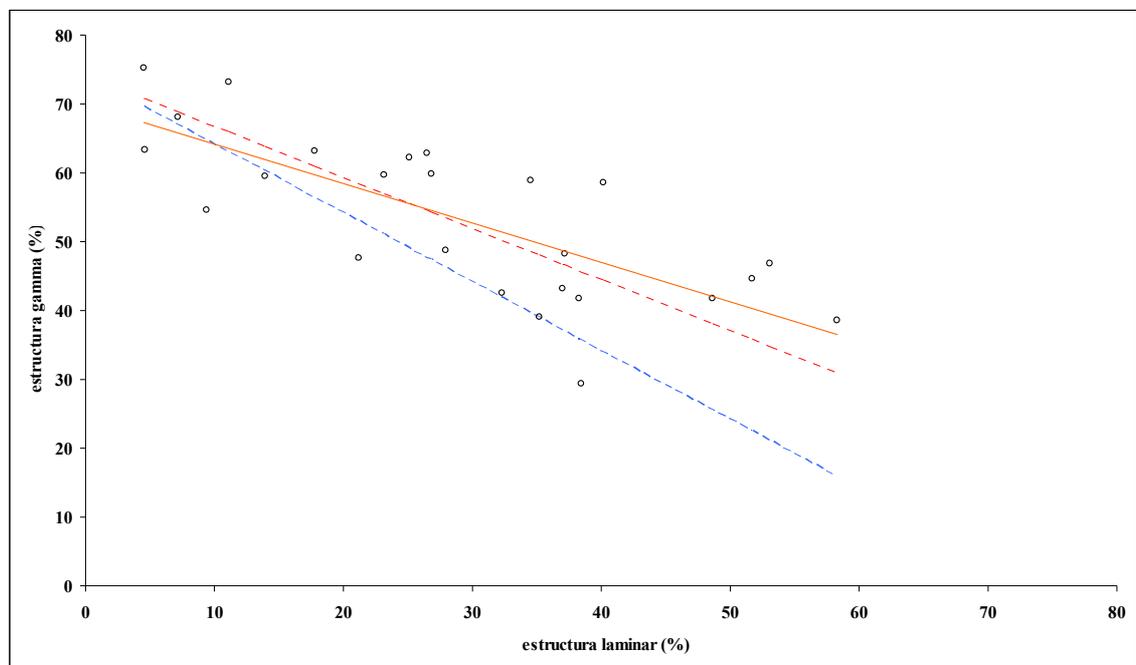


Figura 18. Relación entre las proporciones de estructura laminar y Γ (gamma) en perfil del horizonte A en la Pampa Húmeda Norte. La línea punteada roja corresponde al modelo de regresión simple. La línea punteada azul corresponde al modelo simple de reemplazo: $\Gamma = \Gamma_0 - \text{laminar}$. La línea continua roja corresponde al ajuste del modelo lineal $\Gamma = \Gamma_0 - b \times \text{laminar}$, con la restricción de que $\Gamma + \text{laminar}$ es siempre ≤ 100 .

Los resultados obtenidos muestran una fuerte relación inversa entre las proporciones de estructuras laminar y Γ . En efecto, la evolución de la proporción de estructura Γ con los años consecutivos bajo SD puede ser también aproximada a una cuadrática. La estructura Γ decreció con el número de años bajo SD durante los primeros 15 años (la proporción de estructura laminar se incrementó), y luego mostró una tendencia creciente (datos no mostrados). Como la estructura Γ estuvo presente en todos los sitios, su proporción fue superior a 30% del área del horizonte A y además, debido a que la predominancia de la estructura laminar sobre la estructura Γ fue

progresiva con los años de SD, se puede hipotetizar que la estructura laminar se desarrolla en detrimento de la estructura Γ . Boizard et al. (2009) encontraron en un ensayo de larga duración en Mons (Francia) que, en ausencia de labores de remoción, una estructura masiva (Δ) evolucionó hacia una estructura laminar por fisuras durante el humedecimiento. Estos autores informaron que la profundidad máxima alcanzada por la estructura laminar fue 15 cm luego de 3 años.

La Argentina carece aún de una crono-secuencia de perfiles de suelo con mediciones cuantitativas y reproducibles de la estructura de suelo bajo SD, que permita analizar y comprender la evolución de la estructura del suelo desde su adopción masiva después de 1990. En consecuencia, se utilizó el método del perfil cultural en 25 sitios con diferente duración de SD para estimar su evolución y proponer un modelo sobre su origen. Se propone que el desarrollo de la estructura laminar puede ser un paso intermedio para la regeneración de la estructura luego de la implementación de SD en suelos limosos. El primer paso en esta evolución sería la consolidación natural del suelo luego de la interrupción de las labores agrícolas, debido a las características mineralógicas de los Molisoles de la Pampa. El segundo paso en este proceso sería la formación progresiva de la estructura laminar en detrimento de la estructura Γ , hasta que se torna continua y extendida completamente en los primeros 10 cm de profundidad del horizonte superficial. Finalmente, y con secuencias de cultivo intensificadas, la capa continua de estructura laminar se discontinúa y minimiza por actividad de organismos y raíces conduciendo a la regeneración estructural del suelo. Si bien, los resultados de este capítulo sugieren esta hipótesis, no permiten poner a prueba esta sucesión de pasos.

2.4. CONCLUSIONES

El método del perfil cultural fue utilizado para: conocer la organización estructural de suelos limosos bajo SD, poner en evidencia la extensión regional de la estructura laminar y estudiar su evolución e hipotetizar sobre su origen. Esta aproximación semi-cuantitativa fue complementada con mediciones de PE y RC, que permitieron corroborar las observaciones de los cuatro tipos de estructura identificados bajo SD y determinar más precisamente sus espesores y límites.

Los resultados obtenidos permitieron mostrar que el desarrollo de estructura laminar está generalizado en la Pampa Húmeda Norte. La proporción de estructura laminar en el perfil está asociada con el número de años bajo SD. El ISI también resultó un buen indicador de su proporción en el horizonte superficial. Hubo una tendencia general hacia un incremento en la extensión de la estructura laminar durante los primeros 15 años de SD, y una estabilización y aún un descenso luego de 20-25 años. Esta compleja evolución puede resultar de la combinación de un desarrollo rápido inicial de la estructura laminar, principalmente en detrimento de la estructura masiva gamma, y un desarrollo tardío de estructura granular desde la superficie del suelo.

La comprensión de los procesos que controlan la evolución observada de la estructura del suelo bajo SD requiere evaluaciones adicionales, particularmente a una escala más detallada. La caracterización de la cinética de desarrollo de distintas estructuras de suelo y la identificación de los factores ambientales y antrópicos que los controlan, especialmente incluyendo un largo plazo, requiere aproximaciones de campo y de laboratorio. En los próximos Capítulos, se analizarán algunos ensayos realizados

para aislar o identificar causas y efectos del patrón estructural de suelos limosos bajo SD.

CAPITULO 3

*Factores que pueden intervenir en la formación
de la estructura laminar*

3.1 INTRODUCCIÓN

La formación de una estructura laminar está generalizada en el horizonte superficial de suelos limosos bajo SD de la región Pampeana Húmeda Norte. Los resultados del Capítulo 2 indican que, a escala regional, la proporción de la estructura laminar puede asociarse con la duración de la SD y con la secuencia de cultivos. A escala de detalle, podría profundizarse el estudio de los factores que intervienen en la formación de esta estructura a través del estudio de variables antrópicas, climáticas y de la actividad biológica dependientes de la historia de manejo de un lote y de las características del sistema de cultivo.

El sistema de producción agrícola predominante en la región se caracteriza por la elevada frecuencia de soja en la secuencia de cultivos. En este sistema, el período de tránsito más intenso (cosecha) ocurre durante el otoño, generalmente con contenidos hídricos edáficos superiores a los requeridos para evitar la compactación por el tránsito de rodados y con bajo volumen de rastros en superficie para atenuar este impacto.

Stengel y Bourlet (1987) hallaron que el proceso de fisuración por ciclos de humedecimiento-secado (h-s) puede ser muy importante para la regeneración de la estructura de suelos compactados, especialmente cerca de la superficie. En un estudio realizado en un suelo con arcilla expansible, estos autores mostraron que la intensidad de la regeneración de estructura en suelos compactados depende de la tasa de desarrollo de las fisuras. Los cambios en el volumen de suelo y los fenómenos de fisuración asociados durante los ciclos de h-s son considerados factores abióticos importantes que afectan la estructura del horizonte superficial de suelos arcillosos. Sin embargo, la ocurrencia de este fenómeno en suelos limosos ha tenido considerablemente menos atención (Taboada et al. 2004, Taboada et al. 2008).

Por otro lado, si la compactación, expresada en términos de Dap o resistencia del suelo, alcanza niveles considerados críticos para el crecimiento de las raíces, puede haber engrosamiento, desviación con respecto a la dirección vertical de crecimiento y concentración de raíces cerca de la superficie (Reinert et al. 2008). En efecto, cuando las raíces encuentran una capa resistente se produce la proliferación de finas raíces laterales y, más que su longitud total, cambia la distribución espacial de su sistema radical, incrementándose la superficie específica y la exploración del suelo (Calonego, Rosolem 2010). Por otro lado, la estructura laminar se caracteriza porque sus macroporos están predominantemente orientados en forma horizontal (Sasal et al. 2006), siendo menos efectivos en promover el crecimiento en profundidad de las raíces que poros verticales de similar tamaño y continuidad (Drees et al. 1994; Pagliai et al. 1983; VandenBygaart et al. 1999). Así, la exploración de la capa superficial del suelo (menos compactada) por las raíces en la búsqueda de bioporos o grietas verticales para profundizar, podría contribuir también con la formación de la estructura laminar (Rosolem y Takahashi 1998).

En este capítulo se propone poner a prueba tres hipótesis sobre la formación de la estructura laminar:

1. Las presiones generadas por el tránsito, fundamentalmente durante la cosecha de los cultivos estivales, puede conducir a la estratificación de agregados elongados en los primeros centímetros del suelo bajo SD.
2. La estructura laminar bajo SD puede desarrollarse a partir de un estado masivo y/o compactado por fisuración debida a ciclos de h-s.
3. La densidad aparente de la estructura masiva que subyace a la estructura laminar es crítica para el crecimiento de las raíces, favoreciendo su crecimiento lateral entre los agregados de la estructura laminar.

La primera se sustenta en analizar la ocurrencia de la estructura laminar bajo SD como un caso de *degradación* de la estructura. Es decir, en un suelo transitado, los macroporos colapsan y los agregados se acercan debido a que los puntos de contacto entre agregados se achatan y se desarrolla un estado estructural laminar, con consecuencias negativas sobre la transferencia de fluidos (Figura 19). La segunda hipótesis postula la ocurrencia de estructura laminar como un caso de *re-estructuración*. Es decir, un estado estructural masivo que se fisura y evoluciona hacia un tipo de estructura laminar con consecuencias positivas sobre la transferencia de fluidos en comparación a la estructura que la origina (Figura 19).

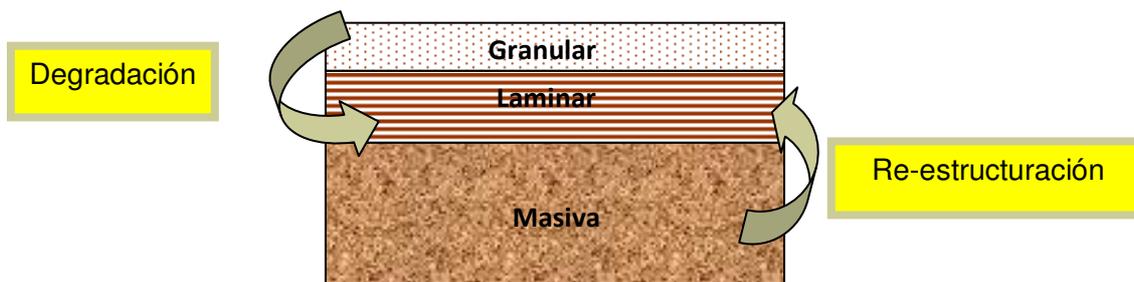


Figura 19. Esquema de los procesos potencialmente involucrados en la formación de la estructura laminar

La tercera hipótesis es complementaria con la de re-estructuración ya que postula que cuando la densidad aparente de la estructura masiva que subyace a la estructura laminar es crítica para el crecimiento de las raíces favorece la formación de la estructura laminar.

Los objetivos de este capítulo fueron:

- Evaluar el efecto del tránsito de maquinaria agrícola y de la cobertura superficial de residuos de cosecha sobre la evolución de la estructura del horizonte superficial del suelo (a campo).
- Evaluar el efecto de ciclos de h-s en dos niveles de compactación del suelo sobre la formación de la estructura laminar (en laboratorio).
- Obtener el valor de densidad aparente crítica para el crecimiento temprano de raíces de trigo (en laboratorio).

3.2 MATERIALES Y METODOS

3.2.1 Caracterización edafoclimática de la zona de estudio

El ensayo de campo y uno de los ensayos de laboratorio fueron realizados en la EEA Pergamino de INTA, ubicada a 33° 51' de latitud sur y 60° 40' de longitud oeste. El clima es templado húmedo, siendo la precipitación media anual de 946 mm y la temperatura media anual de 16,4 °C. El ensayo de laboratorio que responde al tercer objetivo fue realizado en la EEA INTA Paraná.

3.2.2 Efecto del tránsito y de la cobertura (ensayo de campo):

En Noviembre de 2005 se estableció un ensayo en el campo experimental de la EEA INTA Pergamino con tres bloques ubicados en función de la pendiente del terreno y el espesor del horizonte A. El suelo es un Argiudol Típico con horizonte superficial franco limoso de la Serie Pergamino familia fina, illítica, térmica.

El lote seleccionado para establecer el ensayo tenía cinco años bajo SD, luego de cuatro labores de remoción de todo el horizonte superficial en 1999 con arado de disco de doble acción+rastra de dientes, arado de disco excéntrico+rastra de dientes y dos pasadas de rastra de doble acción+rastra de dientes. Con estas labores se incorporaron residuos de tres años: un trigo no cosechado por una epifitía en 1996 y un trébol blanco que permaneció en el lote dos años (1997-1999) y que tampoco fue cosechado. En consecuencia, el suelo presentaba muy buenas condiciones físicas (Tabla 2). Se realizó un muestreo inicial (2005) en cada bloque (tres repeticiones) y se realizaron perfiles culturales para caracterizar el estado estructural inicial.

Tabla 2. Caracterización físico-química inicial del suelo del ensayo de tránsito.

Esesor	m	0-0,2	0,2-0,27	0,27-0,57	0,57-0,82	0,82-1
Horizonte		A	BA	Bt ₁	Bt ₂	B ₃
Arcilla		221	303	435	302	170
Limo	g kg ⁻¹	600	568	475	564	655
Arena		179	129	90	134	175
Dap	Mg m ⁻³	1.31	1.35	1.38	1.32	1.19
CC	% (w/w)	27.4	27.8	29.3	30.0	27.6
PMP		14.4	14.3	16.6	17.3	10.6
Macroporos		12.3				
Mesoporos	% (w/w)	5.1				
Microporos		32.9				
pH _{agua}	1:2.5	5.8				
C	g kg ⁻¹	15.8				

Dap: densidad aparente; CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; C: carbono orgánico

El diseño consistió en el arreglo sistemático de tratamientos de tránsito aplicados a unidades experimentales con cuatro secuencias de cultivo. Se establecieron parcelas de 14 x 20 m y se dividieron a la mitad (7 x 20 m) para la aplicación del tratamiento principal: el tránsito (Figura 20). Así, los tratamientos en las parcelas principales (2) fueron: Transitado (T) con dos pasadas consecutivas de tractor pesado en toda la superficie con el suelo a contenido hídrico de capacidad de campo (26,6±1,3% w/w) al

inicio del ensayo y No transitado (NT) (Figura 21). Las secuencias de cultivo (4) fueron: Monocultivo de soja (S), Rotación maíz-trigo/soja 2ª (M-T/S), Rotación M-T/S sin cobertura, es decir retirando los residuos de cultivo luego de la cosecha, (M-T/S SC) y Sin cultivo (NC), es decir con aplicaciones periódicas de herbicidas de control total. Las secuencias de cultivo elegidas tienen ISI contrastantes y permiten comparar el efecto del tránsito con tres niveles de cobertura de residuos sobre la superficie: escasa (S), elevada (M-T/S) y nula (M-T/S SC). Estos últimos dos tratamientos además permiten poner en evidencia cambios estructurales asociados con la actividad de las raíces.

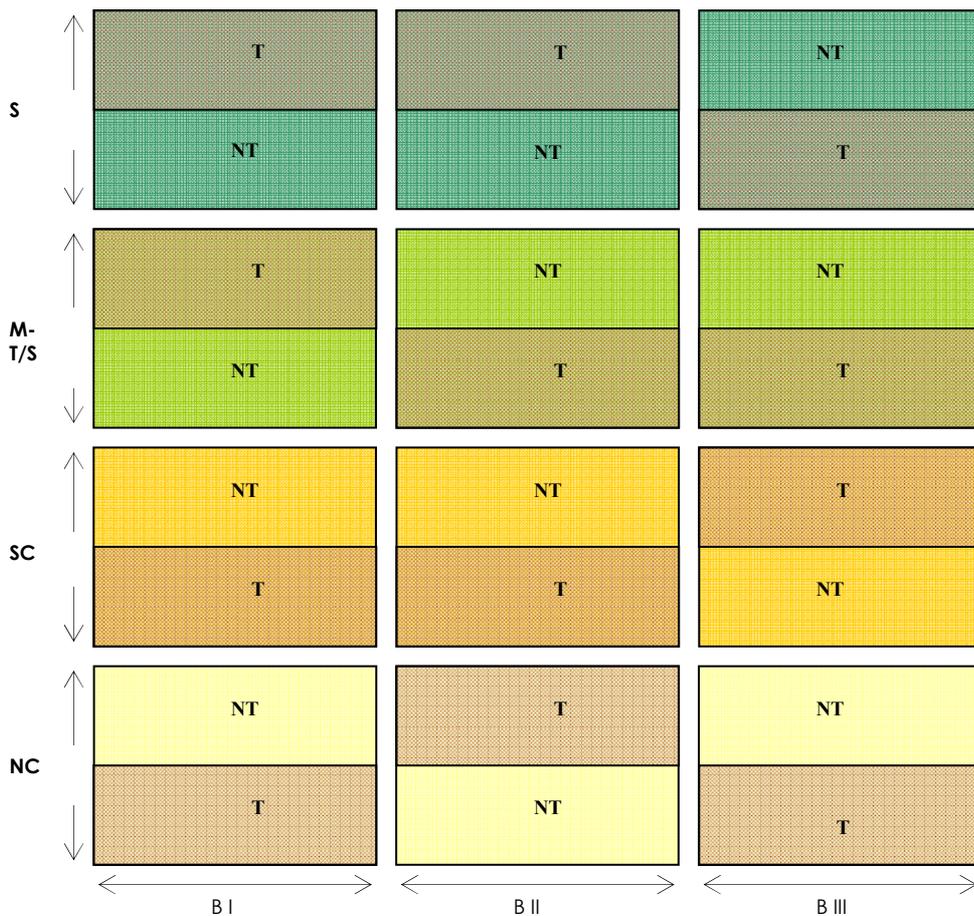


Figura 20. Plano del ensayo de tránsito. EEA INTA Pergamino. T =Transitado; NT =No transitado; S =Monocultivo de soja; M-T/S =Rotación maíz-trigo/soja 2ª; SC =Rotación M-T/S sin cobertura y NC =Sin cultivo



Figura 21. Fotografía de los tratamientos luego de aplicado el tránsito, Noviembre 2005.

3.2.2.1. Mediciones

En cada tratamiento y durante dos ciclos de la rotación (cuatro años) se realizaron perfiles culturales (metodología descrita en Capítulo 2) en sitios sin tránsito visible de ruedas y se realizó el análisis de las imágenes. Se realizó un perfil cultural en cada parcela ($n=24$) en 2005 (inicial), 2006, 2008 y 2010 (final). Cada trinchera se distanció 3 m de la del año anterior para evitar superposiciones. En 2006, seis meses después de establecidos los tratamientos y luego de la cosecha de soja sólo se muestrearon los tratamientos S y NC ya que para muestrear los restantes se esperó a tener las dos fases de la rotación. Se tomaron muestras no disturbadas con cilindros ($58,9 \text{ cm}^3$) y disturbadas para la determinación de Dap y Dat, respectivamente (sistema de porosidad). También se realizó la medición de RC en forma perpendicular a la pared del perfil cultural. Todas las propiedades edáficas fueron analizadas para cada tipo de estructura (granular, laminar, Γ y Δ) identificada en el perfil cultural. También, se analizaron la aparición y la velocidad de desarrollo (espesor y proporción del horizonte A) de la estructura laminar.

En 2008 se tomaron muestras no disturbadas con cilindros ($58,9 \text{ cm}^3$) de cada tipo de estructura en cada perfil cultural y se midió la humedad volumétrica a 5 y 20 kPa (Bezerra de Oliveira 1968). Así se obtuvo la cantidad de poros en porcentaje separados en tres intervalos: microporos ($<15 \mu\text{m}$), mesoporos (entre 15 y $60 \mu\text{m}$) y macroporos ($>60 \mu\text{m}$). En el muestreo final (2010) se tomaron muestras de cada tipo de estructura en cada perfil cultural y se analizó C y N total por combustión seca, utilizando un analizador elemental LECO (Nelson y Sommers 1996) y la estabilidad estructural de agregados por el método de Le Bissonnais et al. (2002).

El método de Le Bissonnais ha sido aplicado en suelos de diferentes condiciones de clima y de manejo (Annabi et al. 2007; Blanchart et al. 2004; Boruvka et al. 2002; Chenu et al. 2000; Cosentino et al. 2006; Le Bissonnais y Arrouays 1997; Rohošková y

Valla 2004; Saidi et al. 1999; Taboada-Castro et al. 2004). Consiste en someter muestras de 10 g de agregados de 3-5 mm, a tres pretratamientos de laboratorio para el cálculo del diámetro medio ponderado de agregados estables (DMP). Los pretratamientos fueron: humectación rápida por inmersión en agua (DMPe); disgregación mecánica por agitación después de humectación en etanol (DMPd) y humectación lenta por capilaridad (DMPc). La fracción >50 µm resultante de cada pretratamiento, se secó en estufa y posteriormente se tamizó en una columna de tamices con el fin de lograr la distribución de agregados para los tamaños >2000 µm, 2000-1000 µm, 1000-500 µm, 500-200 µm, 200-100 µm y 100-50 µm. El DMP de cada pretratamiento se obtuvo como la suma algebraica de las masas de las fracciones remanentes de cada tamiz, multiplicado por la apertura de los tamices adyacentes. El promedio de los tres DMP sintetiza la información en un diámetro medio ponderado medio (DMPm). La Tabla 3 presenta las categorías de clasificación de estabilidad propuestas por el autor.

Tabla 3. Categorías de estabilidad estructural (Le Bissonnais et al. 2002)

DMPm	Estabilidad
< 0,4 mm	Muy inestable
0,4-0,8 mm	Inestable
0,8-1,3 mm	Moderadamente estable
>1,3 mm	Estable

3.2.2.2. Análisis estadístico

El diseño de campo (arreglo sistemático) no proporcionó estimadores válidos del error para probar el efecto de la secuencia de cultivos. Sin embargo, permitió evaluar el efecto del tránsito dentro de cada secuencia. Se realizaron análisis de varianza y test LSD usando el procedimiento GLM de SAS para la comparación entre tratamientos T y NT dentro de cada secuencia (SAS Institute Inc. 1989). Por otro lado, se realizaron análisis multivariados de componentes principales con las propiedades edáficas medidas con el fin de identificar prácticas de manejo asociadas con la proporción de cada tipo de estructura. El análisis multivariado explora las relaciones existentes entre variables, para lograr un análisis más rico y profundo de la realidad subyacente en los datos observados. También, se realizó un análisis de conglomerados para diferenciar tipos de estructura mediante el análisis multivariado de los parámetros físicos medidos en laboratorio y validar la metodología del perfil cultural. Además, se realizó una regresión simple entre los años de establecidos los tratamientos y la evolución de la estructura laminar en el monocultivo de soja.

3.2.3 Ciclos de humedecimiento y secado (ensayo de laboratorio)

3.2.3.1. Suelo

Para determinar si el origen de la aparición de estructura laminar superficial bajo SD continua en los suelos limosos se debe a la acción de ciclos de h-s se realizó un ensayo en laboratorio con columnas de suelo. Numerosos autores han diseñado experimentos de h-s (Cosentino et al 2006; Deneff et al. 2001; Hussein, Adey 1998; Pardini et al. 1995; Samouelian et al. 2003; Sarmah et al. 1996; Taboada et al. 2004). En general, éstos se han realizado para estudiar procesos de regeneración de estructura, agregación y su estabilidad. Este experimento pretendió analizar la fisuración de estados estructurales compactados en suelos limosos y la capacidad de reestructuración.

El diseño del experimento fue completamente aleatorizado con tres repeticiones. Treinta y seis cilindros (15 cm de altura y 9 cm de diámetro) de acrílico transparente con la base perforada (Figura 22) se rellenaron con muestras de suelo provenientes del horizonte superficial de un Argiudol típico fino, illítico, térmico (US Soil Taxonomy), Luvic Phaeozem (WRB), de la serie Pergamino (INTA, 1972). El suelo fue extraído de un lote de siete años bajo SD luego de la cosecha de soja (barbecho).

Iñiguez y Scoppa (1970) realizaron un estudio de la fracción arcilla ($< 2 \mu\text{m}$) de seis perfiles de Argiudoles representativos del NE de la provincia de Buenos Aires. El análisis mineralógico, por difracción de Rayos X, mostró que el tipo de arcilla predominante es illita, y en orden decreciente montmorillonita, caolinita e interstratificados. Ninguna de las series de suelos analizadas en la región superó el 15 % de arcilla montmorillonita en el horizonte A y todas presentaron mas de 80% de illita en la fracción arcilla.



Figura 22. Columnas de suelo en cilindros de acrílico transparente para ensayo de h-s

Se extrajeron muestras de suelo de dos capas (0-0,05 m –s- y 0,05-0,2 m –d-), se secaron al aire, se tamizaron (2 mm) y se colocaron en los cilindros acrílicos formando una columna de 10 cm de alto (Figura 23). La Tabla 4 muestra algunas propiedades químicas y físicas de las muestras de suelo. Las muestras se comprimieron con una prensa, por capas delgadas, a la humedad indicada por test Proctor para alcanzar dos grados de compactación: nc= con densidad aparente característica de este tipo de suelo bajo SD (1,15 y 1,31 g cm^{-3} para 0-0,05 y 0,05-0,2 m, respectivamente) y c= con densidad aparente característica de este tipo de suelo con estructura masiva (1,33 y 1,41

g cm^{-3} para 0-0,05 y 0,05-0,2 m, respectivamente). El peso seco de las columnas de suelo fue determinado luego de una semana de colocadas en estufa a 60°C .

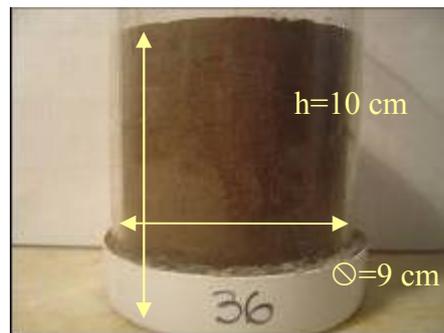


Figura 23. Dimensiones de las columnas de suelo del ensayo de h-s

Tabla 4. Propiedades químicas y físicas del suelo.

Espesor m	pH (1:2.5)	CE dS m^{-1}	CO	Arcilla g kg^{-1}	Arena	Limo
0-0.05	5.7	0.152	18.3	237	202	561
0.05-0.2	6.1	0.251	15.9	290	212	498

CE: conductividad eléctrica; CO: carbono orgánico (Walkley-Black)

3.2.3.2. Ciclos de humedecimiento-secado

Las columnas de suelo fueron sometidas a 5, 10 o 15 ciclos de h-s (tres grupos). Se les adicionó agua destilada (50 g) gradualmente con un pulverizador para humedecer los 5 primeros centímetros. Se prestó especial atención en minimizar cargas hidráulicas y la rápida transferencia de agua a través de las fisuras y del borde de la columna. Las muestras se dejaron secar por evaporación a temperatura ambiente ($20\text{-}25^\circ\text{C}$) en el laboratorio hasta alcanzar un contenido hídrico cercano a punto de marchitez permanente –PMP– ($\sim 14\%$ w/w). Cada ciclo de h-s duró aproximadamente 7 días. El mecanismo de pérdida de agua fue la evaporación a través de la superficie.

3.2.3.3. Mediciones

Se pesaron las columnas de suelo una vez por día para registrar los cambios de humedad (pérdida de agua). Los cambios en la estructura de suelo fueron observados visualmente, a través de las paredes transparentes de los cilindros y sobre la superficie. Después de dos ciclos de h-s, partículas de suelo se adherieron a las paredes de los cilindros, impidiendo continuar la observación de los cambios estructurales.

Se tomaron fotografías digitales de la superficie de todas las columnas después de 3, 5, 10, 12, 14 y 15 ciclos de h-s a PMP, para seguir la evolución de las fisuras. Las fotografías fueron analizadas con el software IMAGEJ para cuantificar las características de las fisuras (Sarmah et al. 1996). Se calculó un índice de fisuración (IF) como la relación entre el área ocupada por fisuras (AF) y el área total (AT), donde $\text{IF} = \text{AF} \times 100 / \text{AT}$ (Figura 24). Este índice es similar al descrito por Pillai-Mc Garry y

Collis-George (1990) y mide la proporción de la superficie del suelo cubierta por fisuras.

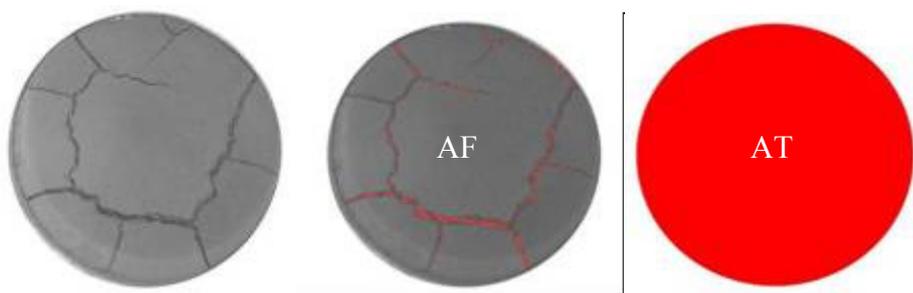


Figura 24. Determinación del Índice de Fisuración. AF: área que ocupan las fisuras; AT: área total de la superficie superior de la columna de suelo.

Después del último ciclo de h-s, se midió la altura de las columnas con un calibre para calcular cambios de volumen y Dap en cada muestra. Luego, en una columna de cada tratamiento (una sola repetición, n=12) se aplicó una solución colorante de 5 g L^{-1} de *Brilliant Blue G* (Acros Organics, CAS 6104-58-1, $\text{C}_{47}\text{H}_{48}\text{N}_3\text{NaO}_7\text{S}_2$) lentamente con un aspersor. Un día después, se extrajeron las columnas de los cilindros sin disturbar y se realizó un corte longitudinal para su observación. Se identificó visualmente la presencia de estructura laminar, se midió su espesor con un calibre y se tomaron fotografías. Los datos fueron analizados con el software *SAS*.

3.2.4 Impedimento a la penetración de raíces (ensayo de laboratorio)

Para determinar el nivel de compactación que restringe el crecimiento vertical de raíces en los suelos bajo estudio y analizar la contribución de la actividad de raíces a la formación de la estructura laminar superficial bajo SD, se realizó un experimento de laboratorio con macetas cilíndricas. Basado en el concepto introducido por Letey (1985), Silva et al. (1994) propusieron el *Least Limiting Water Range* (LLWR) o intervalo hídrico óptimo (IHO) como un indicador de calidad estructural para el crecimiento de los cultivos. El IHO integra valores limitantes del crecimiento de cultivos de parámetros fácilmente medibles, como el contenido hídrico y la Dap, y ha sido validado como un buen indicador de calidad física de una amplia gama de suelos, cultivos y sistemas de manejo (Betz et al. 1998; Chan et al. 2006; Imhoff et al. 2001; Lapen et al. 2004; Leão et al. 2006; McKenzie y McBratney 2001; Silva y Kay, 1997; Tormena et al. 1998). Cuando el IHO es igual a cero, el suelo alcanza un valor de densidad aparente crítica (Dapc) (Imhoff et al. 2001; Leão et al. 2006; Tormena et al. 1999), que indica que se ha alcanzado una densidad restrictiva del crecimiento de raíces (Reichert et al. 2009).

3.2.4.1. Preparación de la muestra

El diseño fue completamente aleatorizado con tres repeticiones. Se perforaron las bases de 30 cilindros (0,085 m de altura y 0,15 m de diámetro) de PVC y se rellenaron con muestras de suelo provenientes del horizonte A de un Argiudol ácuico de la serie Tezanos Pinto fino, illítico, térmico (Plan Mapa de Suelos 1998). Las características de suelo se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades edáficas del horizonte A (0-0,2 m) de un Argiudol ácuico de la serie Tezanos Pinto.

Suelo	pH (1:2.5)	Carbono total	Arcilla $g\ kg^{-1}$	Arena	Limo	Clase textural
Argiudol ácuico	6,3	26,5	274	63	663	Franco arcillo limoso

Las muestras de suelo se extrajeron de un lote bajo SD de 10 años, durante el barbecho de invierno. Las muestras fueron secadas al aire, tamizadas (2 mm) y colocadas dentro de cada cilindro, hasta alcanzar una altura de 0,07 m.

Las muestras fueron comprimidas con una prensa, por capas delgadas para asegurar una buena homogeneidad de la Dap. Se obtuvieron cinco niveles de compactación factibles de encontrarse a campo bajo SD: 1,10, 1,20, 1,30, 1,40 y 1,50 $g\ cm^{-3}$ usando diferentes gramos de suelo por unidad de volumen. Las muestras fueron secadas en estufa a 60°C durante 3 días. Luego, se adicionó agua destilada gradualmente con un aspersor para alcanzar un contenido hídrico de capacidad de campo (θ_{CC}): 31,5 % v/v. Se puso especial atención en minimizar las cargas hidráulicas y la transferencia de agua a través de fisuras y de la interfase suelo-borde.

En la mitad de los cilindros (n=15) se plantaron cuatro semillas de trigo por cilindro. En estos cilindros, el suelo se mantuvo a θ_{CC} a temperatura ambiente ($24\pm 3^\circ C$) durante los dos meses de duración del experimento. Tres veces por semana se adicionó solución nutritiva Hoagland para asegurar adecuada nutrición mineral. Finalmente, se ajustó el stand de plantas a dos por cilindro luego de la etapa 1 (Zadocks et al. 1974). Dos meses después de iniciado el experimento, la biomasa aérea fue removida, secada en estufa a 60°C y pesada. Para obtener el peso de la biomasa de raíces, se lavó el suelo contenido en los cilindros con agua destilada y hexametáfosfato de sodio ($100\ g\ L^{-1}$), se secó en estufa a 60°C y se pesó. Para cada cilindro se calculó la relación entre biomasa raíz/aérea.

La selección de la especie para realizar el ensayo responde a varias razones: i) las raíces de cereales (en cabellera con numerosas raíces secundarias) pueden explorar diámetros de poros menores que las raíces de dicotiledóneas (Hamblin 1985); ii) el trigo es el principal cultivo de invierno de la región (Caviglia y Andrade 2010) y es más sencilla su conducción en macetas de laboratorio con respecto a la otra gramínea importante en superficie sembrada (maíz) e; iii) existen numerosos trabajos que informan síntomas de reducción de crecimiento del trigo por compactación edáfica (Acuna et al. 2007; Oussible et al. 1992; Richmond y Rillo 2006; Tolon-Becerra et al. 2011).

3.2.4.2. Mediciones de suelo

Los 15 cilindros restantes que no fueron cultivados se dejaron secar por evaporación superficial a temperatura ambiente ($24\pm 3^\circ C$) en el laboratorio hasta que el suelo alcanzó el punto de marchitez permanente (θ_{PMP}): 17% v/v. Los cilindros fueron pesados una vez al día para registrar los cambios de contenido hídrico (pérdida de agua). Se midió la resistencia del suelo a la penetración (RP) en siete diferentes contenidos hídricos entre θ_{CC} y θ_{PMP} con un penetrológico de laboratorio (Marconi ®,

Brasil) con un cono de 30° y $0,1256 \text{ cm}^2$ de base área a una tasa constante de 2 cm s^{-1} . En cada cilindro, se realizaron tres lecturas de RP con incrementos de 1 cm entre 0 y 7 cm.

Al comienzo (luego del primer humedecimiento) y al finalizar el experimento (θ_{PMP}), se registraron las alturas medias de las columnas de suelo con un calibre para evaluar cambios volumétricos y para calcular variaciones en valores de Dap, considerando densidad aparente inicial (Dap_i) y final (Dap_f). Se midieron los contenidos de agua a θ_{CC} (-33 kPa) y θ_{PMP} (-1500 kPa) con equipo de Richards en muestras no disturbadas extraídas con cilindros de $58,9 \text{ cm}^3$ (un cilindro de 5 cm de diámetro y 3 cm de alto de cada columna). La Dap_f fue considerada para calcular los cambios de volumen.

Se determinó el IHO para cada muestra siguiendo la metodología propuesta por Silva et al. (2004). El límite superior está definido por θ_{CC} o por el contenido de agua por encima del cual la aireación es insuficiente (θ_{AP}) que fue calculado restando $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (10% de macroporosidad umbral) al contenido hídrico a saturación (θ_s), según cual sea menor. El límite inferior está definido por θ_{PMP} o por el contenido hídrico en el cual la resistencia del suelo alcanza los 2 MPa (θ_{RP}), según cual sea mayor. El IHO, entonces, incorpora características relacionadas con la porosidad y con zonas de debilidad dentro de una variable simple (Leão et al. 2006; Wu et al. 2003). La frecuencia con que el contenido hídrico está fuera del IHO se incrementa cuando se reduce dicho intervalo. El IHO fue calculado para cada nivel de compactación. Cuando el IHO fue igual a cero, la Dap fue considerada como Dapc.

Los datos de RP fueron comparados a valores de contenidos hídricos similares usando un valor de contenido hídrico relativo (θ_r), que fue calculado como la relación entre el contenido hídrico a la medición de RP y aquel de θ_s (Orellana et al. 1997). El contenido hídrico al que la resistencia del suelo se hace limitante (θ_{PR}), cuando RP es igual a 2 MPa, fue estimado usando una función potencial como: $RP = a (\theta/\theta_s)^b$ donde a y b son parámetros que dependen del tipo de suelo y de la Dap (Wilson et al. 2006).

El contenido hídrico a θ_s fue considerado igual a la porosidad total que fue calculada usando la Dap de las muestras no disturbadas de $58,9 \text{ cm}^3$ y la densidad real medida con el método del picnómetro ($2,50 \text{ g cm}^{-3}$).

3.2.4.3. Análisis estadístico

Se realizaron correlaciones y regresiones usando PROC CORR y REG, respectivamente y para los ANOVA, PROC GLM de SAS (SAS Institute Inc. 1989).

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Efecto del tránsito y de la cobertura (ensayo de campo)

La Figura 25 presenta uno de los perfiles realizados en la condición de partida (2005) con tres fotografías ensambladas donde se observa que todo el perfil del horizonte A tenía una estructura Γ , con presencia de pocas raíces y algunas zonas

localizadas con estructura masiva Δ . El lote seleccionado para la instalación del ensayo no presentaba estructura laminar. Así, la distribución estructural inicial promedio fue de 95% del horizonte superficial ocupado con estructura Γ y 5% con masiva Δ (Figura 26).



Figura 25. Perfil del horizonte superficial al inicio del ensayo con ensamblaje de imágenes.

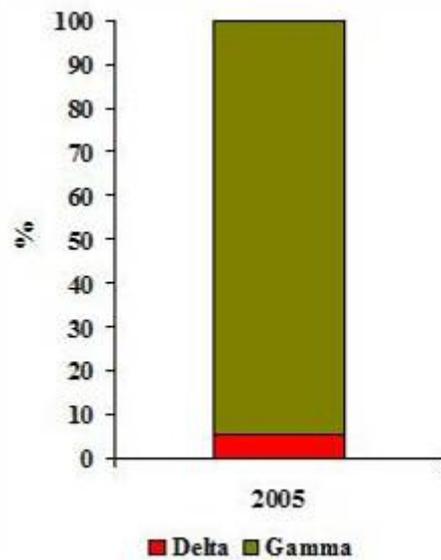


Figura 26. Proporción de estados estructurales en el horizonte superficial de la situación inicial.

Seis meses después de establecidos los tratamientos y luego de la cosecha de soja se muestrearon los tratamientos S y NC, ya que para muestrear los restantes se esperó a tener las dos fases de la rotación. En ambos tratamientos, se registró la presencia de una estructura laminar desde la superficie y con un espesor variable entre 2 y 6 cm y sin diferencias significativas entre transitado y no transitado (Figura 27).

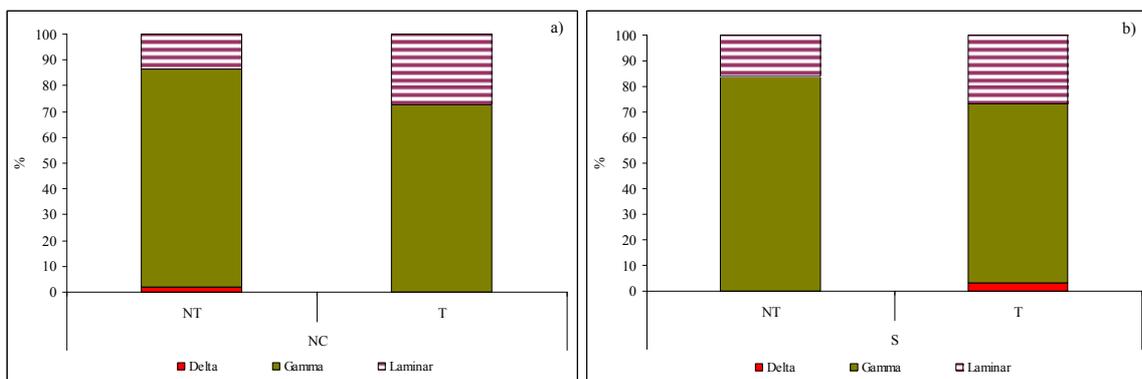


Figura 27. Proporción de estados estructurales media en el horizonte superficial en 2006 en los tratamientos Transitado (T) y no transitado (NT) en a) No cultivado (NC) y b) Monocultivo de soja (S),

En 2008 y en 2010 se realizaron perfiles culturales en todas las parcelas para analizar la evolución del patrón estructural. En ninguno de los muestreos realizados y dentro de ninguna secuencia hubo diferencias significativas en espesor de estructura granular, laminar o Γ entre T y NT (datos no mostrados).

En lo que respecta a la proporción del horizonte superficial ocupada por cada tipo de estructura, no se produjeron variaciones en la proporción de estructura granular debidas al tránsito en ninguno de los muestreos (Tabla 6). En 2008, se observó una mayor proporción de estructura Δ en el tratamiento T del monocultivo de soja y la correspondiente reducción en la proporción de Γ no fue significativa (Tabla 6). En la rotación M-T/S SC el tratamiento T presentó mayor estructura Δ y menor Γ que NT.

En 2010, la proporción de estructura laminar sólo fue mayor en el tratamiento T bajo soja continua, luego de cuatro años de iniciado el ensayo. Esta mayor proporción estuvo acompañada de una significativa menor proporción de estructura Γ (Tabla 6). En las restantes secuencias no hubo diferencias significativas entre T y NT.

Tabla 6. Proporción media de distintos tipos de estructura en 3 momentos de muestreo.

Año				Granular	Laminar	Gamma		Delta		
				%						
2006	NC	NT	0	A	13	a	85	a	2	a
		T	0	A	27	a	73	a	0	a
	S	NT	0	A	16	a	84	a	0	a
		T	0	A	27	a	70	a	3	a
2008	NC	NT	19	a	13	a	56	a	11	a
		T	10	a	21	a	63	a	5	a
	S	NT	4	a	38	a	54	a	3	a
		T	0	a	44	a	48	a	8	b
	MTS	NT	8	a	38	a	52	a	2	a
		T	10	a	33	a	50	a	8	a
	MTS SC	NT	17	a	22	a	59	b	2	a
		T	27	a	23	a	43	a	7	b
2010	NC	NT	0	a	46	a	47	a	6	a
		T	0	a	48	a	46	a	6	a
	S	NT	0	a	48	a	49	b	3	a
		T	0	a	58	b	39	a	3	a
	MTS	NT	9	a	41	a	50	a	1	a
		T	13	a	37	a	48	a	2	a
	MTS SC	NT	7	a	48	a	42	a	3	a
		T	9	a	47	a	39	a	5	a

S= Monocultivo de Soja; MTS= Rotación Maíz-Trigo/Soja; SC= sin cobertura; NC= no cultivado; NT= no transitado; T= transitado. Letras distintas indican diferencias significativas entre niveles de tránsito (Prueba t, $p < 0,05$).

Fueron muy marcados los cambios en la distribución de la proporción de los distintos tipos de estructuras en las parcelas NT entre los muestreos inicial y final analizados para cada secuencia de cultivo separadamente (Figura 28). Sólo la estructura Δ no presentó diferencias significativas entre los dos momentos de muestreo para ninguna secuencia. En todas las secuencias hubo formación de estructura laminar y reducción de la proporción de estructura Γ . En las secuencias que incluyeron el maíz y el trigo se formó en superficie una estructura granular independientemente de la presencia de cobertura superficial. La proporción de estructura granular así como la de Δ , no estuvieron correlacionadas ni entre sí ni con las demás estructuras. Esto sugiere que su formación es independiente de la evolución natural de la estructura bajo SD hacia la formación de estructura laminar.

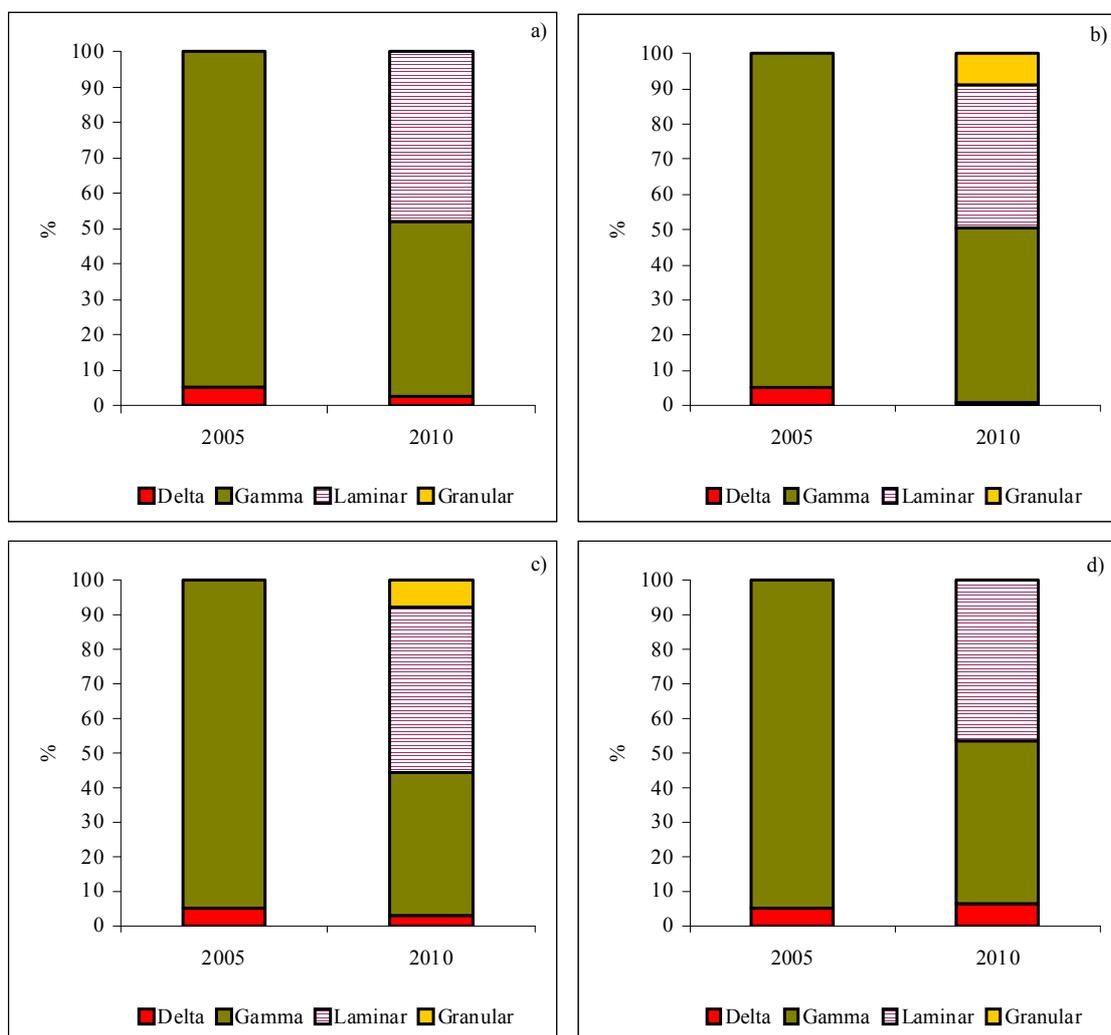


Figura 28. Proporción media de estructuras en el horizonte superficial en 2005 y 2010 en los tratamientos no transitados en a) Monocultivo de soja, b) Rotación M-T/S, c) Rotación M-T/S sin cobertura y d) No cultivado.

3.3.2.1 Evolución de la estructura laminar

La evolución de la proporción de la estructura laminar se analizó haciendo regresiones con los años desde el inicio del ensayo. En el monocultivo de soja se diferenciaron los datos promedio de los tratamientos T y NT, ya que en 2010 hubo diferencias significativas entre ambos (Figura 29). La proporción de la estructura laminar se incrementó hasta alcanzar en cinco años alrededor del 48% del área del horizonte superficial. Este incremento fue proporcional a los años pasados, luego de establecido el monocultivo e independiente del tránsito debido a que las regresiones de ambos tratamientos tienen pendientes similares.

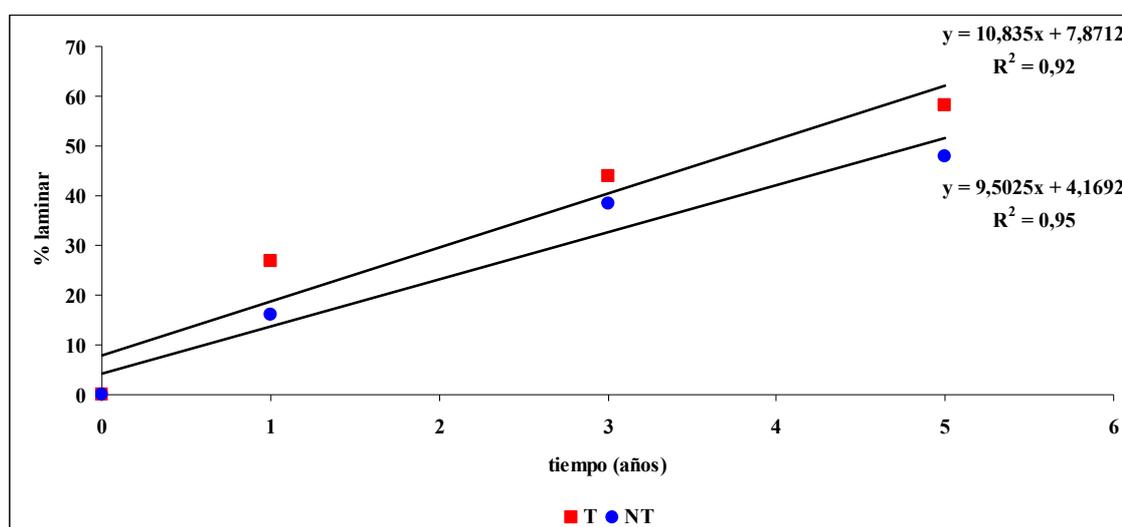


Figura 29. Regresión lineal. Evolución de la proporción de estructura laminar en el perfil cultural de monocultivo de soja transitado (T) y no transitado (NT).

Para las secuencias M-T/S con y sin cobertura y para el tratamiento NC se utilizaron los datos de los dos tratamientos de tránsito, ya que no hubo diferencias significativas de proporción de la estructura laminar en los distintos momentos de muestreo (Figura 30). En NC y M-T/S SC el tiempo de ensayo explicó un 77 y 98% de la variación de la proporción de estructura laminar, respectivamente. En la secuencia M-T/S, el tiempo de ensayo explicó un 88% de la variación de la proporción de estructura laminar. Sin embargo, observando la Figura 30 puede inferirse que hay una tendencia a estabilizar esta proporción alrededor de 35% luego del tercer año. Indudablemente, hace falta profundizar este estudio para concluir que esta secuencia no continuará incrementando la proporción de estructura laminar en el horizonte superficial.

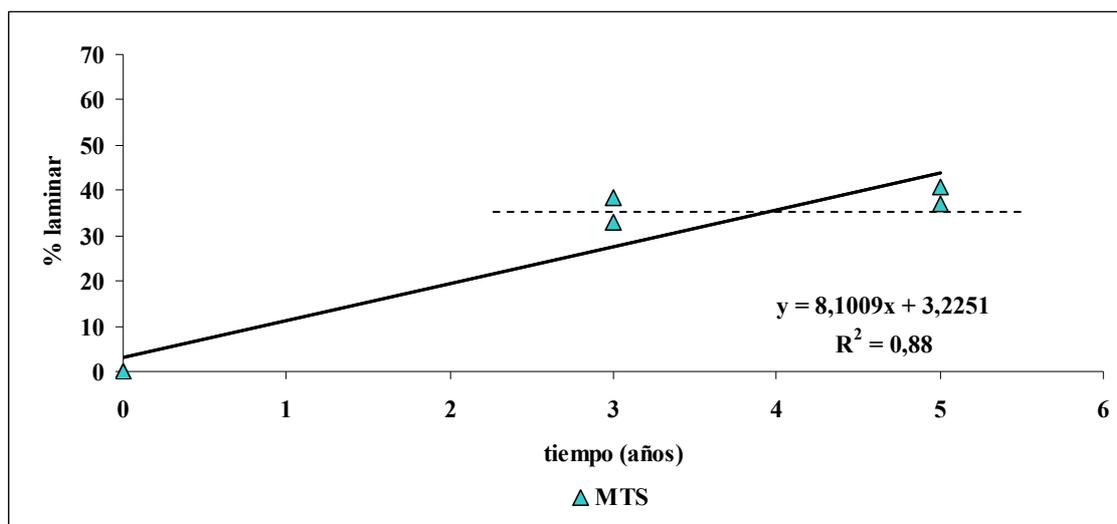


Figura 30. Regresión lineal. Evolución de la proporción de estructura laminar en el perfil cultural de la rotación M-T/S.

Si bien el número de años analizados es reducido, la observación de los datos sugiere, como en el Capítulo 2, que la evolución de la proporción de estructura laminar podría seguir la rama ascendente de una función cuadrática. En efecto, hubo correlación altamente significativa ($r=0,85$, $n=24$) entre los datos promedio de proporción de estructura laminar de todos los tratamientos y los simulados mediante la ecuación de ajuste de lotes de la Pampa Húmeda Norte en el Capítulo 2 ($y = -0.2239x^2 + 7.092x - 12.338$).

3.3.2.2 Análisis multivariado de los distintos tipos de estructura hallados

La Figura 31 muestra el gráfico biplot del análisis de componentes principales. En éste se incluyeron, sin rotular, los datos de proporción de estructuras dentro del horizonte A para los distintos tratamientos en los muestreos 2006, 2008 y 2010. La primera componente separó los porcentajes de estructura laminar y granular de las estructuras de características masivas como Γ y Δ . Esta componente explica la mayor variabilidad entre los estados estructurales hallados en los distintos tratamientos. La segunda componente separa a las anteriores de las estructuras Δ y granular que tienen una incidencia menor en cuanto a proporción del área del horizonte A ocupada y su espesor. Con estos dos ejes se explicó el 82% de la variabilidad total de las observaciones (Tabla 7). Los autovectores (e_1 y e_2) muestran los coeficientes con que cada variable original fue ponderada para conformar las CP1 y CP2. Dado que la longitud de los vectores fue similar, el gráfico sugiere contribuciones similares de cada variable en la representación realizada (InfoStat 2004).

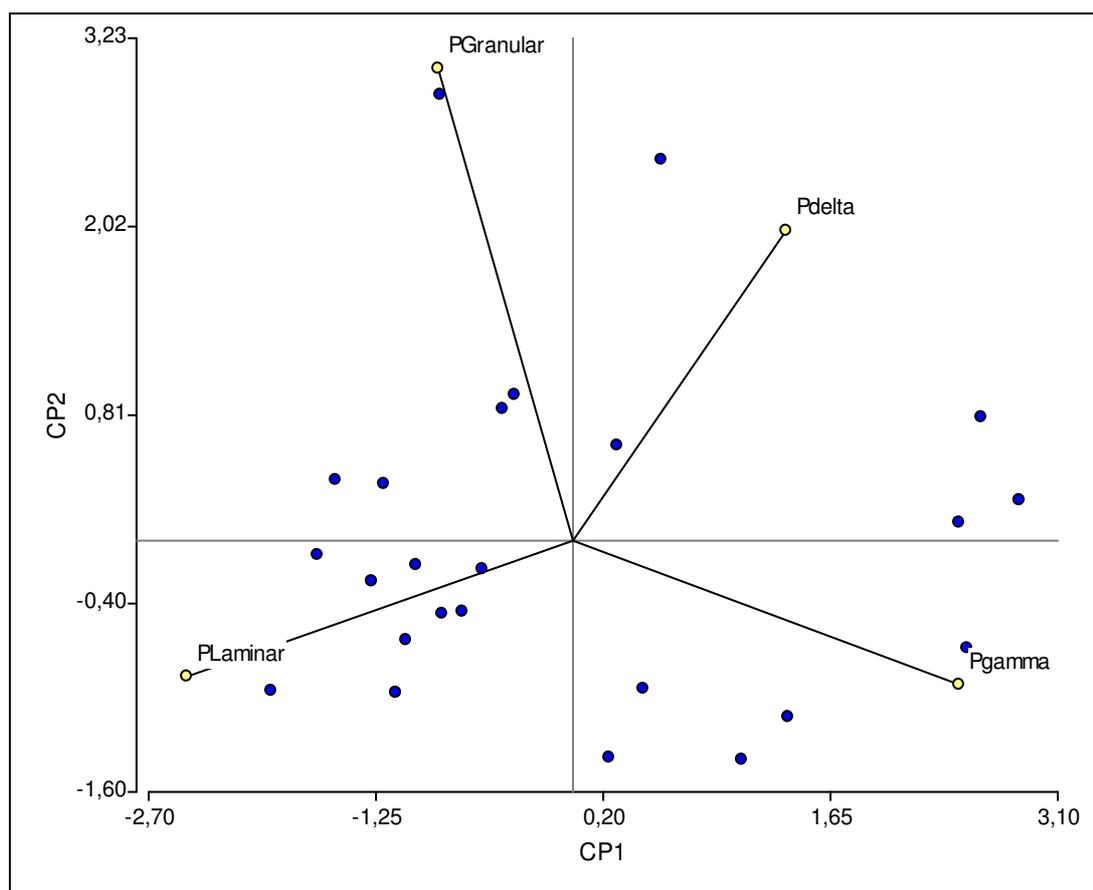


Figura 31. Gráfico Biplot del análisis de componentes principales. Cada punto corresponde a una parcela

Tabla 7. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales

Autovalores			
Lambda	Valor	Proporción	Prop. acum.
1	2,12	0,53	0,53
2	1,15	0,29	0,82
3	0,73	0,18	1,00
4	0,00	0,00	1,00

Autovectores		
Variables	e1	e2
PGranular	-0,22	0,79
PLaminar	-0,64	-0,23
Pgamma	0,64	-0,24
Pdelta	0,36	0,52

En el análisis de componentes principales, las variables están representadas como vectores de manera que los ángulos entre ellos pueden ser interpretados en términos de correlaciones entre variables (Peña 2002). Ángulos de 90° entre dos variables indican que ambas variables no se encuentran correlacionadas y alejamientos de este valor implican correlación positiva o negativa según se acerque a 0° o 180°, respectivamente (InfoStat 2004). En consecuencia, puede observarse que los porcentajes de estructuras Γ y laminar están negativamente correlacionados. Es decir, que una

aumenta en detrimento de la otra. En cambio, las proporciones de estructuras granular y Δ no están correlacionadas ni entre si, ni con las demás estructuras. Esto sugiere que su formación es dependiente de condiciones externas. Este análisis confirma los resultados hallados en el Capítulo 2.

En la Figura 32, se presenta un nuevo gráfico biplot realizado sólo con los datos del muestreo de 2010 donde pueden visualizarse los tratamientos luego de cinco años desde su implantación. La disposición de los autovectores fue similar al de la Figura 31 aunque el vector de la estructura Δ aparece con mayor relevancia (Figura 32). Con las dos componentes principales (CP1 y CP2) se explicó el 88% de la variabilidad total de las observaciones (Tabla 8). Puede observarse que la CP1 separa los tratamientos S y NC de los tratamientos con rotación M-T/S con y sin cobertura. Los primeros aparecen asociados a la aparición de estructuras Δ y Γ y la rotación, con la estructura granular y laminar. La segunda componente separa los tratamientos transitados y no transitados.

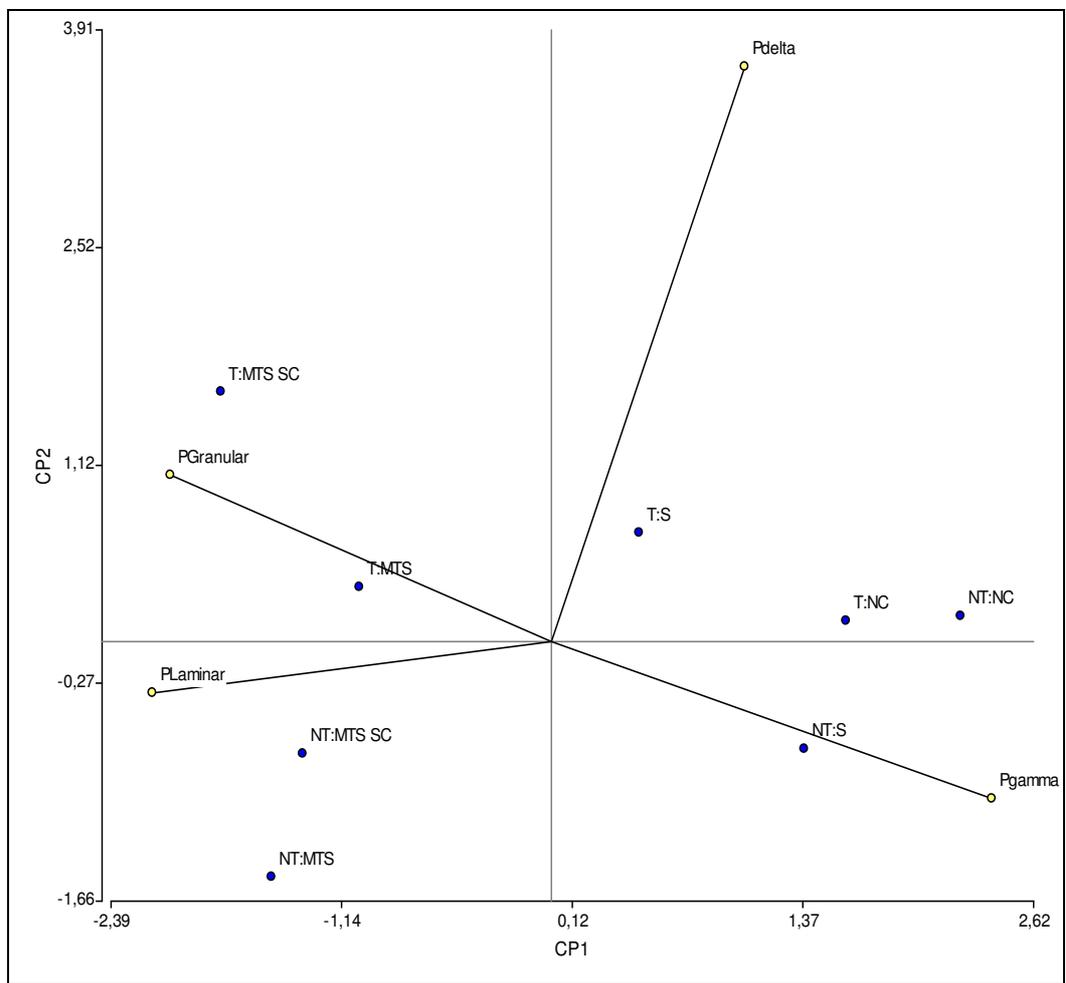


Figura 32. Gráfico Biplot del análisis de componentes principales del muestreo de 2010.

Tabla 8. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales en 2010.

Autovalores		
Lambda	Valor	Proporción
		Prop. acum.

1	2,58	0,64	0,64
2	0,92	0,23	0,88
3	0,50	0,12	1,00
4	0,00	0,00	1,00
Autovectores			
Variables	e1	e2	
PGranular	-0,52	0,27	
PLaminar	-0,54	-0,08	
Pgamma	0,60	-0,25	
Pdelta	0,27	0,93	

3.3.2.3 Propiedades edáficas características de los distintos tipos de estructura

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables, que no depende de las unidades de medida de las variables originales. En la Tabla 9 puede observarse que hubo alta correlación entre las variables medidas para cada uno de los tipos de estructuras hallados en los diferentes tratamientos. La macroporosidad fue la variable que tuvo correlación con todas las demás, mientras que la estabilidad de agregados (DMP) fue la variable que tuvo menos correlaciones significativas. La alta asociación entre las variables se atribuye a que el muestreo de suelo y la posterior medición de propiedades edáficas se realizaron evitando tomar espesores de suelo preestablecidos. La toma de muestras se realizó respetando unidades estructurales homogéneas establecidas en el muestreo de campo permitiendo así caracterizar adecuadamente los distintos tipos de estructura.

Tabla 9. Coeficientes de correlación

	Macro	Meso	Micro	Dap	RC	Dat	N	C	DMP	DMPe	DMPd
CMPc											
Macro	1,00										
Meso	0,67	1,00									
Micro	-0,58	-0,46	1,00								
Dap	-0,88	-0,66	0,50	1,00							
RC	-0,60	-0,34	0,25	0,53	1,00						
Dat	-0,64	-0,29	0,11	0,67	0,46	1,00					
N	0,66	0,39	-0,16	-0,68	-0,46	-0,69	1,00				
C	0,67	0,50	-0,11	-0,72	-0,45	-0,68	0,87	1,00			
DMP	-0,42	-0,21	0,06	0,59	0,26	0,58	-0,46	-0,54	1,00		
DMPe	0,48	0,49	-0,17	-0,32	-0,19	-0,43	0,40	0,53	-0,05	1,00	
DMPd	-0,53	-0,36	0,12	0,66	0,34	0,73	-0,59	-0,71	0,93	-0,37	1,00
DMPc	0,37	0,47	-0,19	-0,34	-0,29	-0,55	0,49	0,54	-0,01	0,79	-0,37
PE	1,00										
	0,68	0,65	-0,43	-0,89	-0,29	-0,48	0,47	0,62	-0,62	0,21	-0,69
	0,40	1,00									

Macro= macroporosidad; Meso=mesoporosidad; Micro=microporosidad; Dap= densidad aparente; RC= resistencia al corte; Dat= densidad aparente textural; N=nitrógeno; C=carbono; DMP= diámetro medio ponderado, DMPe= diámetro medio ponderado pretratamiento estallido; DMPd= diámetro medio ponderado pretratamiento dispersión mecánica; DMPc= diámetro medio ponderado pretratamiento capilaridad; PE= porosidad estructural. En negrita, correlaciones significativas (0,05).

Por otro lado, fue significativo el análisis de varianza de cada una de las propiedades edáficas entre las distintas estructuras (datos no mostrados). Con la finalidad de sintetizar la información disponible y facilitar la visualización de relaciones multivariadas de naturaleza compleja (InfoStat 2004), se realizó un análisis multivariado de conglomerados, utilizando todas las variables medidas en 2010 para cada tipo de estructura, independientemente de los tratamientos aplicados. Se generó un dendrograma (Figura 33) para observar las relaciones de agrupación entre los datos. Un criterio frecuentemente utilizado es trazar una línea de referencia a una distancia euclídea promedio igual al 50% de la distancia máxima que en este caso es 1,71. Fijando un criterio arbitrario de trazar una línea en la distancia media de 0,81 se diferencian las estructuras granular y laminar con características muy diferentes a las estructuras masivas Γ y Δ que aparecen agrupadas por sus similitudes. Este análisis exploratorio de los datos permite corroborar simplemente la diferenciación de los distintos tipos de estructuras, realizada con la aproximación del perfil cultural. Así, con una gama mucho más amplia de mediciones de laboratorio puede corroborarse la diferenciación de estructuras efectuada en el Capítulo 2 sólo con la observación y la medición *in situ* de RC.

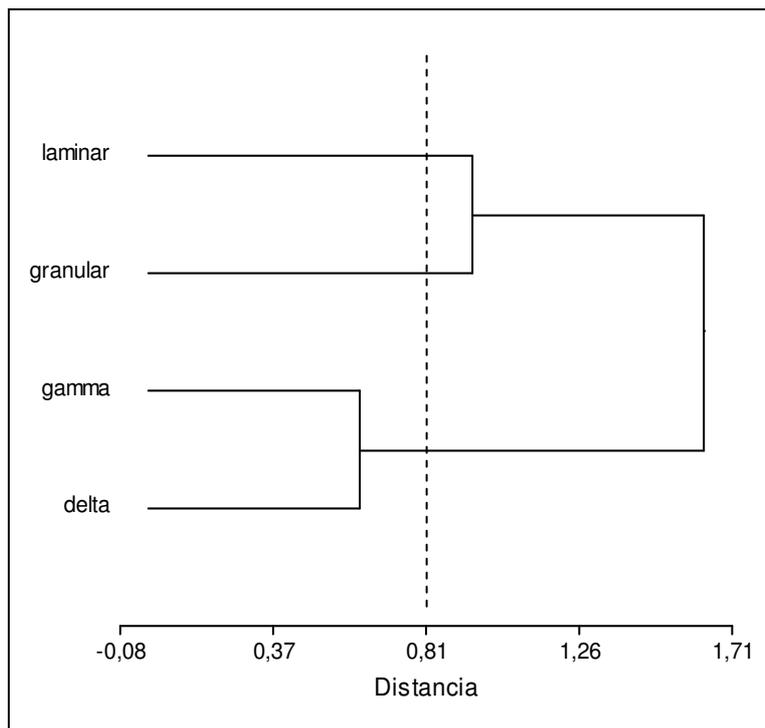


Figura 33. Dendrograma de análisis multivariado de similitud.

Es ampliamente conocido que los cambios en la estructura causados por el tránsito incluyen cambios en la porosidad y en la distribución de poros por tamaño así como en la naturaleza de los planos de debilidad (Kay 1990). Sin embargo, los resultados encontrados indican que la evolución de la estructura fue similar bajo SD tanto en los tratamientos T y NT, así como en aquéllos con mayor o menor volumen de cobertura. Estos resultados son inesperados. La formación de estructura laminar y su aumento en proporción en el horizonte superficial no estuvo restringida a los tratamientos transitados o con bajo volumen de cobertura sino que fue similar en todos los tratamientos (Figura 34). En consecuencia, se rechaza la hipótesis que enuncia que la formación de la estructura laminar en los primeros centímetros del suelo bajo SD se debe a presiones generadas por el tránsito con bajo volumen de cobertura de residuos en superficie.

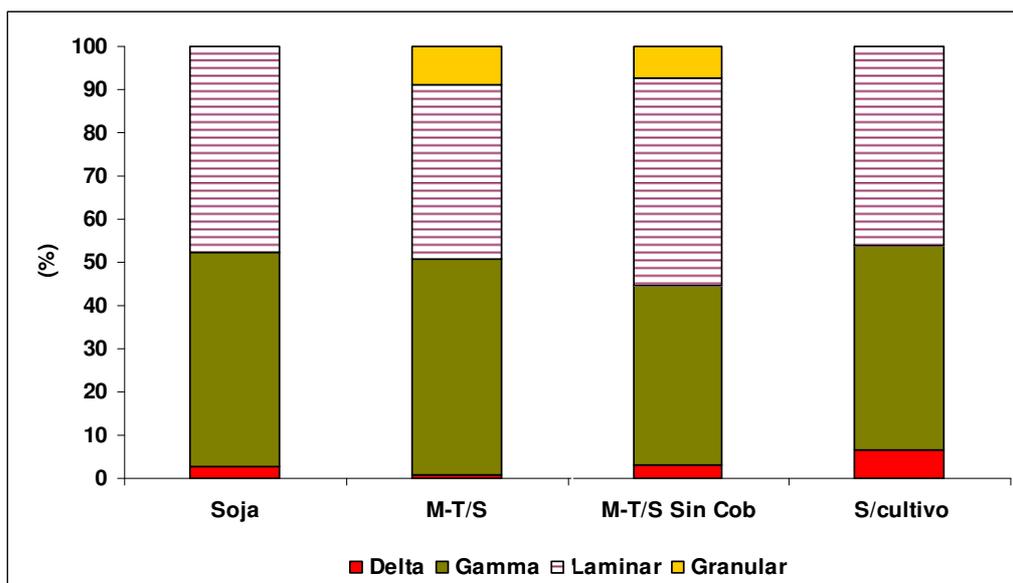


Figura 34. Distribución media de la proporción de los distintos tipos de estructura en los tratamientos NT de las distintas secuencias al finalizar el ensayo.

3.3.3 Ciclos de humedecimiento y secado (ensayo de laboratorio)

3.3.3.1. Evolución de la porosidad total

La comparación entre la altura inicial (10 cm) y la altura final de cada columna (n=36) luego del correspondiente número de ciclos de h-s, mostró que el nivel superior de las columnas se incrementó en todos los casos (Figura 35), indicando un incremento general de la porosidad total.

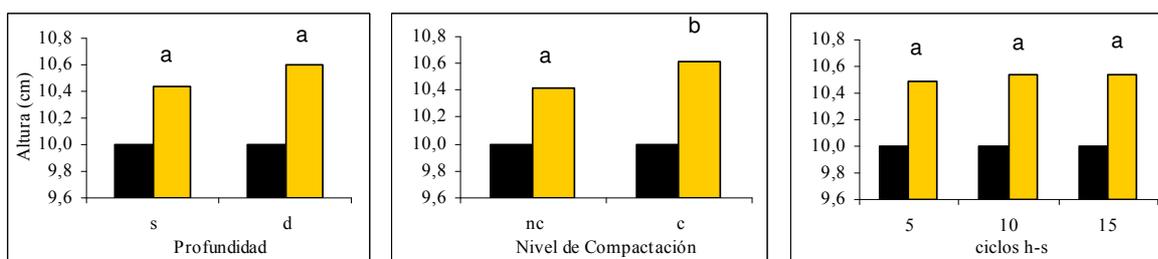


Figura 35. Altura inicial (en barras negras) y final (en barras amarillas) de las columnas de suelo. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0,05$). s= 0-0,05 m, d= 0.05-0.2 m, nc= no compactado, c= compactado.

Hubo una fuerte relación lineal entre la Dap inicial y la final ($r=0,95$), independientemente de la profundidad o el número de ciclos de h-s. El cambio de volumen fue mayor para las muestras con elevado nivel de compactación (c), distintivo de zonas de pasaje de ruedas, que para las muestras con bajo nivel de compactación (nc; compactación típica bajo SD). El análisis de varianza indicó que la altura final se incrementó significativamente con el tratamiento de elevada compactación y que no fue afectada ni por la profundidad (Figura 35a), ni por el número de ciclos de h-s (Figura 35c). Estos resultados son destacables para un horizonte de suelo con arcillas

preponderantemente illíticas y con una matriz con más de 50% de limo (Cosentino y Pecorari 2002; Iñiguez y Scoppa 1970).

Tal incremento en la porosidad total pudo deberse al reacomodamiento de las partículas constitutivas así como a la formación de fisuras y grietas asociadas con los ciclos de h-s. En primer lugar, se analizará el efecto de las fisuras verticales, que fueron visibles en la superficie de las columnas y luego el de las modificaciones de la estructura interna.

3.3.3.2. Fisuras verticales

Se analizó la fisuración con las fotografías digitales tomadas de la superficie de las 36 columnas luego de 3 a 15 ciclos de h-s (Figura 36). Las fisuras aparecieron justo después del primer ciclo de h-s en todos los tratamientos (Figura 37), y luego del incremento inicial, el IF tendió a estabilizarse o decrecer en todos los casos. La reducción del IF ocurrió principalmente en las muestras de la capa más profunda, donde el IF alcanzó los valores más elevados, y más velozmente, especialmente cuando el suelo estaba compactado (Figura 37).

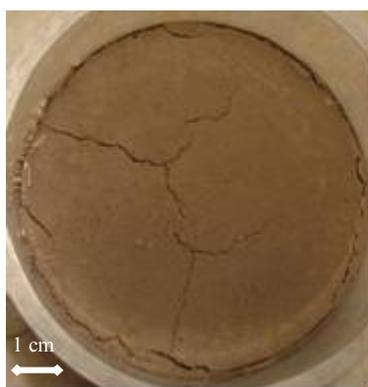


Figura 36. Fotografía de la vista de superficial de una columna no compactada de muestra de suelo del espesor 0,05-0,2 m luego de 15 ciclos de h-s.

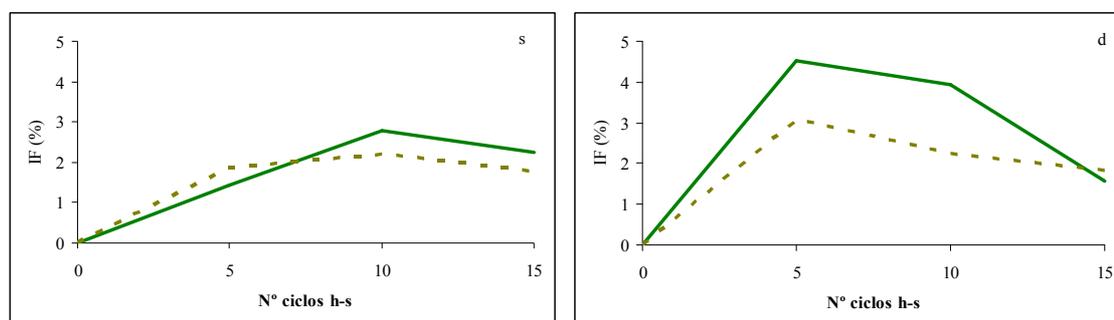
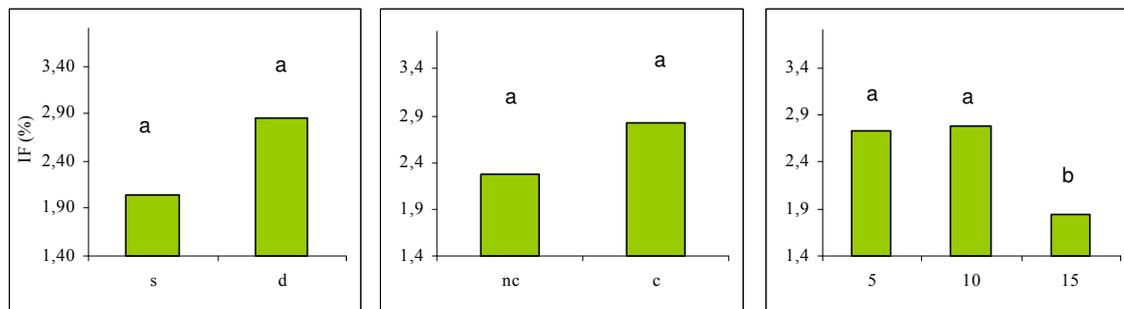


Figura 37. Evolución del índice de fisuración medio (FI) con los ciclos de h-s en las columnas de suelo con muestras de 0-0,05 m (s) y 0,05-0,2 m (d). Las líneas llenas indican los valores medios del tratamiento c y las líneas punteadas los tratamientos nc.

Luego de 15 ciclos de h-s, no se observaron diferencias entre tratamientos (profundidad y nivel de compactación). El análisis de varianza (Figura 38) mostró que

el IF alcanzó valores significativamente elevados en el suelo de la capa 0,05-0,2 m (que tiene menor contenido de Carbono orgánico y mayor contenido de arcilla, Tabla 4) y en el tratamiento compactado, y también mostró una disminución significativa de IF después de 15 ciclos de h-s (Figura 38). Usando la misma metodología de análisis en un Vertisol, Sarmah et al. (1996) observaron que el IF disminuyó con el incremento del número de ciclos de h-s, alcanzando un mínimo en nueve ciclos. Estos autores atribuyeron este comportamiento al sellado superficial y al desarrollo de una costra. Por ello, se tomó especial cuidado de evitar el sellado de la superficie con un



humedecimiento muy lento, casi sin energía cinética. Sin embargo, se observó una marcada reducción de la infiltración a través de sucesivos ciclos, principalmente en las columnas con alto nivel de compactación, que puede indicar que había ocurrido sellado.

Figura 38. Valores medios del Índice de fisuración (IF). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0,05$). s= 0-0,05 m, d= 0.05-0.2 m, nc= no compactado, c= compactado y 5, 10 y 15= 5, 10 y 15 ciclos de h-s.

Después de 15 ciclos de h-s, las fisuras cubrieron aproximadamente 2% de la superficie del suelo en cualquier tratamiento. Si hipotetizamos que las fisuras se extienden hasta la profundidad del frente de mojado, aproximadamente 5 cm, el volumen de fisuras verticales es del orden de 6 cm³. Una comparación con la amplitud de los cambios de volumen de las columnas observado (valor medio = 33 cm³) muestra que la fisuración vertical podría explicar una pequeña parte del cambio en porosidad. Además, la creación de grandes vacíos en forma de fisuras es probablemente compensada por un incremento en la Dap del suelo entre las fisuras por la retracción. Pardini et al. (1996) encontraron que los ciclos de h-s pueden incrementar la porosidad, por la formación de grandes grietas y fisuras. Sin embargo, estos autores también hallaron una disminución en el volumen del suelo con ciclos de h-s crecientes, sugiriendo que la alternancia de ciclos de h-s puede causar compactación de la estructura interna (Pardini et al. 1995).

En este experimento los cambios en la estructura interna del suelo no se reflejaron completamente en la geometría superficial. Por otra parte, la observación directa de las paredes de los cilindros transparentes fue impedida por partículas de suelo adheridas a ellas. Por consiguiente, se realizaron observaciones morfológicas sobre perfiles verticales teñidos con el trazador *Brilliant Blue* en una submuestra de 12 columnas (1 de las 3 repeticiones de cada tratamiento).

3.3.3.3. Observaciones morfológicas en perfiles verticales

Se observó presencia de estructura laminar (con agregados aplanados) de espesor variable en la mayoría de los cilindros (Figura 39). Esto confirma que la alternancia de eventos de humedecimiento y secado puede causar modificación estructural del suelo. Pagliai et al. (1983) atribuyeron la orientación estratificada de agregados al efecto de presiones y tensiones causadas por humedecimiento y secado. El hinchamiento diferencial, el aire atrapado, la re-orientación de los agregados y el depósito de material disperso podrían inducir la reestructuración de la estructura limosa masiva. Aquí, el espesor de la estructura laminar osciló entre 0 y 20 mm. En el caso de la capa superficial no compactada, el menor espesor fue obtenido luego de cinco ciclos de h-s, mientras que en la capa superficial compactada, el mayor espesor fue obtenido luego de quince ciclos de h-s, sugiriendo que la magnitud de la estructura laminar que se desarrolla en la capa superficial compactada puede estar vinculada a la acción del clima.



Figura 39. Fotografía del corte longitudinal de los primeros 2 centímetros de una columna no compactada de muestra de suelo del espesor 0,05-0,2 m luego de 15 ciclos de h-s

Hubo una relación significativa ($p=0,039$) pero débil ($R^2=0,29$) entre el número de ciclos de h-s y el espesor de la capa de estructura laminar. Sin embargo, si se analiza la relación separadamente para cada tratamiento (profundidad y nivel de compactación), aparece una fuerte relación para las muestras de superficie (0-0.05 m): el espesor de la capa de estructura laminar se incrementó allí con el número de ciclos de h-s ($R^2=0,55$). En contraposición, para las muestras de 0,05-0,20 m, el espesor de la estructura laminar no dependió del número de ciclos de h-s, sino más bien permaneció constante y alrededor de 10 mm. Esto sugiere una rápida evolución a partir del primer ciclo de h-s, que es coincidente con el hecho de que las fisuras verticales también se desarrollaron rápidamente luego del primer ciclo de h-s en la capa más profunda.

También hubo una relación significativa ($p=0,0176$) aunque débil ($R^2=0,36$) entre la fisuración vertical (IF) y el desarrollo de la estructura laminar (Figura 40). La rápida infiltración del agua por las fisuras verticales y el subsecuente movimiento lateral de agua y gases asociado puede originar esta interacción entre fisuración vertical y desarrollo de la estructura laminar (Hillel, 2004). En este sentido, a campo, la profundidad de las fisuras generadas, canales de la fauna y/o grietas por la apertura de surcos durante la siembra podrían condicionar el espesor de la estructura laminar (Figura 41). Sin embargo, mientras el espesor de la estructura laminar se incrementó o permaneció estable con el incremento de ciclos de h-s, el IF decreció con el incremento del número de ciclos, en particular para el suelo de la capa más profunda.

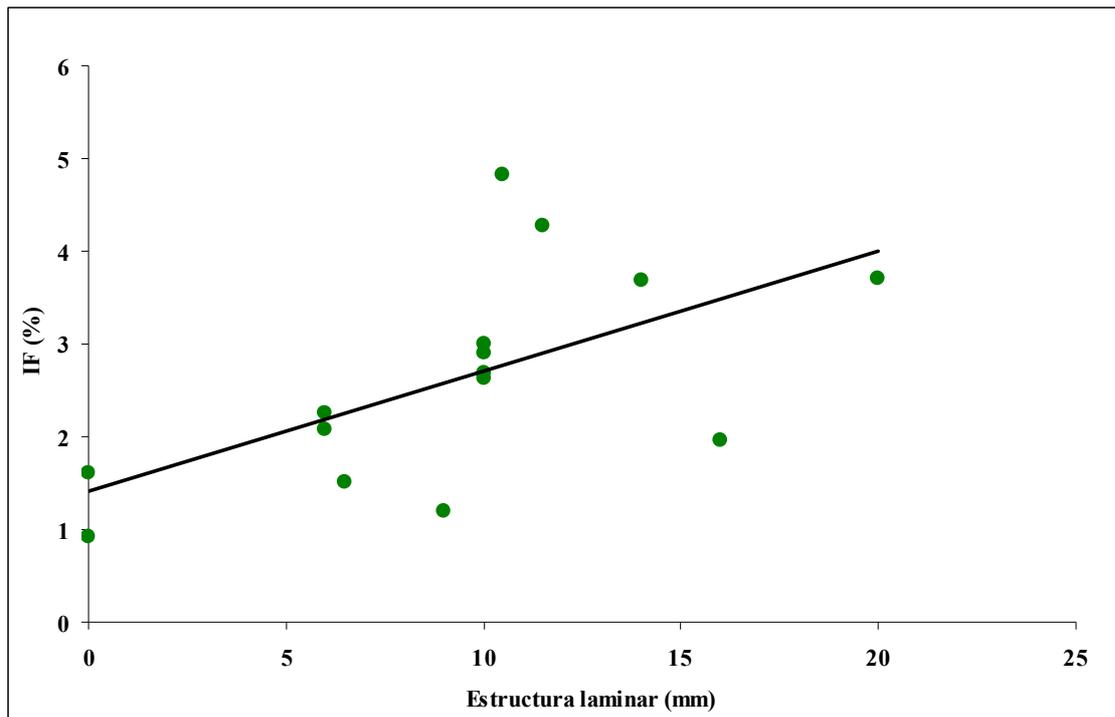


Figura 40. Relación entre espesor de la estructura laminar e índice de fisuración (IF)

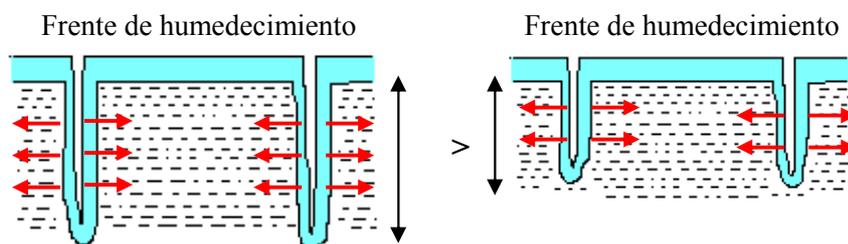


Figura 41. Frentes de humedecimiento durante la el ingreso de agua al suelo con fisuras verticales de diferente profundidad (adaptado de Hillel, 2004).

Si bien es detectable el rol del nivel de compactación (D_{ap} inicial) sobre el espesor de la estructura laminar, no resulta tan claro este rol como la influencia del número de ciclos de h-s. Existió relación lineal y directa ($R^2=0,40$) entre la D_{ap} inicial y el espesor de la estructura laminar. Sin embargo, la relación entre los cambios observados en la estructura superficial (espesor de la estructura laminar) y los cambios en la porosidad total de la columna fue débil ($R^2=0,34$) (Figura 42). En consecuencia, el desarrollo de la estructura laminar en superficie no fue la única causa de los cambios de volumen del suelo.

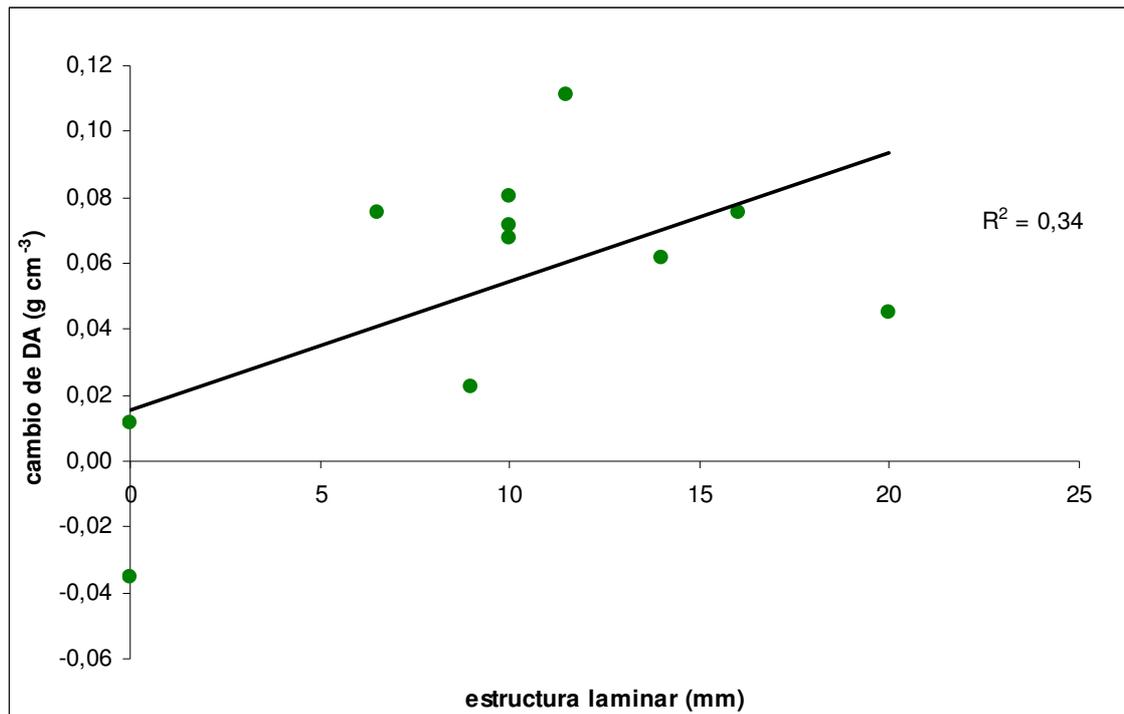


Figura 42. Regresión lineal entre el espesor de la estructura laminar y el cambio de densidad aparente

Los resultados obtenidos con este ensayo de laboratorio mostraron que los ciclos de h-s tuvieron el potencial de inducir cambios en la estructura del suelo, particularmente en suelos compactados. Se observó un incremento generalizado en la porosidad total y modificaciones de la estructura del suelo visibles en la forma de fisuras verticales y desarrollo de estructura laminar en superficie. En consecuencia, se acepta la segunda hipótesis que enuncia que la estructura laminar bajo SD puede desarrollarse a partir de un estado masivo y/o compactado por fisuración debida a ciclos de h-s.

3.3.4. Impedimentos a la penetración de raíces (ensayo d laboratorio)

3.3.4.1. Intervalo hídrico óptimo (IHO)

El IHO decreció con el incremento de D_{ap} (Figura 43). Los valores máximos de IHO fueron encontrados a $D_{ap} = 1,10 \text{ Mg m}^{-3}$ ($0,169 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). A D_{ap} elevadas ($>1,3 \text{ Mg m}^{-3}$), el límite superior del IHO fue definido por θ_{AP} , mientras que a bajos valores de D_{ap} ($1,10\text{-}1,20 \text{ Mg m}^{-3}$), el límite superior fue definido por θ_{CC} . El límite inferior del IHO fue definido por θ_{RP} en los diferentes valores de D_{ap} .

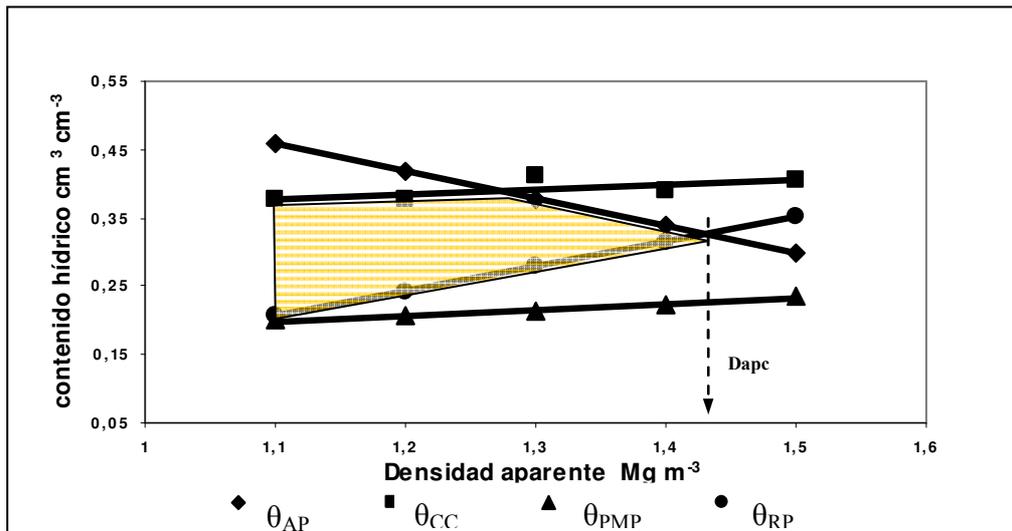


Figura 43. Contenido hídrico en función de la densidad aparente. θ_{AP} , contenido hídrico a porosidad de aireación 10%; θ_{CC} , contenido hídrico a capacidad de campo; θ_{PMP} , contenido hídrico a punto de marchitez permanente y θ_{RP} , contenido hídrico a 2 MPa de resistencia de suelo. D_{apc} , densidad crítica (IHO=0). El área rayada representa el IHO.

La D_{apc} se define como la intersección de los límites superior e inferior del IHO, donde el IHO se iguala a 0 (Imhoff et al. 2001). En consecuencia, la D_{apc} del horizonte A del Argiudol ácuico fue 1,44 Mg m⁻³ (Figura 43). Este resultado es comparable con los encontrados por Griffith et al. (1977) para suelos franco arcillo limosos (D_{apc} entre 1,40 Mg m⁻³ y 1,5 Mg m⁻³).

3.3.4.2. Cambio volumétrico

La Figura 44 muestra el cambio de volumen debido al humedecimiento del suelo después de los tratamientos de compactación en los cilindros no cultivados. Se produjo una reducción de volumen a menores valores de D_{ap} (<1,3 Mg m⁻³), lo cual explica la compactación a campo luego de una lluvia en suelo recientemente laboreado. Por otro lado, los cambios de volumen fueron positivos con D_{ap} >1,30 Mg m⁻³, siendo máximos a 1,40 Mg m⁻³ (>7,5% mayores que el volumen inicial). Este resultado es coincidente con el obtenido en el otro ensayo de laboratorio, donde se registraron aumentos de volumen inducidos por la compactación luego de un ciclo de h-s.

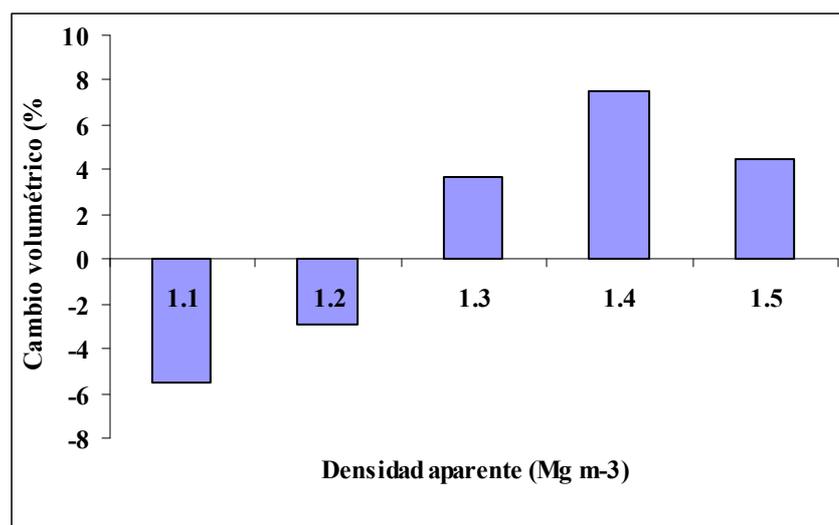


Figura 44. Cambio volumétrico en función de la densidad aparente.

3.3.4.3. Crecimiento temprano de trigo

Muchos autores señalan el rol de la compactación como una de las principales causas de degradación de suelos (Dexter 2004; Hamza y Anderson 2005). La reserva de agua, la aireación del suelo, la temperatura y la resistencia del suelo al crecimiento de las raíces están negativamente afectadas por la compactación (Håkansson 1994; Lipiec et al., 1991; Sadras et al. 2005; Soane y Van Ouwerkerk 1995). Los efectos de la compactación del suelo sobre el crecimiento de los cultivos ha sido muy estudiado (Andrade et al. 1993; Masle y Passioura 1987; Passioura 1991; Passioura 2002). El principal impacto de la densificación el suelo, usualmente cuantificado por RP, sobre el crecimiento de las plantas, es la reducción del crecimiento de las raíces (Bengough y Mullins 1990; Materechera et al. 1991) y de la biomasa aérea (Andrade et al. 1993; Sadras et al. 2005).

El crecimiento aéreo y radical y la relación entre biomasa radical/aérea fue similar con valores de Dap inferiores a 1,30 Mg m⁻³ (Tabla 10). Con una Dap de 1,4 Mg m⁻³ se redujo el crecimiento de las biomasa aérea y radical, mientras que con una Dap de 1,5 Mg m⁻³ no se registró crecimiento (no hubo emergencia). Estos resultados pueden ser atribuidos a la falta de aireación en los tratamientos con alta Dap, debido a que el contenido hídrico fue mantenido a capacidad de campo, y θ_{CC} fue superior que θ_{AP} . Ball et al. (1997) encontraron relación entre Dap y crecimiento de raíces de cebada de primavera bajo SD. Estos autores informaron que la porosidad, más que la resistencia, afecta el rendimiento de los cultivos en clima húmedo, debido a que los suelos con bajo volumen de macroporos se tornan anaeróbicos fácilmente. La anaerobiosis causa desnitrificación y dificulta el crecimiento de las raíces.

Tabla 10. Biomosas aérea y radical y relación aérea/radical de trigo luego de dos meses de crecimiento. Experimento conducido en macetas con diferentes densidades aparentes

Densidad aparente Mg m ⁻³	Biomasa g por cilindro		
	Aérea	radical	radical/aérea
1,10	0,29 a	0,05 a	0,15 a
1,20	0,25 a	0,04 a	0,14 a
1,30	0,29 a	0,04 a	0,13 a
1,40	0,11 b	0 b	0,07 b
1,50	0 b	0 b	0 b

La Dap_f (luego del secado del suelo) explicó entre 60 y 70% del crecimiento de biomasa aérea y de raíces (Tabla 11) ($p < 0,01$). Estos resultados están de acuerdo con los encontrados por Venanzi et al. (2002), quienes informaron una reducción lineal de la biomasa de raíces y del área foliar de trigo con crecientes valores de Dap mayores que $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$.

Tabla 11. Valores de probabilidad y coeficientes de determinación (R^2) de regresiones lineales entre densidad aparente final (Dap_f) y biomosas aérea y radical y relación aérea/radical de trigo luego de dos meses de crecimiento

		p	R^2
Dap_f	vs Biomasa aérea	<0,01	0,61
	Biomasa radical	<0,01	0,60
	Raíz/aérea	<0,01	0,70

La reducción en el crecimiento de biomasa aérea y radical causado por la compactación impacta sobre la captura de recursos (agua y radiación solar) y el rendimiento de los cultivos (Sadras et al. 2005). La compactación limita la captura de radiación solar a través de la regulación de la expansión de las hojas (Andrade et al. 1993; Masle y Passioura 1987). Aunque la reducción de la expansión foliar y el crecimiento de la biomasa aérea pueden estar relacionados con la inhabilidad de las raíces para abastecer de agua y nutrientes, hay importantes evidencias que indican que estas respuestas son mediadas por señales inhibitoras raíz-biomasa aérea (Bingham 2001; Passioura 2002), ya que el crecimiento radical está usualmente menos afectado que el crecimiento aéreo (Andrade et al. 1993). Sin embargo, los resultados encontrados parecen contradecir los resultados de Andrade et al. (1993). Debe tenerse en cuenta que en estas condiciones experimentales se incluyó el mantenimiento del suelo a θ_{CC} , lo cual pudo afectar la biomasa de raíces y la relación raíz/aérea debido a la insuficiente aireación a valores de $Dap > 1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 43).

De acuerdo con el valor de Dap_c obtenido usando el IHO, el suelo alcanzó una Dap restrictiva para el crecimiento de plantas a $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$. Las biomosas aérea y radical decrecieron siguiendo el IHO, no registrándose crecimiento de raíces y falta de emergencia cuando el IHO fue cero ($\approx 1,4 \text{ Mg m}^{-3}$). Chan et al. (2006) hallaron que el IHO se redujo a valores cercanos a 0 bajo huellas de ruedas, generando una reducción significativa en el crecimiento de las raíces de trigo.

3.3.4.4. Relación con los resultados encontrados en los ensayos anteriores

Las Dap de las estructuras Γ y Δ del ensayo de campo (tránsito y cobertura) oscilaron entre 1,36-1,58 y 1,49-1,60 Mg m^{-3} , respectivamente. Es decir que, independientemente de los tratamientos, todas las parcelas tuvieron valores restrictivos para la profundización de las raíces en el horizonte superficial. Numerosos trabajos muestran evidencias del efecto de la compactación sobre el crecimiento de las raíces de los cultivos y, particularmente sobre la arquitectura y distribución de las raíces. Konopka et al. (2009) encontraron que la longitud de las raíces laterales de maíz estaba asociada positivamente con la Dap. Ball-Cohelho et al. (1998) hallaron que bajo SD, el desarrollo de raíces de maíz es más superficial y está distribuido lateralmente en comparación con suelos laboreados. Si bien los ensayos analizados en este Capítulo no fueron diseñados para evaluar cambios en la morfología de las raíces, en la Figura 45 puede observarse el desarrollo lateral de raíces de maíz entre los agregados de la estructura laminar en una de las parcelas de M-T/S del ensayo de campo.

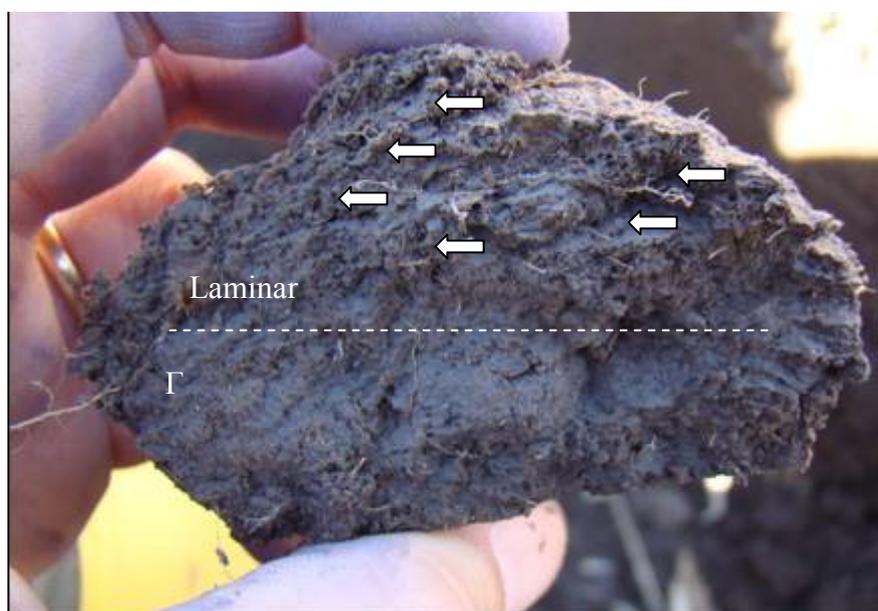


Figura 45. Crecimiento de raíces de maíz entre agregados de la estructura laminar bajo SD.

Las raíces de las leguminosas también son sensibles a la compactación. Vocanson et al (2006) observaron el efecto de la compactación sobre la profundidad final de exploración de raíces de arveja de distintos cultivares a través de mapas de raíces en perfiles. También, Place et al. (2008) indicaron que las raíces de soja presentaron dificultades para perforar capas compactadas a 8 cm de profundidad aún en condiciones de alta fertilidad química, constituyendo una desventaja competitiva frente al crecimiento de las malezas. La Figura 46 muestra el crecimiento lateral de una raíz principal de soja a 5 cm de la superficie del suelo entre los agregados de la estructura laminar en una parcela de S del ensayo de campo.



Figura 46. Crecimiento lateral de la raíz principal de soja en SD.

En la Tabla 12 se presentan los valores medios de Dap de los distintos tipos de estructura muestreados en el ensayo de tránsito y cobertura en 2010. La Dap media de las estructuras Γ y Δ superó el umbral de Dapc establecido en laboratorio para el crecimiento en biomasa aérea y radical de trigo. La restricción a la profundización de las raíces de estas estructuras induciría a las raíces a explorar capas menos densas, contribuyendo así con la formación de estructura laminar en los tratamientos con cultivos. Sin embargo, este razonamiento no podría aplicarse al tratamiento NC. En este caso, podría sólo explicarse por la fisuración debida a ciclos de h-s de la estructura gamma que se presentaba en el 95% del perfil del horizonte superficial al inicio del ensayo (Figura 26).

Tabla 12. Valores medios de densidad aparente de cuatro tipos de estructura del ensayo de tránsito y cobertura.

	Densidad aparente	
	$Mg\ m^{-3}$	
Granular	1,09	a
Laminar	1,20	a
Gamma	1,52	b
Delta	1,58	b

Letras distintas indican diferencias significativas, LSD $p > 0,05$.

Los resultados obtenidos en este ensayo de laboratorio probaron que la Dap de la estructura masiva que subyace a la estructura laminar es crítica para el crecimiento de las raíces, favoreciendo su crecimiento lateral entre los agregados de la estructura

laminar. Por consiguiente, no se encontraron evidencias para rechazar la tercera hipótesis.

3.4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este capítulo constituyen un avance muy importante en el entendimiento de la evolución de la estructura de suelos limosos bajo SD. Se pusieron a prueba tres hipótesis sobre la formación de la estructura laminar. La primera, propuso poner a prueba una idea frecuente en el medio profesional: que la formación de la estructura laminar resulta del colapso de macroporos debido al tránsito con bajo volumen de cobertura superficial. A pesar de ser la más divulgada, los resultados del ensayo de campo indicaron que el tránsito de maquinaria agrícola y la cobertura superficial de residuos de cosecha no afectaron la evolución de la estructura. En todos los tratamientos analizados, el patrón estructural evolucionó hacia la formación de una estructura laminar desde la superficie, con reducción de la proporción de estructura Γ asociada.

La segunda hipótesis postulaba la ocurrencia de estructura laminar como un caso de re-estructuración de un estado masivo y/o compactado bajo SD, que se fisura por acción de los ciclos de h-s y evoluciona hacia un tipo de estructura laminar. La realización de este ensayo con disturbio de las muestras de suelo intentó independizar la historia de manejo del suelo y exaltar efectos ligados al estado de compactación. Se dedujo que los ciclos de h-s resultan en el rápido desarrollo de estructura laminar cerca de la superficie del suelo. Sin embargo, la evolución de la estructura bajo la influencia de los ciclos de h-s es compleja: las modificaciones de la estructura observadas no pudieron explicar totalmente el incremento de la porosidad total, y las diferencias en el comportamiento entre las muestras tomadas en superficie y aquellas tomadas una capa más profunda.

Finalmente, se postuló una tercera hipótesis que involucraba la acción de las raíces en la formación de la estructura laminar por el crecimiento lateral y la exploración de la capa superficial del suelo bajo SD debido al impedimento en su profundización por elevados valores de Dap. Si bien de esta hipótesis se desprende que la formación de la estructura laminar podría favorecerse por presiones generadas en el crecimiento de las raíces entre agregados de la estructura laminar (o fisuras) y/o por su influencia a través de la extracción de agua sobre los ciclos de h-s, el alcance de la investigación realizada no permitió evaluar estos supuestos.

Los resultados del experimento de laboratorio permitieron arribar a un valor de Dapc ($1,44 \text{ Mg m}^{-3}$) usando un indicador de calidad edáfica como el IHO, lo cual permitió evaluar su efecto sobre el crecimiento temprano de trigo. En coincidencia, el crecimiento de las raíces de trigo tuvo limitaciones a $\text{Dap} > 1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ debido a la falta de aireación más que a la elevada resistencia a la penetración. Las estructuras Γ y Δ del ensayo de campo presentaron valores superiores a la Dapc obtenida.

Los resultados de los dos ensayos de laboratorio corroboran la importancia de las estructuras masivas en la formación de la estructura laminar, tal como fue analizado en el Capítulo 2. En el próximo capítulo se analizarán propiedades físicas e hidrológicas

de este tipo de estructura que permitan mejorar la comprensión del origen de la estructura laminar.

CAPITULO 4

*Características de la estructura que da
origen a la estructura laminar*

4.1 INTRODUCCIÓN

Del análisis de la información relevada de los muestreos de Arjudoles en la Pampa Húmeda se destacan la velocidad y la dinámica de los cambios en la estructura del horizonte superficial de suelos limosos sin remoción, que no poseen proporción relevante de arcillas expandentes ni procesos de fisuración por congelamiento (Capítulo 2). Se ha demostrado, en condiciones de laboratorio, que a través de ciclos de h-s en una estructura masiva pueden generarse fisuras y formarse una estructura laminar (Capítulo 3). Sin embargo, se desconoce el número de ciclos de h-s que se generan a campo anualmente, cómo influyen las secuencias de cultivo y si hay características físicas de la estructura masiva Γ que favorecen la formación de la estructura laminar.

El espesor y/o la proporción de la estructura laminar en el horizonte superficial podrían ser directamente proporcionales al número de ciclos de h-s registrados. Sin embargo, se ha observado que la estructura laminar no evoluciona en forma lineal y está asociada con la secuencia de cultivos (Capítulo 2). En efecto, las distintas secuencias de cultivo bajo las condiciones climáticas de una misma región, en función de su captura de agua y radiación, la capacidad de exploración del perfil de las raíces y el volumen de residuos de cosecha, podrían provocar diferente número de ciclos de h-s en el año. Por otro lado, el análisis de la formación de estructura laminar por fisuración de una estructura masiva mediante ciclos de h-s requiere profundizar el conocimiento del funcionamiento hídrico edáfico.

Existe consenso en que, para poder verificar en forma independiente cualquier tecnología en un territorio, se debe contar con datos provenientes de experimentos de largo plazo, con bases de datos confiables de clima y manejos de la tierra. Su valor científico y práctico es inconmensurable y continúa creciendo con los años. Esto compensa el elevado esfuerzo y costo que requiere su mantenimiento y minimiza el efecto de variables que no pueden ser controladas. Los ensayos de larga duración son fuentes de conocimiento indispensables, vitales para el entendimiento, monitoreo y prueba de los cambios producidos en el suelo como resultado del uso de distintas prácticas agrícolas. La Estación Experimental de INTA Pergamino posee un ensayo de labranzas y rotaciones de más de 30 años de duración. En este ensayo puede analizarse el efecto de largo plazo sobre el suelo de secuencias de cultivo bajo SD. Particularmente, en este capítulo se analizarán los efectos del tránsito, los ciclos de h-s y algunas propiedades físicas del suelo sobre la formación de la estructura laminar.

La formación de la estructura laminar es de naturaleza compleja. Los resultados hasta aquí obtenidos muestran que la intensificación de la secuencia de cultivos, medida mediante el ISI, resultó un buen indicador de la proporción de estructura laminar en el perfil del horizonte superficial (Capítulo 2). Por ello, en este capítulo, se propone analizar comparativamente dos tratamientos de largo plazo con valores de ISI contrastantes: Monocultivo de soja y Rotación maíz-trigo/soja.

En los capítulos anteriores (2 y 3), también se identificaron propiedades edáficas que complementan la aproximación del perfil cultural, como la RC, la Dap y la PE. Estas propiedades permitieron mejorar la descripción de las características morfológicas del horizonte superficial y otorgar mayor precisión física en la determinación de los

límites de cada tipo de estructura. Sin embargo, no permiten identificar las características de la estructura Γ que favorecen la formación de la estructura laminar. En este capítulo se abordarán otras propiedades edáficas directamente relacionadas con la circulación del agua, e indirectamente con los ciclos de h-s en el suelo, para identificar aquéllas asociadas a la formación de estructura laminar bajo SD.

Las hipótesis que sustentan este capítulo son:

- la organización estructural de largo plazo en el horizonte superficial es dependiente de las secuencias de cultivo: el monocultivo de soja genera una elevada proporción de estructura laminar continua y la rotación maíz-trigo/soja una elevada proporción de estructura granular;
- el monocultivo de soja desarrolla un mayor número anual de ciclos de h-s a campo debido al menor aporte de residuos para cobertura de la superficie que la rotación;
- la estructura Γ del monocultivo de soja tiene características físicas, mecánicas y de velocidad de drenaje que favorecen la formación de la estructura laminar.

Los objetivos de este capítulo fueron:

- i. evaluar el patrón estructural de largo plazo del horizonte superficial bajo monocultivo de soja y rotación maíz-trigo/soja;
- ii. cuantificar los ciclos de h-s a campo en ambas secuencias de cultivos;
- iii. analizar algunas propiedades físicas, mecánicas e hidrológicas de la estructura Γ de ambas secuencias de cultivos

4.2 MATERIALES Y METODOS

El ensayo utilizado para este capítulo se encuentra localizado en el campo experimental de INTA Pergamino (Figura 47). El suelo corresponde a un Argiudol típico de textura franco limosa serie Pergamino sin fases por erosión con pendiente $<0,5\%$ (INTA 1972). Los valores medios de arcilla y limo para el horizonte Ap (0-0,2 m de profundidad) son de 230 y 580 g kg⁻¹, respectivamente.

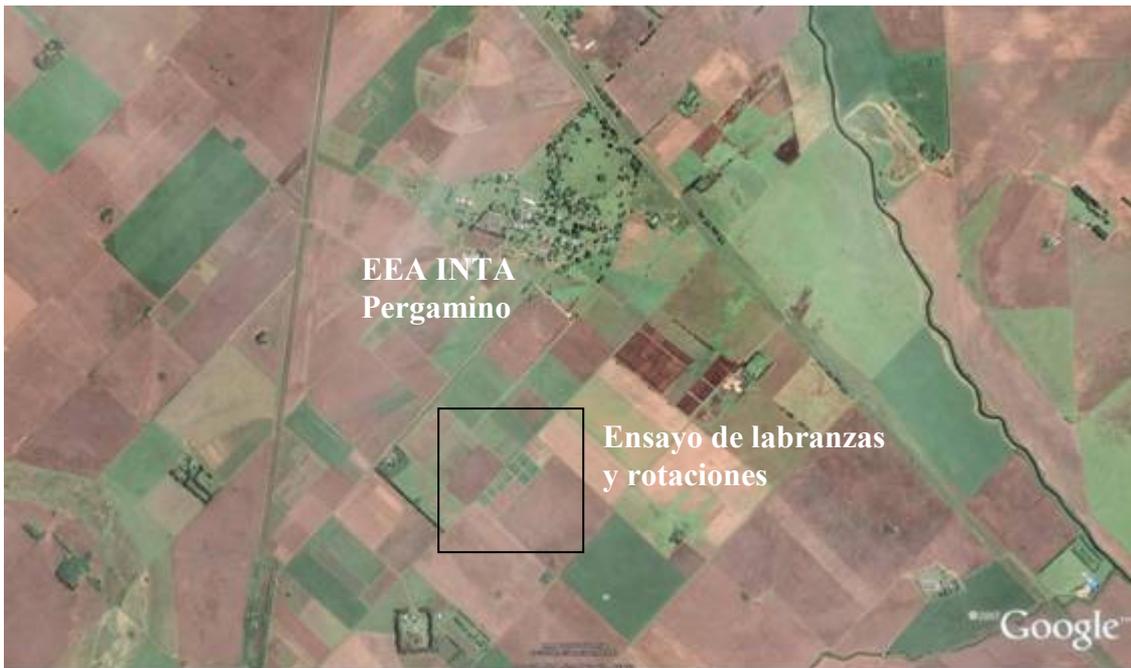


Figura 47: Ubicación del ensayo de labranzas y rotaciones de 32 años de antigüedad. EEA INTA Pergamino

El ensayo de larga duración fue montado en 1979 por los Ings. Oscar Hansen y Victor Zeljovich. Este experimento se implantó con la finalidad de evaluar el efecto de distintas intensidades de labranza sobre los rendimientos de cultivos, incluyendo un sistema inédito en la región en ese momento: la siembra directa. En la actualidad, el ensayo ha adquirido una antigüedad que permite analizar efectos de largo plazo de prácticas agrícolas.

El ensayo tiene un diseño muy complejo con 76 parcelas de 14 m de ancho y 45 m de largo que incluyen 5 sistemas de labranza y cuatro rotaciones de cultivo que se iniciaron secuenciadamente (Figura 48). Previo a la implementación de los diferentes tratamientos del ensayo, el suelo estuvo sembrado con una pastura de festuca (*Festuca arundinacea* L.) y de trébol blanco (*Trifolium repens*) de 6 años de duración y luego soja con laboreo convencional hasta que se fueron iniciando las diferentes secuencias de cultivo.



Figura 48. Ensayo de labranzas y rotaciones de larga duración. EEA INTA Pergamino.

Para esta tesis sólo se muestrearon las parcelas correspondientes a los tratamientos de SD con rotación maíz-trigo/soja (M-T/S) y con monocultivo de soja (S) (dos bloques). El control de malezas se realizó siempre químicamente con herbicidas de control total. También, se controlaron adecuadamente otros factores, como insectos y enfermedades, para no limitar el rendimiento de los cultivos. Desde el inicio, los cultivos de maíz y trigo se fertilizaron a la siembra con 12 kg P ha^{-1} y con 100 y 90 kg N ha^{-1} , respectivamente.

4.2.1. Mediciones de campo

En el período comprendido entre el 23/10/2007 y el 2/06/2009 se midió potencial agua del suelo con sondas Watermark colocadas en el espesor 5-10 cm (Figura 49) para determinar el número de ciclos de h-s a campo. Las fechas de siembra y cosecha de los cultivos durante la medición de potencial agua se presentan en la Tabla 13.



Figura 49: Sonda Watermark para medición de humedad volumétrica

Tabla 13. Fechas de siembra y cosecha de los cultivos del ensayo de larga duración.

	Campaña	07/08		08/09		09/10
		Siembra	Cosecha	Siembra	Cosecha	Siembra
Rotación M-T/S	Trigo	03/07/07	13/12/07			
	Soja de 2º	02/01/08	23/05/08			
	Maíz			23/10/08	23/04/09	17/07/09
Monocultivo de soja		19/11/07	21/04/08	04/11/08	17/04/09	

Se analizaron los resultados promedio de los dos bloques para cada tratamiento. En cada una de las parcelas se colocaron 2 sondas. Alrededor de una de ellas se estableció una clausura de 2,25 m² durante el período de estudio para evaluar los ciclos de h-s sin el efecto del cultivo (Figura 50). Estas sondas proporcionan valores de tensión y el rango de medición es de 10 a 200 Cbar. Las lecturas se realizaron dos veces por semana a la mañana. En función del rango de medición admitido por las sondas, la amplitud de un ciclo de h-s se estableció como el cambio de humedad entre la tensión correspondiente a -33,3 kPa (capacidad de campo) y aquella inferior a -150 kPa (límite de agua fácilmente disponible). Para convertir las lecturas de tensión a contenido hídrico se construyó una curva de retención hídrica de muestras extraídas del espesor 5-10 cm de ambos tratamientos (tres repeticiones) en laboratorio utilizando mesas de tensión y placa extractora por presión para la determinación de presiones mátricas desde -1 hasta -1500 kPa.



Figura 50: Sondas para medición de humedad volumétrica en el tratamiento Rotación M-T/S. a) clausura de 2,25 m² alrededor de la sonda y b) sonda en cultivo de trigo en macollaje

En la campaña 06/07 se registró el número de pasadas de maquinarias que se utilizaron en cada tratamiento, se marcó en el terreno el lugar de ingreso y recorrido. Se registró el distanciamiento entre ruedas (trocha) y el espesor de los rodados. Con estos datos se realizó un esquema y mediante el análisis de la imagen con el software ImageJ se calculó el área transitada por implementos agrícolas en cada parcela.

4.2.2. Mediciones de laboratorio

Los muestreos se realizaron en 2005, 2008 y 2010, siendo 26, 29 y 31 años la antigüedad de M-T/S y 20, 23 y 25 años del tratamiento S, respectivamente. Se realizaron perfiles culturales (Capítulo 2). Se analizaron la aparición y la velocidad de

desarrollo (espesor) de la estructura laminar y se registró la RC de los distintos estados estructurales. También, se extrajeron muestras de cada tipo de estructura para análisis de Dap y Dat (Capítulo 2). Ambos valores se relacionaron para obtener valores de PE.

En 2008, se extrajeron dos muestras no disturbadas de cada tipo de estructura de cada parcela (cuatro repeticiones), para la realización de un ensayo de drenaje en laboratorio (Figura 51). Para ello, se utilizaron cilindros de 5 cm de diámetro y 3 cm de altura. Cada cilindro fue colocado sobre una placa porosa de yeso y, seguidamente, fue saturado con agua destilada desde la base con una carga hidráulica de 1 cm. El ensayo de drenaje propiamente dicho consistió en la modificación regular, a intervalos de un día, de la succión en la base de la muestra, haciendo variar la altura de salida de una manguera a través de la cual se efectuó el drenaje. Las tensiones sucesivas utilizadas fueron -10 cm, -50 cm, -100 cm, -150 cm y -200 cm. A partir del momento en que la succión se modificó, comenzó la medición del drenaje en un vaso de precipitado pesado a intervalos de tiempo regulares, según la velocidad de desplazamiento del agua hasta que la presión capilar dentro de la muestra alcanzó el equilibrio y éste cesó. Finalmente, cada cilindro fue secado en estufa a 105°C durante 24 hs y luego pesado. Se calculó la Dap, la humedad volumétrica a las tensiones de 1, 5, 10, 15 y 20 kPa (Bezerra de Oliveira 1968) y la porosidad total (PT) de cada muestra a partir de las siguientes fórmulas:

$$\theta = \omega \times Dap \qquad PT = \left(1 - \left(\frac{Dap}{Dr} \right) \right) \times 100$$

donde θ es humedad volumétrica, ω es humedad gravimétrica, Dap es densidad aparente en Mg m^{-3} y Dr es la densidad de la fase sólida equivalente a $2,6 \text{ Mg m}^{-3}$.

Luego se calculó la distribución del tamaño de los poros, utilizando la relación entre la tensión h (en m) y el diámetro de los poros (en μm) siguiente (Hillel 1980):

$$h(m) = 30 / \phi(\mu m)$$

De esta manera, se analizó la cantidad de poros en porcentaje separados en cuatro intervalos (Sasal et al. 2006). El porcentaje de microporos (poros menores que 15 μm) equivale a la humedad volumétrica a 20 kPa, el porcentaje de mesoporos (poros entre 15 y 60 μm) surge de restar el valor de humedad volumétrica a 20 kPa al valor de humedad volumétrica a 5 kPa y el porcentaje de macroporos (poros mayores que 60 μm) surge de restar el valor de humedad volumétrica a 5 kPa al valor de porosidad total. Dentro de éste último rango, se diferenciaron los poros mayores que 300 μm con la θ a 1 kPa. Los valores de PT fueron considerados coincidentes con los de humedad volumétrica en saturación.



Figura 51. Ensayo de drenaje en mesas de succión

En el muestreo final (2010) se tomaron muestras de cada tipo de estructura del suelo y se analizó el C total por combustión seca, utilizando un analizador elemental LECO (Nelson y Sommers 1996) y la estabilidad estructural de agregados por el método de Le Bissonnais et al. (2002).

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Patrón estructural del horizonte superficial de largo plazo

Los perfiles culturales de los tratamientos S y M-T/S de largo plazo (más de 20 años) obtenidos en 2005 presentaron los mismos tipos de estructuras con diferente espesor y proporción dentro del perfil. Las Figuras 52 y 53 presentan perfiles de ambas secuencias con tres fotografías ensambladas, donde pueden observarse las diferencias. En S, los primeros 2 cm del horizonte A (no indicados con hilo) tenían una estructura granular asociada al desarrollo de raíces de soja, debajo, hasta los 8 a 10 cm de profundidad, una estructura laminar continua y finalmente, hasta el horizonte B, una estructura masiva Γ (Figura 52). La rotación M-T/S presentó en superficie una estructura granular de considerable espesor (4 cm), debajo una estructura laminar delgada pero continua de 3,5 cm y luego una estructura Γ (Figura 53). El registro de una estructura laminar en este tratamiento resultó un hallazgo inesperado, ya que en 1999 se había realizado un muestreo detallado del horizonte superficial en este ensayo y no se había detectado su presencia (Sasal et al. 2006). En aquella oportunidad no se había

utilizado la aproximación del perfil cultural, habiendo realizado los muestreos para extracción de muestras con o sin disturbio en pozos de observación de aproximadamente 40 cm de lado. Es probable que esta metodología haya impedido detectar la existencia en dicho momento de estructuras laminares delgadas o discontinuas.



Figura 52: Perfil cultural en Monocultivo de soja realizado en 2005.



Figura 53: Perfil cultural en Rotación M-T/S realizado en 2005.

En 2008 y en 2010 se realizaron nuevamente perfiles culturales en distintos sitios de las mismas parcelas para analizar la evolución del patrón estructural. En las Figuras 54 y 57 se presenta la proporción del horizonte superficial ocupada por los distintos tipos de estructura hallados. En 2008 en el tratamiento S, desapareció la estructura granular y la estructura laminar se presentó desde la superficie hasta 8 a 10 cm y ocupando alrededor del 50% del área del horizonte superficial (Figura 54). Dentro de la estructura Γ se registraron zonas localizadas con estructura masiva Δ , la cual fue de considerable importancia en 2008, ocupando el 13% del área del perfil. Su formación podría atribuirse a efectos del clima. Las campañas 06/07 y 07/08 tuvieron regímenes hídricos contrastantes: en 06/07 la precipitación anual superó al promedio histórico en 176 mm y en 07/08 fue 382 mm inferior (Figura 55). Así, una campaña de régimen hídrico extremadamente bajo como la 07/08 pudo producir consolidación del suelo posterior a las operaciones de tránsito durante la cosecha en el otoño muy húmedo de 2007 (Figura 56). El análisis de los registros históricos de precipitaciones del Observatorio Meteorológico de la EEA Pergamino indica la excepcionalidad de lo ocurrido. En efecto, de los últimos 100 años sólo dos tuvieron tan escasas precipitaciones como la campaña 07/08 y sólo cuatro años tuvieron precipitaciones similares o superiores a las registradas en abril de 2007 durante la cosecha de la soja.

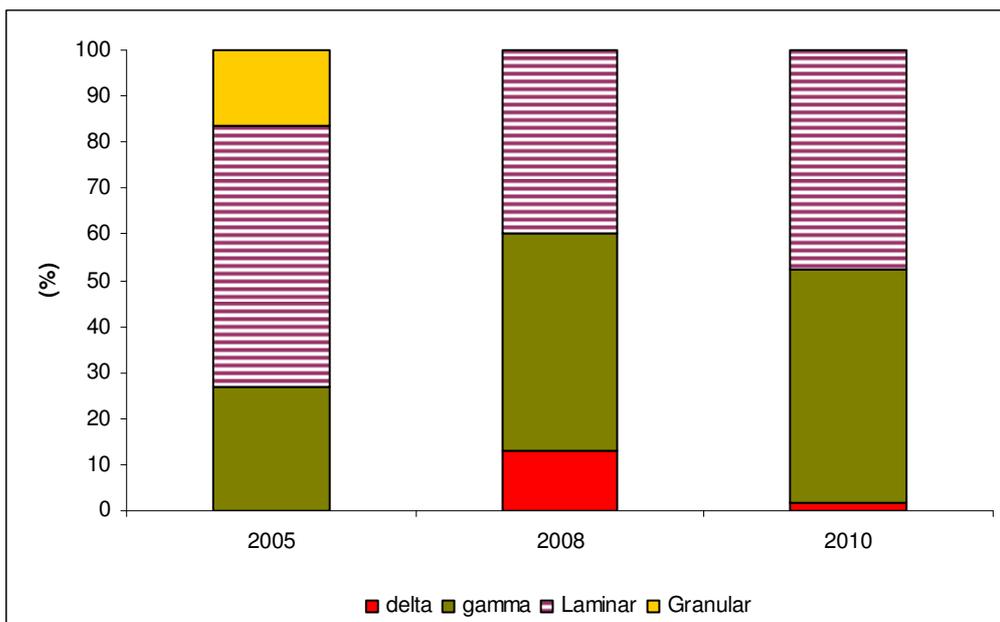


Figura 54: Distribución del área del horizonte superficial (%) ocupada por distintos tipos de estructura en el tratamiento monocultivo de soja

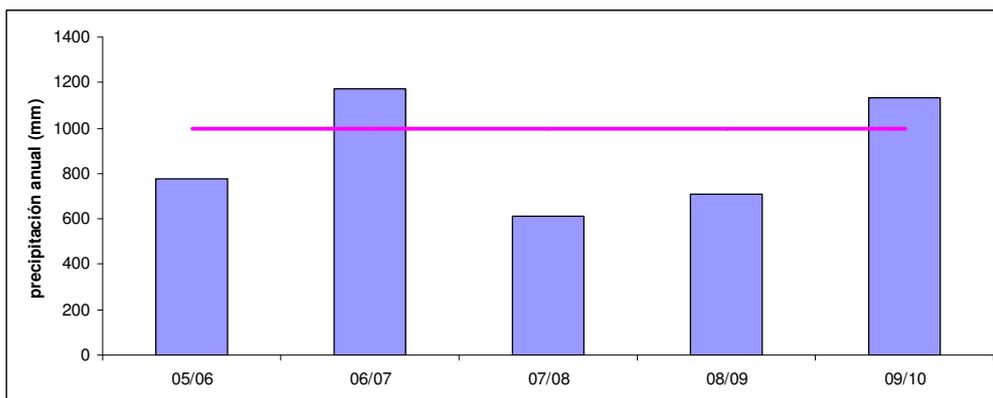


Figura 55: Precipitaciones anuales registradas durante el período de estudio. La línea indica la precipitación anual promedio histórica (1910-2010). Datos obtenidos del Observatorio de INTA Pergamino.

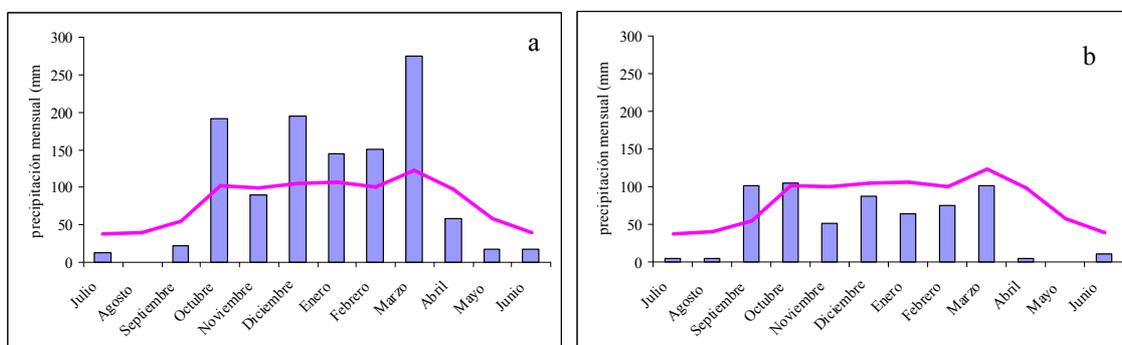


Figura 56: Precipitaciones mensuales registradas durante a) campaña 06/07 y b) campaña 07/08. La línea indica la precipitación mensual promedio histórica. Datos obtenidos del Observatorio de INTA Pergamino.

La rotación M-T/S, mantuvo la estructura granular en superficie (Figura 57). En 2008 aumentó su espesor a 9 cm y luego se redujo a 6 cm en 2010. El espesor de la estructura laminar también tuvo variaciones. En 2005 la estructura laminar era continua y con un espesor de 3,5 cm. En 2008, dicha estructura estaba discontinua y muy delgada (1 a 2 cm). En 2010, se presentó nuevamente continua, con más de 4 cm de espesor y ocupando más de 20 % del área del perfil. También, en 2010 se observó la aparición de estructura Δ focalizada en zonas aisladas dentro de la estructura Γ pero ocupando sólo un 4 % del perfil.

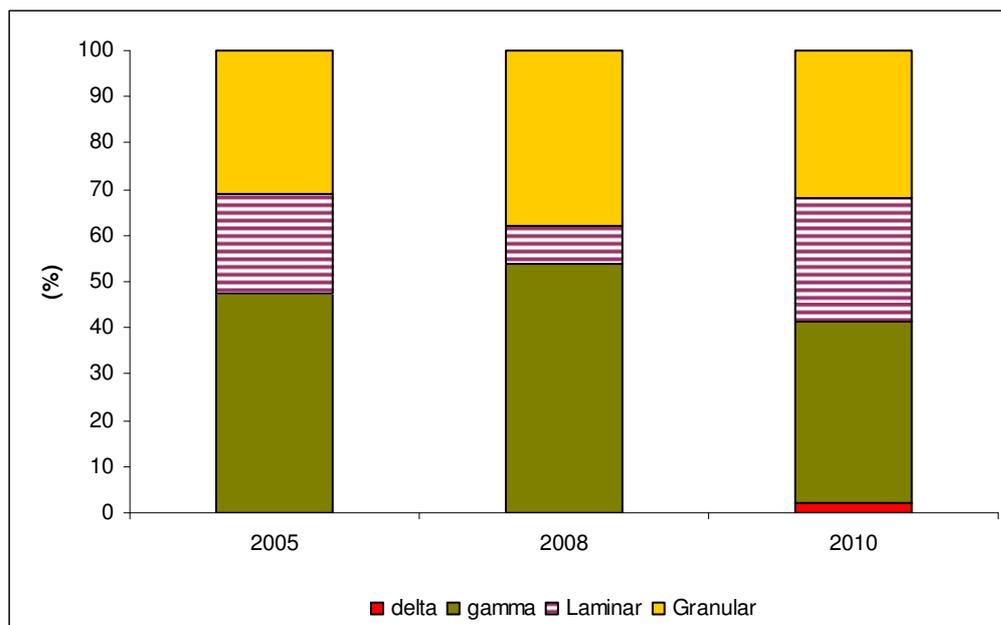


Figura 57: Distribución del área del horizonte superficial (%) ocupada por distintos tipos de estructura en el tratamiento M-T/S

Los perfiles culturales realizados muestran estados estructurales con variaciones en el corto plazo, aún luego de más de 20 años de establecidas las secuencias de cultivos. La estructura que menos variaciones presentó en cuanto a su espesor y proporción del área del perfil ocupada, fue la estructura Γ que en ambos tratamientos se encontró subyacente a la estructura laminar.

Los resultados encontrados indican que no se obtuvieron evidencias suficientes para rechazar la primer hipótesis de este capítulo que enuncia que la organización estructural de largo plazo en el horizonte superficial es dependiente de las secuencias de cultivo: el monocultivo de soja genera una elevada proporción de estructura laminar continua y la rotación maíz-trigo/soja una elevada proporción de estructura granular. El patrón estructural de cada sistema a un tiempo dado es función de procesos como humedecimiento, secado, consolidación, compresión por tránsito y formación de bioporos y fisuras (Kay, VandenBygaart 2002). Si la estructura Γ da origen a la estructura laminar mediante su fisuración por ciclos de h-s, la diferencia en espesor y proporción de estructura laminar entre tratamientos podría deberse a diferente número de ciclos en el año.

4.3.2. Numero de ciclos de h-s

Los cambios en el contenido hídrico edáfico (ciclos h-s) a campo son resultado de procesos de condensación, lluvia, capilaridad y evaporación (Amezketta et al. 1996). Para cuantificar los ciclos de h-s en los tratamientos S y M-T/S se utilizó el registro de potencial agua de las sondas instaladas en las parcelas durante un período mayor a un año. Los valores de potencial agua, expresados en cbar, de ambos tratamientos fueron comparables ya que las curvas de retención hídrica realizadas en laboratorio no presentaron diferencias significativas (Figura 58). A diferencia de los ciclos de h-s simulados en laboratorio (entre Θ_{CC} y Θ_{PMP}) en el Capítulo 3, la amplitud de un ciclo de h-s consistió en el cambio de contenido hídrico entre 33 y 150 cbar, intervalo equivalente entre 22,5 % y 16,5 % de humedad gravimétrica utilizando la ecuación de la Figura 58 ($R^2=0,92$, $p<0,01$).

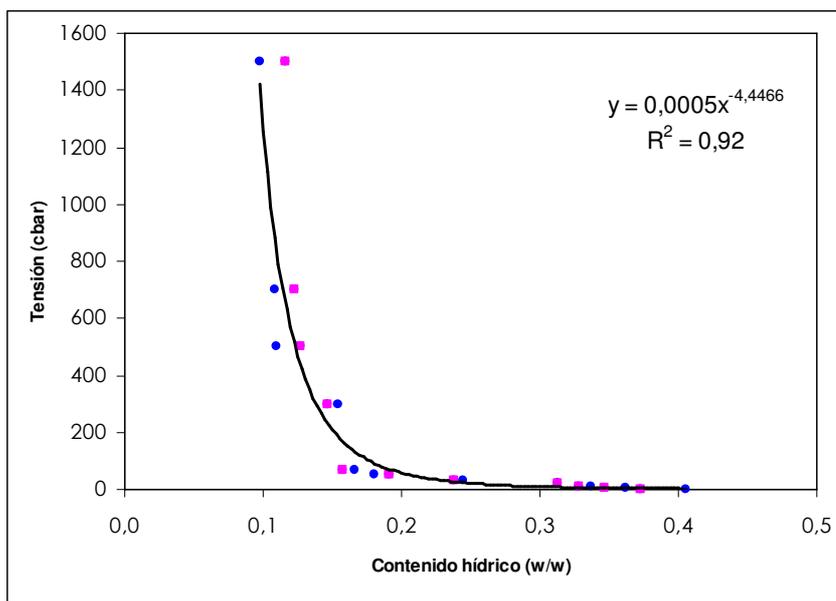


Figura 58: Curva de retención hídrica. Los puntos azules corresponden a los valores medios del tratamiento S. Los cuadrados fucsia corresponden a los valores medios del tratamiento M-T/S.

En las Figuras 59 a y c se presentan las evoluciones de potencial agua en los tratamientos S y M-T/S. Puede observarse que en ambos tratamientos se registraron 4 ciclos de h-s en el período de estudio. Si acotamos el tiempo a un año (entre enero y diciembre de 2008) se registraron dos y tres ciclos de h-s para S y M-T/S, respectivamente.

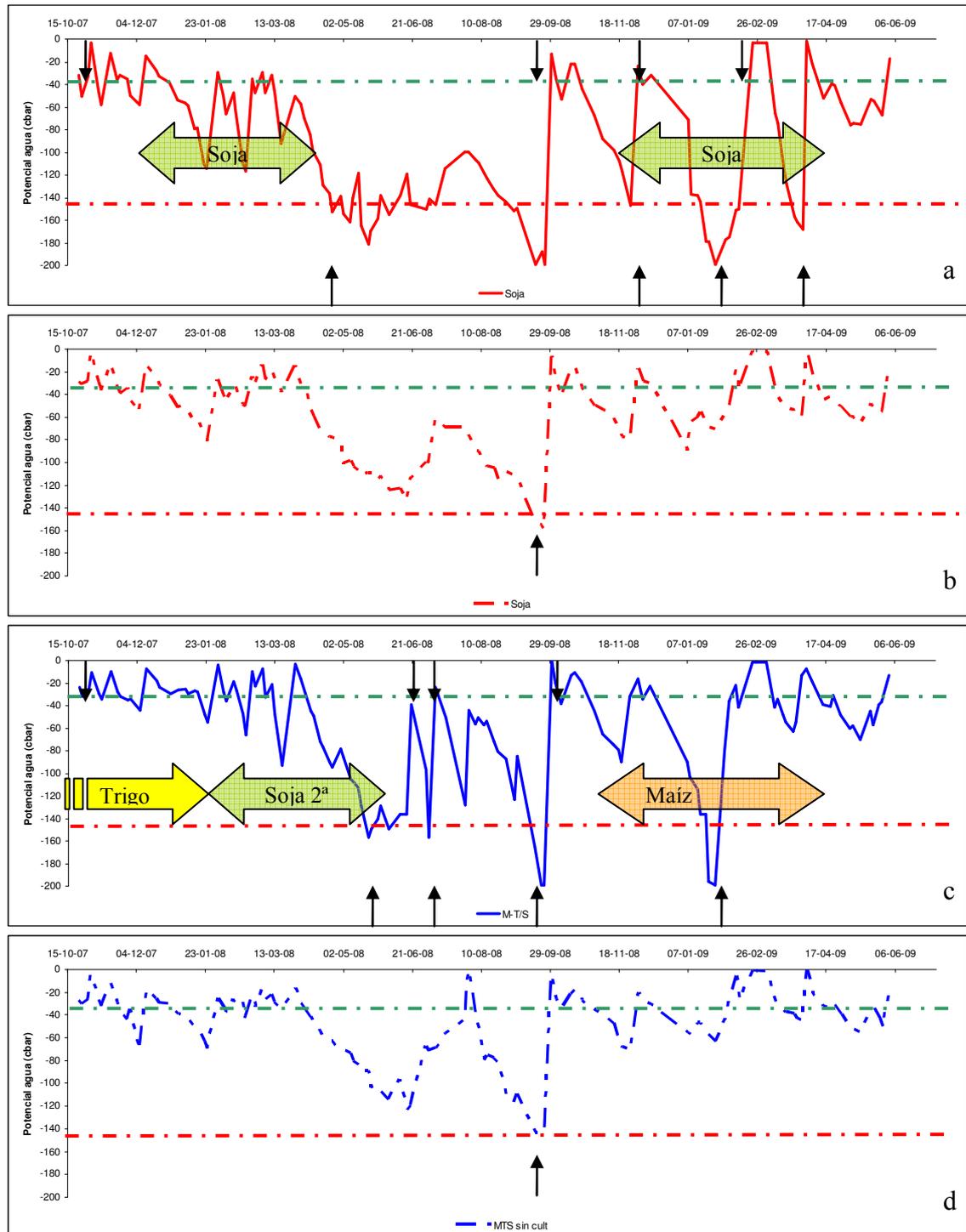


Figura 59. Valores medios de potencial agua en los tratamientos: a) Monocultivo de soja, b) Monocultivo de soja sin cultivo (clausura), c) Rotación M-T/S y d) Rotación M-T/S sin cultivos (clausura). Las líneas rojas y verdes indican los límites inferior (150 cbar) y superior (33 cbar) del ciclo de h-s, respectivamente. Las flechas negras indican inicio y finalización de un ciclo de h-s. La duración de los ciclos de los cultivos se indica con las flechas de color.

El análisis de la variación del contenido hídrico a los potenciales considerados en este estudio en el horizonte superficial de suelo indica que secuencias de cultivo bajo un mismo régimen climático no difirieron en cuanto a la cantidad de ciclos de h-s. Tampoco, las áreas de clausura dentro de cada secuencia presentaron diferente número

de ciclos de h-s ya que en ambas situaciones hubo 1 ciclo. En efecto, estos resultados indican que la presencia de un cultivo es un factor más determinante para la dinámica del agua y los ciclos de h-s que la rotación. Los cultivos aumentaron el número de ciclos de h-s anuales. Es decir, que la evapotranspiración resultó muy importante para la alternancia de contenidos hídricos en el suelo. Sin embargo, las diferentes secuencias produjeron cambios en el momento de ocurrencia de los ciclos de h-s pero no en el número (Figura 59). Por otro lado, la similitud entre los ciclos ocurridos en las situaciones sin cultivo (clausuras) indicaría que los diferentes patrones estructurales presentes en el horizonte superficial de cada tratamiento no afectan el número de ciclos (Figura 59).

En general, las lluvias mayores que 35 mm generaron aumento en el contenido hídrico edáfico que superó el umbral de CC (Figura 60). Si bien no hubo diferencias entre números de ciclos, éstos no ocurrieron simultáneamente en los dos tratamientos. Hasta fin de marzo de 2008 ambos tratamientos tuvieron contenidos hídricos cercanos a CC o a la mitad del contenido de agua útil con T/S en la rotación o soja en monocultivo. Las diferencias en el momento de ocurrencia de los ciclos de h-s se presentaron fundamentalmente durante el barbecho. El monocultivo se mantuvo con bajos contenidos hídricos entre marzo y septiembre mientras que en la rotación tres lluvias de bajo milimetraje (8 a 13 mm) elevaron el contenido hídrico a CC. En la campaña 08/09, a pesar del elevado consumo de agua realizado por el cultivo de maíz, en la rotación se mantuvo el suelo cerca de CC, registrándose un solo ciclo de h-s. En este período hubo dos precipitaciones de 80 mm que elevaron el contenido hídrico pero rápidamente por evapotranspiración se alcanzó el límite inferior. Por ello, el monocultivo presentó 3 ciclos de h-s entre primavera y verano.

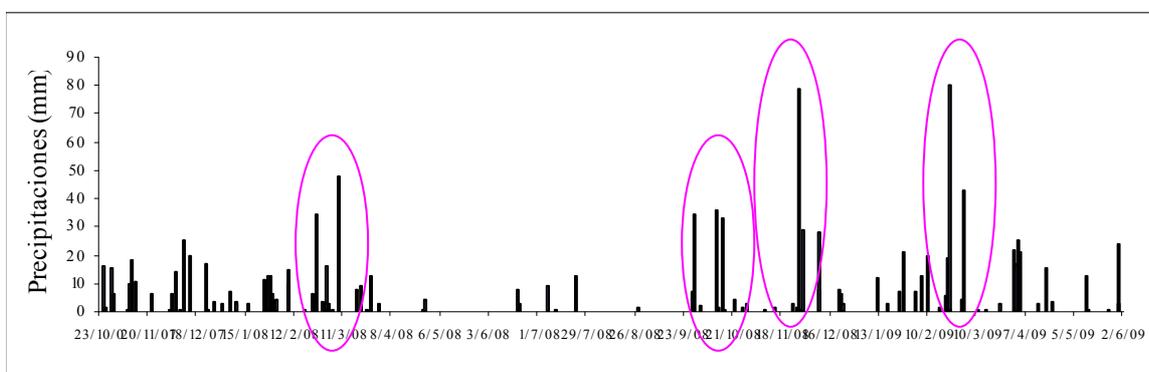


Figura 60. Precipitaciones diarias (mm) durante el período de estudio. Los óvalos indican las precipitaciones superiores a 35 mm.

Estos resultados indican que no podría atribuirse la mayor proporción y espesor de la estructura laminar en el monocultivo de soja a un mayor número de ciclos de h-s. En consecuencia se rechaza la segunda hipótesis. Si bien, previamente se había probado que el tránsito no era un factor condicionante de la formación de estructura laminar de corto plazo (Capítulo 3), se decidió analizar su efecto en este ensayo para considerar el efecto de largo plazo.

4.3.3. Influencia del tránsito de maquinaria agrícola

El ensayo de labranzas de Pergamino no posee tránsito controlado, pero las maquinarias ingresan habitualmente por el mismo sitio (más cercano al acceso de entrada) y hacen siempre el mismo recorrido. La Tabla 14 muestra las características de ancho de labor, distanciamiento entre rodados y ancho de rodados de la maquinaria empleada en el ensayo, mientras que la Figura 61 muestra un esquema de tránsito en los tratamientos S y M-T/S. La Tabla 14 y la Figura 61 comparten los colores para cada equipamiento/labor.

Tabla 14. Características de la maquinaria agrícola utilizada en el ensayo de larga duración.

Maquinaria agrícola	Ancho de labor (m)	Distancia entre ruedas (m)	Ancho de rodados (m)
SEMBRADORA Grano Fino	2,325	3,1 (delantera)	0,34
		1,27 (trasera)	
SEMBRADORA Grano Grueso	2,8	0,9 (trasera)	0,14
COSECHADORA	2,80	2,2 (delantera)	0,42
		0,9 (trasera)	
PULVERIZADORA	18	1,30	0,26
FERTILIZADORA	3,50	2,53	0,24
TRACTOR		1,25 (delantera) 1,10 (trasera)	0,45

Los pasajes de maquinaria relevados en la campaña 06/07 son equiparables a los que se utilizan habitualmente en este ensayo. En el tratamiento S se realiza anualmente una pulverización con herbicidas a fin del invierno para iniciar el barbecho químico, un pasaje de sembradora de grano grueso y antes de la cosecha una pulverización con herbicida y eventualmente un insecticida, en función del requerimiento de control de plagas (Tabla 14). En M-T/S el tránsito es mayor. En la fase Maíz hay un pasaje de pulverizadora previo a la siembra de maíz (sembradora grano grueso) con herbicida para iniciar el barbecho químico, y en post-emergencia se realiza un pasaje de fertilizadora y al menos una pulverización más antes de la cosecha. En la fase Trigo/Soja se realizan usualmente 4 pasajes de pulverizadora, dos de sembradora (grano fino y grano grueso), uno de fertilizadora en la etapa de macollaje de trigo y las dos cosechas (Figura 61).

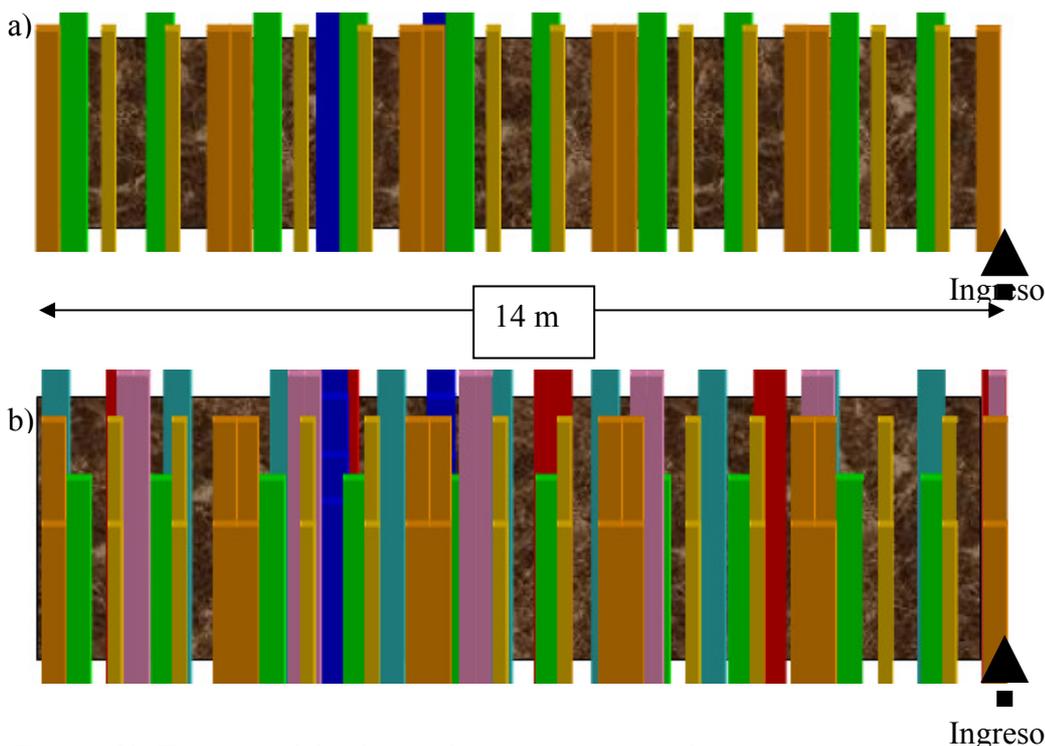


Figura 61. Esquema del tránsito de maquinarias en los tratamientos: a) Monocultivo de soja y b) Rotación M-T/S. Los colores indican equipamiento/labor.

En la Figura 62 se presenta el resultado del análisis de la imagen generada esquematizando el pasaje de ruedas por ambos esquemas. El área transitada en M-T/S fue de 84% mientras que en S el área transitada ocupó el 66% de la superficie total de la parcela. Si bien este análisis no tuvo en cuenta la carga aplicada ni el estado hídrico medio del suelo en el momento de las intervenciones, los resultados son equiparables a los encontrados por otros autores. Tullberg (1990) estimó que bajo SD, más del 30% de la superficie edáfica está transitada por ruedas de maquinaria agrícola, considerando sólo el pasaje de siembra y el de cosecha. Soane et al. (1982) hallaron que este porcentaje puede superar el 100% durante un ciclo de rotación de cultivos. En consecuencia, el tránsito se descarta nuevamente como factor condicionante de la formación de la estructura laminar bajo SD ya que S tiene menor tránsito que la rotación y presentó más del 50 % del horizonte superficial ocupado con una estructura laminar continua.

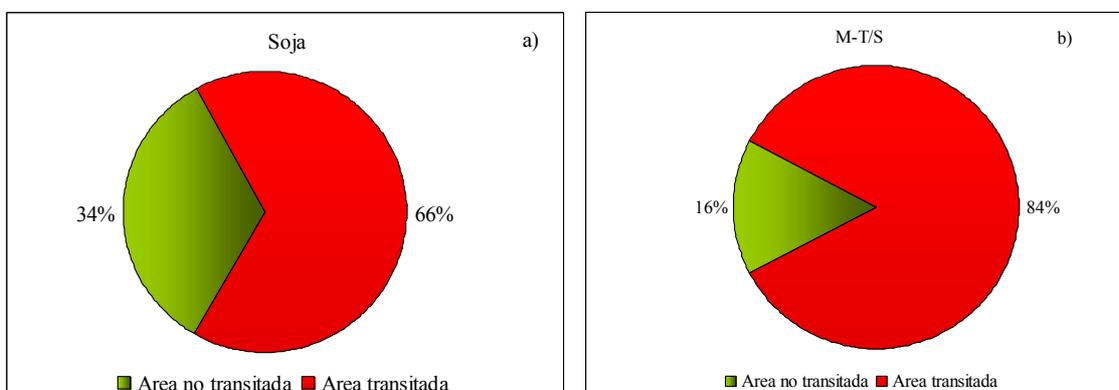


Figura 62. Distribución de áreas transitadas y no transitadas en los tratamientos: a) Monocultivo de soja y b) Rotación M-T/S.

4.3.4. Características de la estructura gamma

4.3.4.1. Físicas

Se realizó un análisis detallado de propiedades físicas con el objeto de respaldar con datos cuantitativos la descripción de campo (visualmente y con ayuda de un cuchillo) de las estructuras que ocupan mayor proporción del área del horizonte superficial, así como para poner en evidencia características diferenciales de la estructura Γ de cada tratamiento.

En la Figura 63 se presentan los valores medios de RC medidos en 2010. En el Capítulo 2 se establecieron diferencias significativas entre las RC de cada tipo de estructura: ~15, 25, 35 y 45 kPa para estructuras granular, laminar, Γ y Δ , respectivamente. Los valores obtenidos en ambos tratamientos fueron acordes a los mencionados para categorizar los mismos tipos de estructura. Para cada tratamiento hubo diferencias significativas entre las dos estructuras predominantes en el horizonte A, siendo en ambos mayor la RC de la estructura Γ ($p < 0,05$) que de las estructuras laminar y granular, para cada tratamiento respectivamente. En S, las zonas localizadas con estructura Δ tuvieron valores de RC de 48 kPa. Las estructuras Γ no presentaron diferencias significativas en RC.

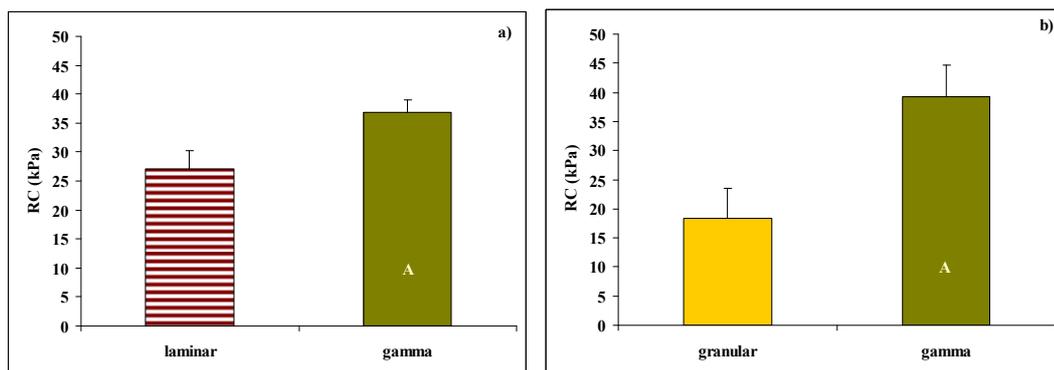


Figura 63. Resistencia de suelos al corte de distintos tipos de estructura en los tratamientos: a) Monocultivo de Soja y b) Rotación M-T/S. Las barras sobre las columnas indican desvío estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre RC de las estructuras gamma ($p < 0,05$).

Los valores de Dap obtenidos fueron acordes a los valores obtenidos en los Argiudoles de la Pampa bajo SD continua. Se observó claramente la densificación generalmente hallada debajo de los 10 cm (Wilson y Cerana 2004). La Dap en las estructuras laminar y granular fue inferior a las estructuras Γ para los tratamientos S y M-T/S, respectivamente (Figura 64). No hubo diferencias entre las Dap de las estructuras Γ de ambos tratamientos (Figura 64).

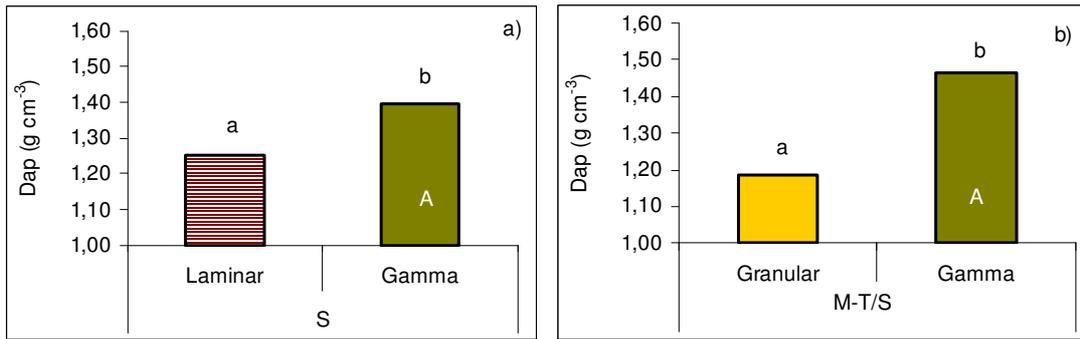


Figura 64. Valores medios de densidad aparente de estados estructurales de: a) Monocultivo de soja y b) Rotación M-T/S. Letras distintas minúsculas indican diferencias significativas entre estructuras de un mismo tratamiento. Letras distintas mayúsculas indican diferencias significativas entre Dap de las estructuras gamma ($p < 0,05$).

El análisis de PE corroboró que los diferentes tipos de estructura poseen diferente porosidad aunque los valores observados para todos los tipos de estructura fueron levemente inferiores a los hallados en el Capítulo 2. Las PE de las estructuras Γ de ambos tratamientos fueron similares y muy bajas, alrededor de 4 % (Figura 65). Las bajas PE pueden deberse a bajos contenidos hídricos en las muestras obtenidas a campo. Sin embargo, valores tan bajos de PE fueron también hallados en otros Argiudoles pampeanos, los cuales fueron atribuidos a la granulometría limosa fina de estos suelos (De Battista et al. 1994; Micucci y Taboada 2006; Taboada et al. 2008).

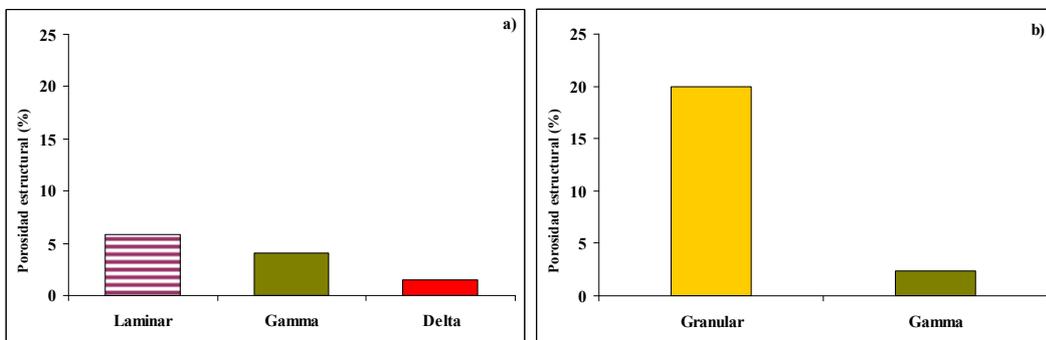


Figura 65. Porosidad estructural (%) de distintos tipos de estructura en los tratamientos: a) Monocultivo de Soja y b) Rotación M-T/S.

El C total de las muestras obtenidas de cada tipo de estructura en 2010 indicó que no existieron diferencias entre el C de las estructuras Γ de los dos tratamientos, siendo ese valor aproximadamente 1,5 % (Figura 66). Esta estructura presentó un contenido de C similar al de la estructura laminar en el monocultivo e inferior al de la estructura granular en la rotación.

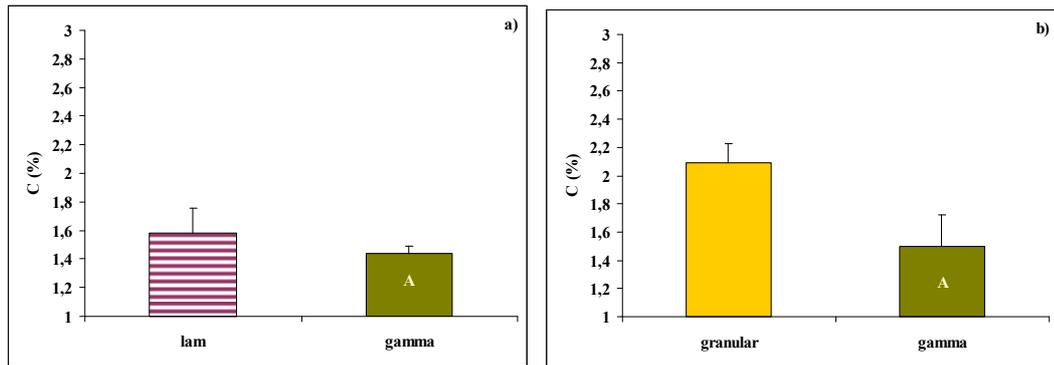


Figura 66. Carbono total (%) de distintos tipos de estructura en los tratamientos en 2010: a) Monocultivo de Soja y b) Rotación M-T/S. Las barras indican desvío estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre C de las estructuras gamma ($p < 0,05$).

Las estructuras Γ tuvieron 13, 6 y 29% de macro-, meso- y microporos, respectivamente (Figura 67). Estos valores de macro- y mesoporosidad obtenidos, resultaron elevados en comparación con los bajos valores de PE registrados en las estructuras Γ de ambos tratamientos. En un trabajo previo realizado con muestras de este mismo ensayo, se compararon los porcentajes de macro+mesoporos con la PE y se demostró que ambas metodologías de análisis de la distribución de poros (por tamaño y por origen) estaban altamente correlacionadas, aunque PE también presentó valores inferiores a macro- y mesoporosidad (Sasal y Andriulo 2003). Probablemente, las categorías de tamaños de macro- y mesoporos establecidas (60 y 15 μm , respectivamente) no resultan adecuadas para compararlas con la PE.

Así como no hubo diferencias entre Dap, PE, RC y C de las estructuras Γ de ambos tratamientos, tampoco hubo diferencias en la distribución de poros por tamaño. Entre los tipos de estructuras de cada tratamiento no hubo diferencias de meso- y microporos y sólo la estructura granular de M-T/S tuvo mayor macroporosidad que la estructura Γ . Evidentemente, este fue el método menos sensible para diferenciar las estructuras.

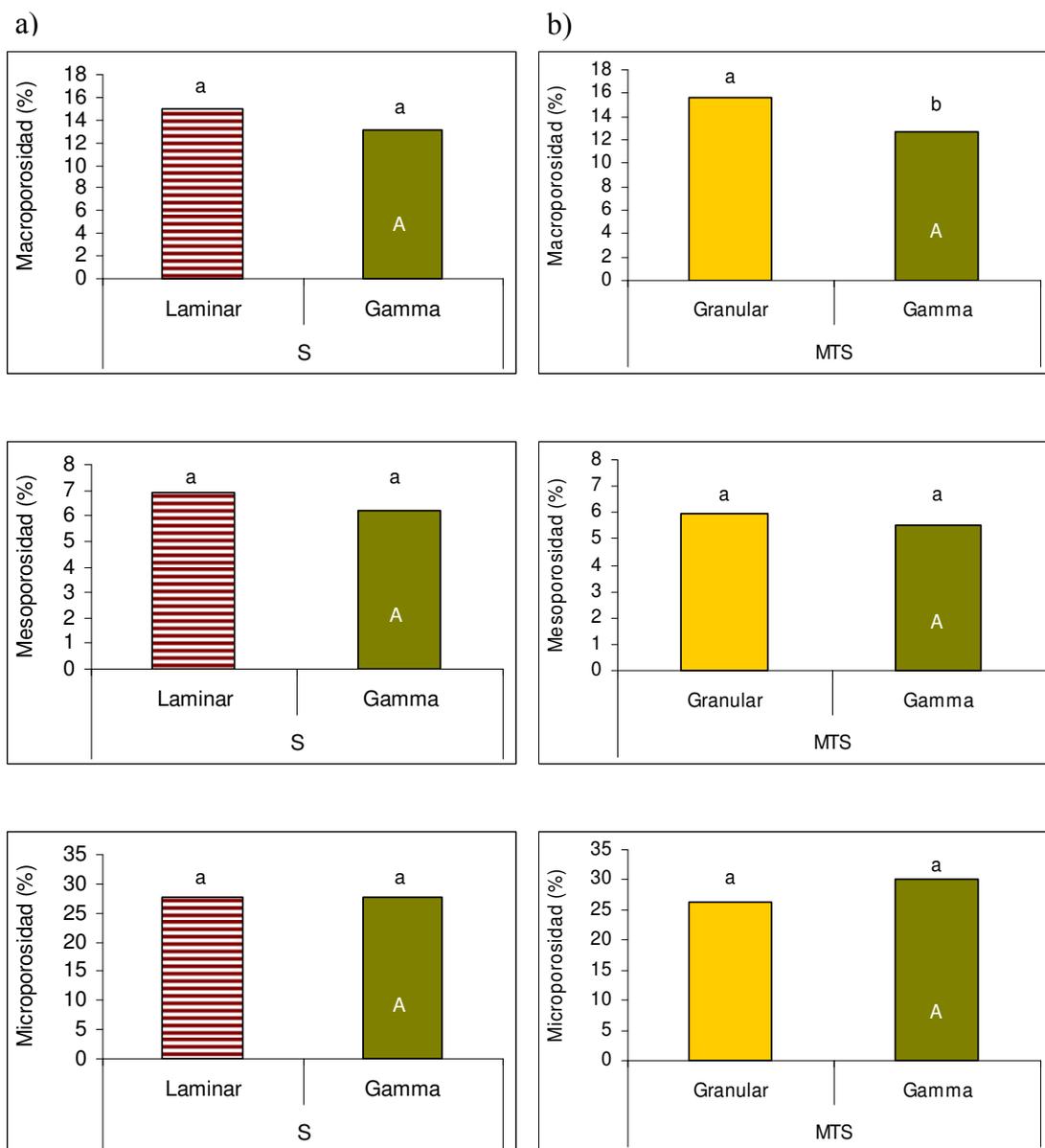


Figura 67. Valores medios de macro, meso y microporosidad de estados estructurales de: a) Monocultivo de soja y b) Rotación M-T/S. Letras distintas minúsculas indican diferencias significativas entre estructuras de un mismo tratamiento. Letras distintas mayúsculas indican diferencias significativas entre microporosidad de las estructuras gamma ($p < 0,05$).

Los análisis realizados a la estructura Γ de ambos tratamientos de largo plazo indican que se trata de un mismo estado estructural. Es decir, que la descripción visual a campo de esta estructura fue correcta. Además, estas mediciones permitieron profundizar el conocimiento de la estructura Γ . Sin embargo, no permiten deducir su funcionamiento. Por ello, se realizó un ensayo de drenaje de laboratorio para analizar y comparar la dinámica del agua en los distintos tipos de estructuras.

4.3.4.2. Velocidad de drenaje

En la Figura 68 se presentan los resultados promedio de los ensayos de drenaje efectuados a distintos tipos de estructura. En cada gráfico se observan cuatro picos que se corresponden con el momento en que se establece la tensión y el comienzo del registro de la tasa de desplazamiento vertical del agua a causa de la fuerza gravitacional. El primer valor registrado corresponde a la tasa de desplazamiento del agua inmediatamente a continuación de establecerse la tensión de -10 cm, los siguientes registran el desplazamiento del agua libre. El segundo pico corresponde a la tensión de -50 cm. Posteriormente, -100 cm y -150 cm. El pasaje a -200 cm casi es imperceptible a la escala del gráfico. Las diferencias más importantes entre las estructuras se observaron en la tasa de drenaje a -10 cm y -20 cm.

Para el monocultivo de soja, la estructura laminar y su subyacente Γ no presentaron diferencias en sus curvas de drenaje ni en la tasa de drenaje inicial, siendo ésta de $0,5 \text{ mL min}^{-1}$ (Figuras 68 a y b). La Rotación M-T/S, tuvo tasas iniciales de drenaje superiores, siendo para -10 cm de $0,63$ y $0,83 \text{ mL min}^{-1}$ para las estructuras granular y Γ , respectivamente (Figuras 68 c y d). Esto indica que el movimiento del agua fue más lento en S en todo el espesor del perfil.

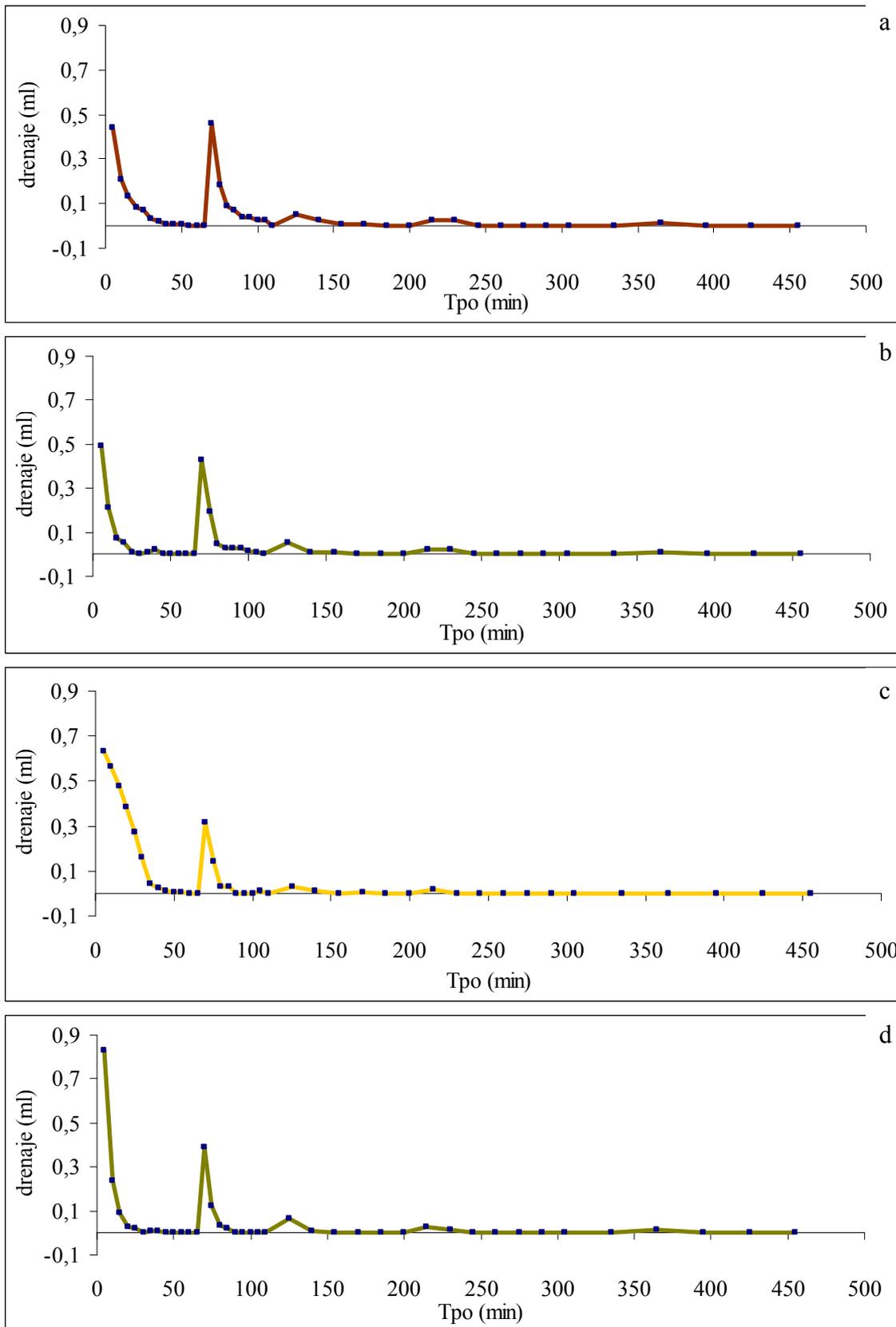


Figura 68. Valores medios de drenaje de: a) Estructura Laminar de Monocultivo de soja y b) Estructura Gamma de Monocultivo de soja, c) Estructura Granular de Rotación M-T/S y d) Estructura Gamma de Rotación M-T/S.

La diferencia en la dinámica del agua en las estructuras Γ de los dos tratamientos se debió a la distribución por tamaño de los macroporos. En el monocultivo de soja, la estructura Γ tuvo un 13% de macroporos compuesto de 41 % de poros de diámetro entre 60 y 300 μm y 59% de poros mayores a 300 μm (Figura 69). En la rotación M-T/S, el mismo porcentaje de macroporos se constituyó en un 85% de poros mayores a 300 μm . Estas leves diferencias en la distribución por tamaño de los macroporos generan un efecto muy marcado en el funcionamiento hídrico. Según la ley de Poiseuille, la velocidad del agua atravesando un poro cilíndrico es directamente proporcional al radio elevado a la cuarta potencia. Así, si el resto de los factores permanece constante, el duplicar el radio de un poro incrementa el flujo en 16 veces.

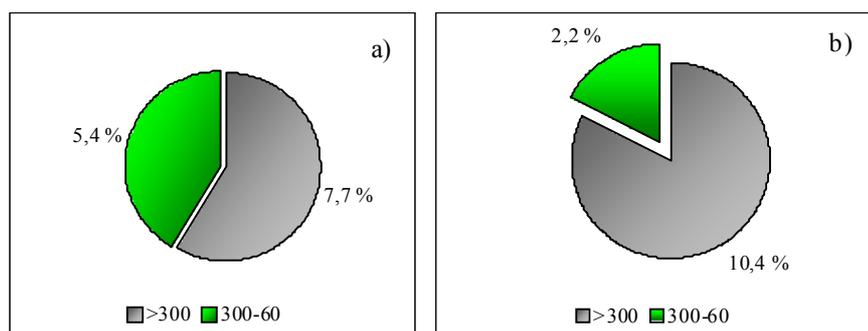


Figura 69. Distribución de macroporos $>300 \mu\text{m}$ y $300-60 \mu\text{m}$ en la estructura Gamma de a) Monocultivo de soja y b) Rotación M-T/S.

4.3.4.3. Estabilidad de la estructura

Se analizó la estabilidad de la estructura, como una estimación de la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando se someten a la acción del agua (Kay 1990). En efecto, la mayor velocidad de movimiento vertical de agua en M-T/S estuvo acompañada de mayor DMPm (Figura 70). La estructura Γ de M-T/S resultó estable según la clasificación propuesta por Le Bissonnais (1996) y su DMPm fue superior al de la estructura Γ de S (Figura 70). La estructura laminar del tratamiento S tuvo el DMPm más bajo. En contraste, la estabilidad de la estructura Γ de M-T/S fue equiparable a la de la estructura granular, ambas categorizadas como estables.

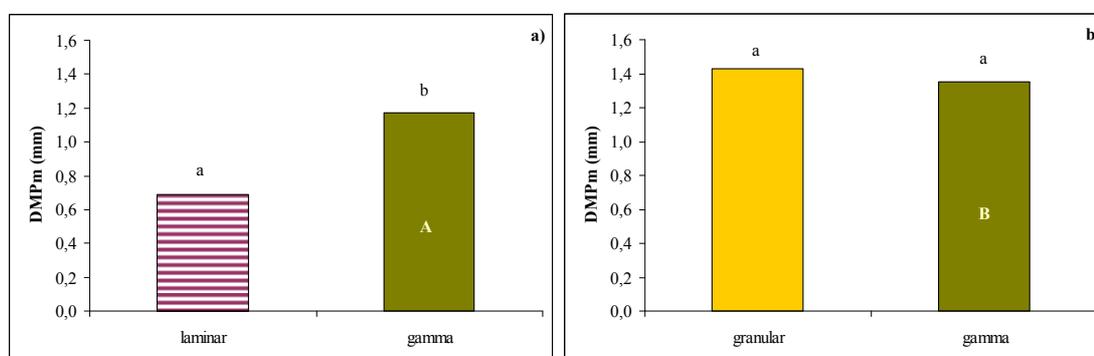


Figura 70. Diámetros medios ponderados medios (DMPm) de distintas estructuras en a) Monocultivo de soja y b) Rotación M-T/S. Letras distintas minúsculas indican diferencias

significativas entre estructuras de un mismo tratamiento. Letras distintas mayúsculas indican diferencias significativas entre DMPm de las estructuras gamma ($p < 0,05$).

Existen distintos mecanismos de desagregación en el suelo por acción del agua. Estos mecanismos pueden diferir en la naturaleza de las uniones entre las partículas del suelo y la energía involucrada en su ruptura, en las condiciones físicas y químicas requeridas para la desagregación, en la cinética del proceso de ruptura, en el tipo de propiedades edáficas que influyen el mecanismo y en la naturaleza y tamaño de los productos (fragmentos) de la ruptura (Le Bissonais 1996, Amézketa 1999). En la Tabla 15 se presentan las características de los principales mecanismos de desagregación descritos por Le Bissonais (1996). La medición de estabilidad estructural utilizando la metodología propuesta por Le Bissonais et al. (2002) posee tres pre-tratamientos de una muestra para la evaluación de cuatro mecanismos de desagregación: desagregación por compresión del aire ocluido que origina ruptura por efecto del estallido, desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia, microfisuración por expansión diferencial y dispersión fisico-química.

Tabla 15. Características de los principales mecanismos de desagregación. Fuente: Le Bissonais 1996.

Mecanismo	Estallido	Disrupción por expansión diferencial	Disrupción por impacto de la gota de lluvia	Dispersión fisico-química
Tipo de fuerza involucrada	Presión interna de aire atrapado durante el humedecimiento	Presión interna por expansión diferencial de arcillas	Presiones externas por impacto de la gota de lluvia	Fuerzas atractivas internas entre coloides
Propiedades de suelo que controlan el mecanismo	Porosidad, humedad, cohesión interna	Expansión potencial, humedad, cohesión	Cohesión en húmedo (arcilla, materia orgánica, óxidos)	Estado iónico, mineralogía de arcillas
Fragmentos resultantes	Microagregados	Macro y microagregados	Partículas elementales	Partículas elementales
Intensidad de la desagregación	Fuerte	Limitada	Acumulativa	Total

La dispersión por procesos fisico-químicos es el resultado de la reducción de fuerzas atractivas entre coloides por el humedecimiento. Depende de las características iónicas y del porcentaje de Na intercambiable. En la comparación de estructuras Γ no fue considerada ya que ambas estructuras poseen la misma granulometría, mineralogía y contenido de carbono total.

En la Tabla 16 se presentan los valores medios de DMP de cada pretratamiento para las estructuras Γ de S y M-T/S. La comparación entre los tres pre-tratamientos puede ayudar a identificar los mecanismos responsables de la pérdida de estabilidad y de las uniones entre las partículas (Amézketa et al. 1996). Los pre-tratamientos estallido y desagregación mecánica (DMPE y DMPd, respectivamente) no presentaron diferencias significativas. El estallido es la desagregación por compresión de aire ocluido durante la humectación debido a que la presión del aire es superior a la cohesión interna del agregado. La desagregación mecánica simula la energía de la lluvia que dispersa mecánicamente las partículas, fundamentalmente cuando el suelo está húmedo y los agregados tienen una débil cohesión interna (Cosentino 2006). Ambos mecanismos son particularmente importantes en suelos limosos (escasa proporción de arcillas expandentes) con condiciones de bajo y alto contenido hídrico en superficie,

respectivamente. Sin embargo, la importancia de estos mecanismos se reduce bajo SD por el rol de la vegetación o de la cobertura sobre el suelo que protege la superficie del impacto de la lluvia.

Tabla 16. Diámetros medios ponderados de la estructura gamma en los tratamientos Monocultivo de soja y Rotación M-T/S. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para cada pre-tratamiento ($p < 0,05$).

Gamma	Soja	M-T/S
	mm	
DMPd (dispersión mecánica)	2,5 a	2,7 a
DMPe (estallido)	0,4 a	0,6 a
DMPc (capilaridad)	0,6 a	0,8 b
DMPm (medio)	1,2 a	1,4 b

La mayor estabilidad de la estructura Γ de M-T/S estuvo dada por un mayor DMPc (capilaridad). Este pretratamiento simula el efecto de la microfisuración por expansión diferencial (no uniforme) durante el humedecimiento y el secado. Algunos autores agrupan la disrupción generada por estallido y la microfisuración (Grant y Dexter 1990; Le Bissonnais 1996). Sin embargo, las consecuencias de la desagregación sobre la infiltración son diferentes debido al tamaño de los fragmentos resultantes. El estallido genera microagregados y la microfisuración agregados de mayor tamaño (Tabla 15).

Al prescindir de los laboreos, bajo SD se incrementa la cohesión del suelo por el contacto partícula a partícula y la adsorción de componentes orgánicos e inorgánicos y se incrementa la estabilidad estructural durante el secado del suelo (Caron et al. 1992). Este último proceso es conocido como “*age-hardening*” y se acentúa cuando el rehumedecimiento se produce a una tasa en la cual el estallido o ablandamiento del suelo no deterioran su estabilidad. Esto puede ocurrir en suelos con buena cobertura en superficie.

La estabilidad estructural es función de las fuerzas externas disruptivas y de la resistencia de las uniones internas de los agregados (Amézketa 1999). Cuando las uniones entre unidades estructurales son suficientemente fuertes para resistir presiones en planos de debilidad y del aire atrapado en los agregados, las microfisuras se forman en la matriz del suelo, reduciendo la cohesividad de las partículas y la resistencia del suelo (Le Souder et al. 1991). En la profundidad donde está situada la estructura Γ , la velocidad de ingreso de agua es más baja que en superficie y el aire atrapado puede salir de los agregados disminuyendo la presión interna. Sin embargo, las tensiones mecánicas debidas a los cambios de volumen por la expansión y contracción diferencial de arcillas en los agregados generan estreses internos que producen la fisuración de la estructura Γ

dando origen a la estructura laminar. A este mecanismo pueden atribuirse las diferencias en DMPc entre los tratamientos.

Utilizando la misma metodología de estabilidad estructural, Amézqueta et al. (1996) encontraron que los tres pre-tratamientos tienen resultados similares en suelos muy inestables o muy estables, indicando que su comportamiento estructural es casi independiente de condiciones externas. En las estructuras Γ , el DMPd fue al menos cuatro veces superior a los demás DMP poniendo en evidencia la vinculación del comportamiento estructural con las condiciones externas.

La tercera hipótesis de este capítulo enunciaba que la estructura Γ del monocultivo de soja tiene características físicas, mecánicas y de velocidad de drenaje que favorecen la formación de la estructura laminar. Si bien, muchas características físicas y mecánicas de las estructuras Γ son similares, las propiedades asociadas a la circulación del agua demostraron ser diferentes en los dos tratamientos. Los ensayos de drenaje indican que el agua dentro de la estructura Γ de M-T/S se desplaza con mayor velocidad. Esto se debe, por un lado, a la elevada proporción de macroporos mayores a 300 μm y por el otro, a la estabilidad de esta estructura frente a la acción del agua. En la estructura Γ del monocultivo, la circulación del agua demostró ser más lenta y en la comparación con la rotación se identifica que el mecanismo que diferencia la estabilidad de ambas estructuras Γ es la interrupción por expansión diferencial (capilaridad). Así, puede inferirse que por efecto de la presión interna por expansión diferencial de arcillas, se induce la fisuración que resulta en macro y microagregados que forman la estructura laminar.

En esta tesis, no fue abordado el estudio de aspectos biológicos asociados con la evolución de la estructura. Tisdall (1991, 1994) y Miller y Jastrow (1992) señalaron la estrecha relación entre la estabilidad de los agregados del suelo y la presencia de hongos formadores de micorrizas arbusculares, debido a la producción de glomalina (Wright y Upadhyaya 1996; Wright et al. 1996). La glomalina es una glicoproteína insoluble en agua, muy estable, producida por las hifas de los hongos. Numerosos trabajos reportan correlación significativa entre el contenido de C del suelo y la glomalina. También, Taboada et al. (2000) encontraron asociación entre los poros mayores a 30 μm y la proporción de raíces colonizadas por micorrizas en la Pampa Ondulada.

La SD promueve la conservación de la red de micelio fúngico asociada a la sucesión de raíces de cultivos sin laboreos (Borie et al. 2006; Wright y Upadhyaya 1998). Por ende, la profundización de esta línea de investigación aportaría claridad a procesos asociados con la estabilidad estructural y particularmente, con el tiempo de ocupación en el campo de raíces vivas expresado como ISI.

4.4 CONCLUSIONES

La comparación de secuencias de cultivos contrastantes como el monocultivo de soja y la rotación M-T/S de más de 20 años permitió identificar características de la estructura Γ que favorecen la formación de la estructura laminar.

El análisis del contenido hídrico en el horizonte superficial del suelo indicó que si bien la evapotranspiración de los cultivos regula el número de ciclos de h-s anuales, la alternancia de distintos cultivos en la rotación, aunque difirió en la magnitud, no difirió en la cantidad de ciclos de h-s. Así, no podría atribuirse la mayor proporción y espesor de estructura laminar en el monocultivo de soja a un mayor número de ciclos de h-s. También, se descartó el tránsito como factor condicionante de la formación de la estructura laminar bajo SD en el largo plazo.

Los valores de las propiedades edáficas clásicas analizadas a la estructura Γ de ambos tratamientos de largo plazo indican que se trata de un mismo estado estructural en coincidencia con la descripción visual de campo. La diferencia entre estructuras Γ de los dos tratamientos analizados radica en que el movimiento del agua en el horizonte A de S es más lento, debido a que la misma proporción de macroporos tiene diferente distribución. En la estructura Γ de la rotación M-T/S, el 85% de los macroporos es mayor que 300 μm y más estable. Por ello, la velocidad para la circulación del agua es superior a la estructura Γ del monocultivo. Así, las tensiones mecánicas debidas a los cambios de volumen por la expansión y contracción diferencial de arcillas en los agregados generan estreses internos y la microfisuración durante el humedecimiento y el secado dando origen a la estructura laminar.

CAPITULO 5

*Efecto de la organización estructural bajo SD sobre algunos
componentes del balance de agua*

5.1 INTRODUCCIÓN

El análisis del efecto de la organización estructural del horizonte superficial bajo SD sobre el funcionamiento hídrico edáfico presupone analizar los términos de la ecuación del balance de agua. Algunos componentes son independientes o poco dependientes de los cambios estructurales que se generen en el horizonte superficial del suelo, como las precipitaciones y el drenaje profundo, respectivamente. Los restantes componentes (infiltración, evapotranspiración, reserva de agua y escurrimiento superficial) son claramente dependientes del manejo del suelo.

La comparación de secuencias de cultivos contrastantes como el monocultivo de soja y la rotación M-T/S de largo plazo permitió identificar características físicas de la estructura Γ asociadas al movimiento del agua en el suelo que favorecen la formación de la estructura laminar (Capítulo 4). Sin embargo, los procesos que ocurren en un suelo sin remoción entre los estados estructurales y el funcionamiento hídrico son de tipo causa-efecto. Por un lado, las variaciones en el estado hídrico pueden constituir una vía de re-estructuración de estructuras masivas por h-s. Por otro lado, el ingreso de agua al suelo puede estar restringido por la orientación preferentemente horizontal de los macroporos de la estructura laminar (Sasal et al., 2006), con consecuentes pérdidas de agua por escurrimiento. En este capítulo se analizará este último aspecto. Es decir, el efecto de los diferentes estados estructurales y en particular de la proporción de estructura laminar, sobre algunos componentes del balance de agua.

En el Capítulo 4 se evaluaron en laboratorio características del movimiento del agua en distintos tipos de estructura. El análisis del efecto de estructuras limitantes al ingreso del agua a campo es mucho más complejo. Es necesario incluir las características de los sistemas de cultivo como su ciclo (tiempo de ocupación) y su cobertura, debido a que en trabajos previos se encontró que las secuencias más intensificadas (>ISI) estuvieron asociadas con bajas tasas de escurrimiento y erosión hídrica (Sasal et al. 2010, Darder et al. 2010). Por ello, en este capítulo se analizará el ingreso de agua al suelo en relación a la organización estructural generada bajo distintas secuencias de cultivos.

Por otro lado, está ampliamente documentada la variabilidad espacio temporal de las mediciones de infiltración a campo (Ankeny et al. 1990; Léonard et al. 2005; White et al. 1992). En general, bajo SD la variabilidad se atribuye a la alteración generada por el equipo de medición, a vías de flujo preferencial, como fisuras o canales, o al colapso de macroporos durante la medición debido a la inestabilidad estructural (Elrick y Reynolds 1992). La observación de perfiles del horizonte superficial de Argiudoles que ha sido descripta en los Capítulos anteriores, evidencia la heterogeneidad vertical de la organización estructural y su dinámica, adicionando así dificultades a la ya compleja estimación de la infiltración. Por ello, en este Capítulo se analizarán datos de escurrimiento e infiltración obtenidos en parcelas de campo de importante tamaño (100 m²).

A mediados de la década del 60, algunas Estaciones Experimentales del INTA comenzaron estudios de erosión hídrica en parcelas de campo. En la Estación Experimental de Paraná, en 1971, se construyeron parcelas para la medición de

escurrimiento y pérdidas de suelo de acuerdo con la metodología propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos de USA y la FAO (Ledesma y Paparotti 1990; Nani y Paparotti 1993; Rojas y Conde 1985; Rojas y Saluso 1993). Estas parcelas permiten el control de los ingresos de agua de las lluvias y la medición de los excedentes hídricos por escurrimiento.

El estudio del ingreso del agua al suelo y/o de su escurrimiento en parcelas de grandes dimensiones se realiza con lluvia natural. Por ende, no pueden independizarse de este estudio la variabilidad de las precipitaciones. El análisis de la relación escurrimiento/lluvia en parcelas cultivadas permitirá evaluar el rol de diferentes estados estructurales bajo SD sobre la dinámica del agua.

Las hipótesis de este capítulo fueron:

- la estructura laminar restringe el ingreso y favorece el escurrimiento superficial en función de su proporción en el horizonte superficial.
- diferentes secuencias de cultivos con la misma duración de SD modifican la relación escurrimiento/lluvia: el ingreso de agua al suelo es mayor en las secuencias de cultivos más intensificadas (>ISI)

Los objetivos de este capítulo fueron:

- i. cuantificar el efecto de la presencia y del proporción de la estructura laminar en el horizonte superficial del suelo bajo SD sobre el escurrimiento
- ii. analizar la relación entre las precipitaciones y el escurrimiento en función de la intensificación de la secuencia de cultivo con 10 años de SD

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en la Estación Experimental de Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de la provincia de Entre Ríos (31° 51' S y 60° 31' W) en parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural con diferentes secuencias de cultivo (Figura 71). La región tiene clima subhúmedo (lluvia anual ≈ 1000 mm) templado (temperatura anual $\approx 18,3^{\circ}\text{C}$). Las temperaturas del invierno raramente son inferiores a 0°C . El suelo del área es un Argiudol ácuico fino, illítico, térmico (US Soil Taxonomy) de la Serie Tezanos Pinto (Luvic Phaeozem, WRB). La textura del horizonte A es franco limosa con 270 y 660 g kg^{-1} de arcilla y limo, respectivamente (Plan Mapa de Suelos, 1998).



Figura 71. Parcelas de escurrimiento de INTA EEA Paraná

Las parcelas tienen dimensiones de 4 m de frente y 25 m de largo (100 m^2) con una pendiente natural de 3,5% (Figura 72). Fueron construidas con bordes laterales de mampostería y con la pared de fondo desmontable (estructura de hierro y chapa de zinc) para facilitar el ingreso de la maquinaria. Cada una posee un embudo con tubo colector de mampostería de 110 mm de diámetro que desemboca en dos piletas receptoras de escurrimientos de mampostería de 450 y 1000 L. La segunda pileta capta 1/7 del escurrimiento excedente de la primera.

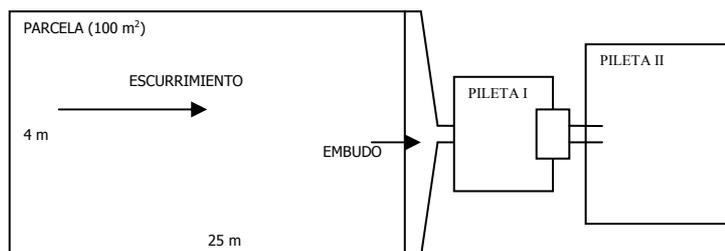


Figura 72. Esquema (vista superior sin escalar) de una parcela de escurrimiento

Las parcelas habían sido laboreadas en forma convencional durante 30 años y desde 1990 están bajo SD. En 2006 se reorganizaron los tratamientos de modo que hay cuatro sistemas de cultivo (tratamientos) con tres parcelas (repeticiones) cada uno. Los sistemas de cultivo son soja continua (S); soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal (CC-S); trigo/soja (T/S) y maíz-trigo/soja (M-T/S) (Figura 73). Los cultivos antecesores a estos tratamientos establecidos en 2006 fueron diferentes, excepto por una parcela de cada tratamiento que poseía su secuencia desde 1990 (Nº: 2, 7, 11 con S, M-T/S y T/S, respectivamente). Además, existen tres parcelas que no tienen repeticiones y se continúan desde 2000. Estas son: suelo descubierto con laboreo y con control químico de malezas (L), pastura con cortes manuales (P) y maíz continuo (M). Así, para analizar efectos acumulados o propiedades físicas impuestas por los tratamientos se analizaron sólo las parcelas que mantuvieron el sistema de cultivo desde 1990 (haciendo cinco submuestreos por parcela) y para relacionar estados estructurales con escurrimiento se utilizaron todas las parcelas. La parcela laboreada sin vegetación (L) fue removida anualmente en Mayo y Octubre, y las malezas fueron controladas químicamente con Glifosato 46% en todas las parcelas. La siembra, las aplicaciones de plaguicidas y la cosecha de trigo y de soja se realizaron con maquinaria agrícola. El ciclo del trigo de cobertura se interrumpió en el estadio de espiga embuchada con Glifosato 46%.



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CC-S	S	CC-S	S	M-T/S	CC-S	M-T/S	T/S	S	M-T/S	T/S	T/S	M	P	L

Figura 73. Fotografía de las parcelas de escurrimiento de EEA Paraná y plano de ubicación actual de los tratamientos en el terreno. S=soja continua; CC-S=soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal; T/S=trigo/soja y M-T/S=maíz-trigo/soja.

5.2.1. Mediciones

Después de cada lluvia que produjo escurrimiento, se estimó el volumen escurrido en las piletas colectoras en cada parcela entre Julio de 2006 y Junio de 2009, midiendo la altura de agua en cada pileta. Se analizaron los escurrimientos acumulados

y promedio de cada campaña, y también se calculó un escurrimiento acumulado medio con los datos de las cuatro campañas.

Para analizar el efecto de las secuencias de cultivo establecidas en 2006 (con repeticiones) sobre el escurrimiento superficial se utilizaron los datos de la campaña 2009/2010. Se analizó la relación escurrimiento/lluvia en función de las diferentes secuencias. Con las ecuaciones generadas se estimaron los milímetros de lluvia que debe tener un evento para generar escurrimiento y se estableció el porcentaje de lluvia que ingresa al suelo anualmente para cada secuencia (precipitación efectiva).

En 2008, en los tratamientos M, P y L y en las parcelas que iniciaron su secuencia en 1990 de S, T/S y la fase T/S de M-T/S, se midió infiltración básica. Ello se hizo en cinco sitios seleccionados al azar en cada parcela con infiltrómetros de disco de 12 cm de diámetro para caracterizar las tasas de infiltración a estado estable a 0 cm de tensión. Se colocó una capa de 5 mm de arena gruesa sobre el área expuesta y nivelada para asegurar el contacto adecuado con el disco. Estas mediciones se realizaron sobre la superficie del suelo durante 60 minutos para alcanzar estado estable (Ankeny 1992). Se estimó la conductividad hidráulica saturada (K_{hc}) con la medición de infiltración, usando la ecuación de Wooding (1968) y el método de White y Sully (1987) (Logsdon y Jaynes 1993).

Veinticuatro horas después de la medición de infiltración, se extrajeron muestras de suelo no disturbadas (cilindros de 0,03 m de altura y 0,05 m de diámetro de los mismos sitios (cinco repeticiones) a dos profundidades (0-0,04 y 0,04-0,08 m) para determinar conductividad hidráulica saturada (K_h) (por el método de carga constante, Klute y Dirksen 1986).

En abril de 2011, cinco años después de haberse reorganizado las secuencias de cultivos con repeticiones, se realizaron perfiles culturales en todas las parcelas (uno por parcela) con análisis del sistema de porosidad, RC e imágenes para establecer la proporción de distintos tipos de estructura en cada parcela. Luego, en todas las parcelas se aplicó colorante *Brilliant Blue* con infiltrómetro de disco colocado sobre la superficie para identificar estados estructurales que restringen la circulación de agua en el horizonte A (Yasuda et al. 2001). La aplicación del colorante se realizó cuatro días después de una lluvia de 30 mm en condiciones de suelo húmedo para evitar el flujo tridimensional. Se aplicó una lámina de 50 mm (80% de Θ_{CC}). En la mayoría de las parcelas la muy baja tasa de infiltración obligó a dejar los infiltrómetros en el campo durante 24 hs. Luego, se realizó un pozo de observación y se fotografió la distribución del pigmento en el suelo. Con las fotos se estableció el espesor del suelo coloreado con el trazador.

La producción de materia seca se midió a la cosecha durante la campaña 09/10, cortando la biomasa aérea de 1,4 m lineales en 3 posiciones en cada parcela. Se calculó el ISI.

5.2.2. Análisis estadístico

Se analizaron las varianzas de los efectos de las secuencias de cultivo sobre el escurrimiento y las proporciones de distintos tipos de estructura con el procedimiento GLM (Modelo General Lineal) de SAS (SAS Institute Inc. 1989). Se utilizó el test de diferencia significativa mínima (LSD) ($p < 0.05$). Se realizaron correlaciones y

regresiones lineares usando los procedimientos CORR (Coeficiente de Correlación) y REG (Modelo Regresión Lineal) de SAS (SAS Institute Inc. 1989).

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. Patrón estructural del suelo

Siguiendo la metodología utilizada en los Capítulos anteriores, se analizaron los tipos de estructuras presentes en los perfiles del horizonte superficial de las parcelas bajo diferentes secuencias de cultivos, tomando como referencias extremas y contrastantes una pastura de 10 años y una parcela laboreada sin vegetación. Los resultados se presentan en la Tabla 17. En todas las secuencias de cultivos bajo SD se identificaron en el perfil y se corroboraron mediante la medición de RC y sistema de porosidad, los cuatro tipos de estructura: granular en superficie asociada al desarrollo de raíces, laminar en capa continua, Γ debajo de la estructura laminar y Δ focalizada en zonas dentro de la estructura Γ . Las parcelas de referencia tuvieron patrones estructurales completamente diferentes a las secuencias bajo SD. La pastura presentó el 60 % del perfil con estructura granular asociada al crecimiento de las raíces y debajo una estructura Γ con porosidad estructural visible. El tratamiento L, tuvo el 50 % del perfil con una estructura suelta, sin coherencia, y debajo una estructura masiva Δ .

El análisis de varianza entre las secuencias (con repeticiones iniciadas en 2006), mostró que no hubo diferencias significativas de proporciones de los distintos tipos de estructura entre las secuencias. Esto se debe a la importante variabilidad entre las repeticiones, debido a los diferentes cultivos antecesores de cada parcela. Particularmente, el monocultivo de soja presentó coeficientes de variación extremadamente altos: 90 y 105% para las estructuras laminar y granular, respectivamente.

Tabla 17. Valores medios y desvíos estándar de porcentaje de distintos tipos de estructura en cada tratamiento (3 repeticiones) y situaciones de referencia.

Tratamiento	Granular	Laminar	Gamma	Delta	Sin estructura
	%				
CC-S	18,9 ± 11,3 a	30,2 ± 9,0 a	46,4 ± 4,3 a	4,6 ± 1,4 a	0
S	17,6 ± 18,5 a	27,4 ± 24,7 a	51,2 ± 7,4 a	3,8 ± 0,5 a	0
T/S	21,1 ± 5,8 a	31,1 ± 6,4 a	45,1 ± 8,0 a	2,6 ± 0,4 a	0
M-T/S	19,8 ± 2,8 a	22,2 ± 0,6 a	53,2 ± 3,1 a	4,8 ± 3,1 a	0
P	58,8	0	41,2	0	0
L	0	0	0	48,6	51,4

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD, $p < 0,05$). S=soja continua; CC-S=soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal; T/S=trigo/soja; M-T/S=maíz-trigo/soja; P=pastura y L=laboreado y sin cultivo.

Aproximadamente, las secuencias tuvieron 19, 28, 50 y 3% del perfil del horizonte A con estructura granular, laminar, Γ y Δ , respectivamente. Si bien, las secuencias de cultivos se reorganizaron en 2006, las parcelas habían estado bajo SD desde 1990. Así, con la misma antigüedad (10 años), el valor medio del porcentaje de estructura laminar obtenido fue inferior al registrado en el ensayo de tránsito y cobertura del Capítulo 3. También, aplicando la ecuación de ajuste del porcentaje de estructura laminar en función de los años de SD obtenida para lotes de la Pampa Húmeda Norte

obtenida en el Capítulo 2 ($y = -0.2239x^2 + 7.092x - 12.338$), la estructura laminar simulada fue superior a la medida en las parcelas (36 vs 28%). Sin embargo, el porcentaje medio de estructura laminar en las parcelas con cultivos bajo SD fue similar al obtenido en el ensayo de larga duración en la rotación M-T/S de largo plazo (Capítulo 4).

En la Figura 74 se presenta la distribución del porcentaje de distintas estructuras en los perfiles culturales de seis parcelas que se mantuvieron durante 10 años bajo el mismo sistema de cultivo. Si bien, la ausencia de repeticiones impide hacer una comparación de validez estadística, puede observarse que la parcela con monocultivo de soja de larga duración presentó el 50% del horizonte superficial con estructura laminar, coincidente con los resultados del monocultivo de soja del ensayo de largo plazo (Capítulo 4). Las otras tres parcelas con maíz y/o trigo en la secuencia (M, M-T/S y T/S) presentaron valores entre 23 y 33 % de estructura laminar en el horizonte A y estructura granular en superficie.

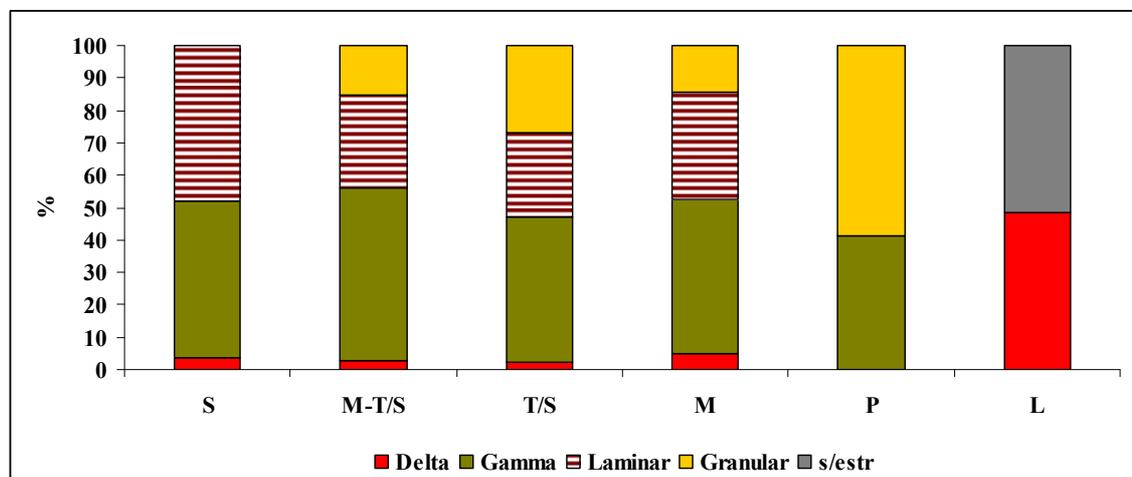


Figura 74. Distribución del porcentaje de distintas estructuras en los perfiles culturales de parcelas con 10 años bajo el mismo sistema de cultivo. S=soja continua; CC-S=soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal; T/S=trigo/soja; M-T/S=maíz-trigo/soja; P=pastura y L=laboreado y sin cultivo.

A continuación, se presenta nuevamente la Figura 14 (Capítulo 2) con la función de la evolución del porcentaje de estructura laminar a escala regional, a la cual se le han adicionado 4 puntos correspondientes a los valores de porcentaje de estructura laminar de las parcelas con secuencias de cultivos de 10 años bajo SD (Figura 75). Este análisis pone en evidencia nuevamente aspectos discutidos en el Capítulo 4 sobre el efecto del monocultivo de soja sobre la estructura del suelo bajo SD. Si bien los porcentajes de estructura laminar con igual antigüedad bajo SD están dentro del intervalo de confianza de la función, las secuencias que incluyeron M o T se encontraron por debajo de los simulados por la función cuadrática y el monocultivo de soja por encima.

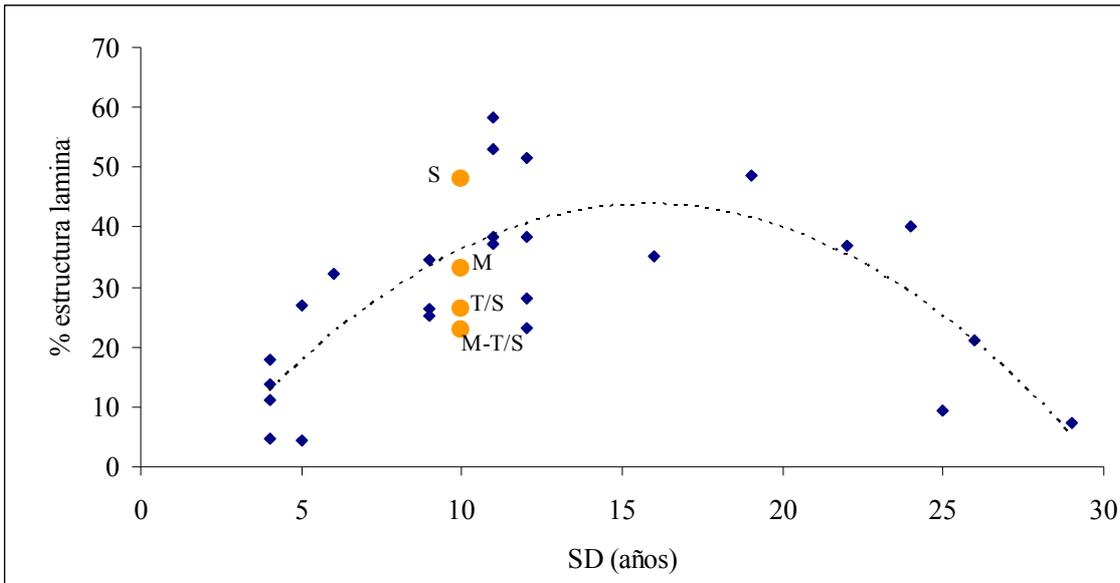


Figura 75. Relación entre años bajo SD y proporción de estructura laminar en el perfil del horizonte superficial en la Pampa húmeda norte. Los círculos anaranjados muestran el porcentaje de estructura laminar de parcelas con 10 años bajo SD. S=soja continua; T/S=trigo/soja; M-T/S=maíz-trigo/soja; M=maíz continuo.

Además, en el Capítulo 2 se analizó la relación entre la formación de la estructura laminar y el ISI tomando información de lotes de la Pampa Húmeda Norte con diferente antigüedad de SD. Aquí, con diferentes secuencias con la misma antigüedad también hubo una asociación entre el ISI y el porcentaje de estructura laminar (Figura 76). En relación a los resultados a escala regional, el coeficiente de determinación aquí fue más bajo. Además, en este ensayo el ISI explicó el 57 % de la variación de la proporción de estructura granular (Figura 77).

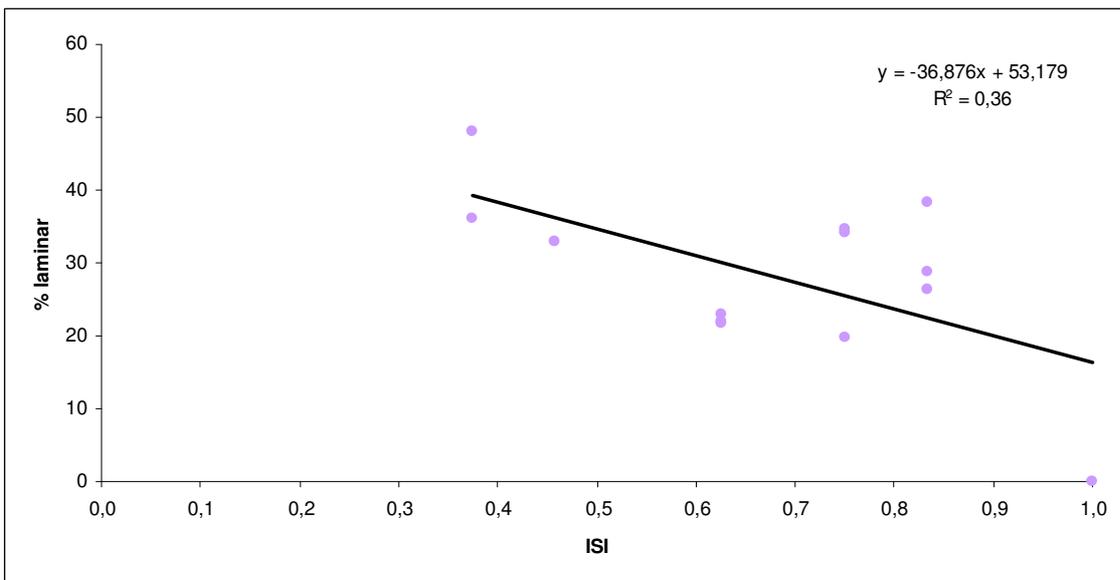


Figura 76. Regresión lineal entre índice de intensificación de la secuencia (ISI) y porcentaje de estructura laminar (n=14).

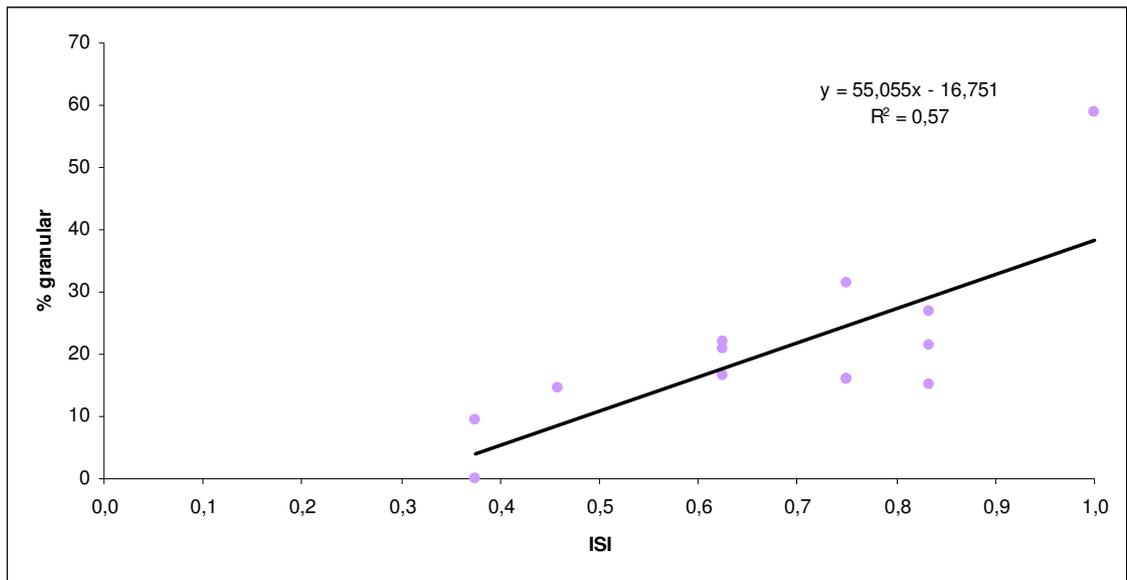


Figura 77. Regresión lineal entre índice de intensificación de la secuencia (ISI) y porcentaje de estructura granular (n=14).

5.3.2. Efecto de la organización estructural sobre componentes del balance de agua

5.3.2.1. Precipitaciones

El estudio del ingreso y del movimiento del agua en el suelo bajo lluvia natural está condicionado por la variabilidad de las precipitaciones. Los eventos de lluvia y escurrimiento que ocurrieron en el período estudiado se presentan en la Figura 78. Un total de 25, 12, 13 y 29 eventos de escurrimiento fueron registrados en las campañas 06-07, 07-08, 08-09 y 09-10, respectivamente. La primera y la última campaña tuvieron precipitaciones superiores al promedio histórico anual (1595 y 1485 mm acumulados, respectivamente), y las dos campañas intermedias fueron secas (732 y 885 mm acumulados, respectivamente) (Figura 79).

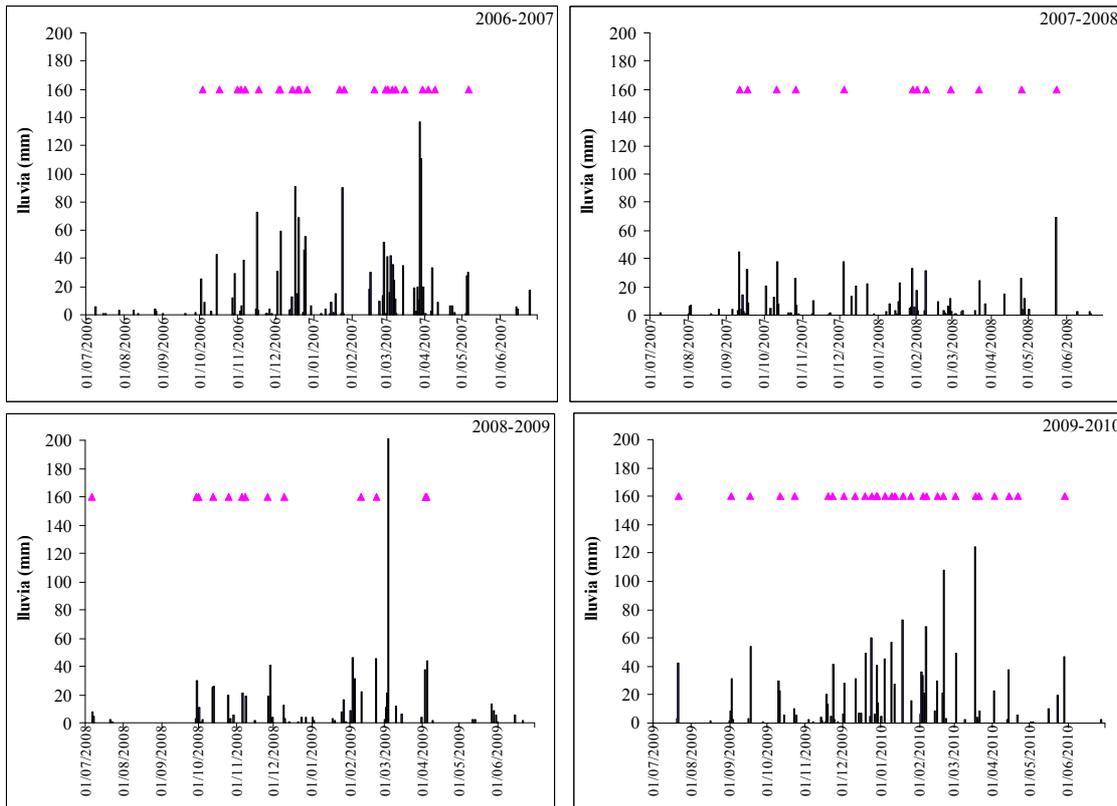


Figura 78. Eventos de lluvia diarios (columnas) y eventos de escurrimiento (símbolo ▲) en las campañas 06-07, 07-08, 08-09 y 09-10.

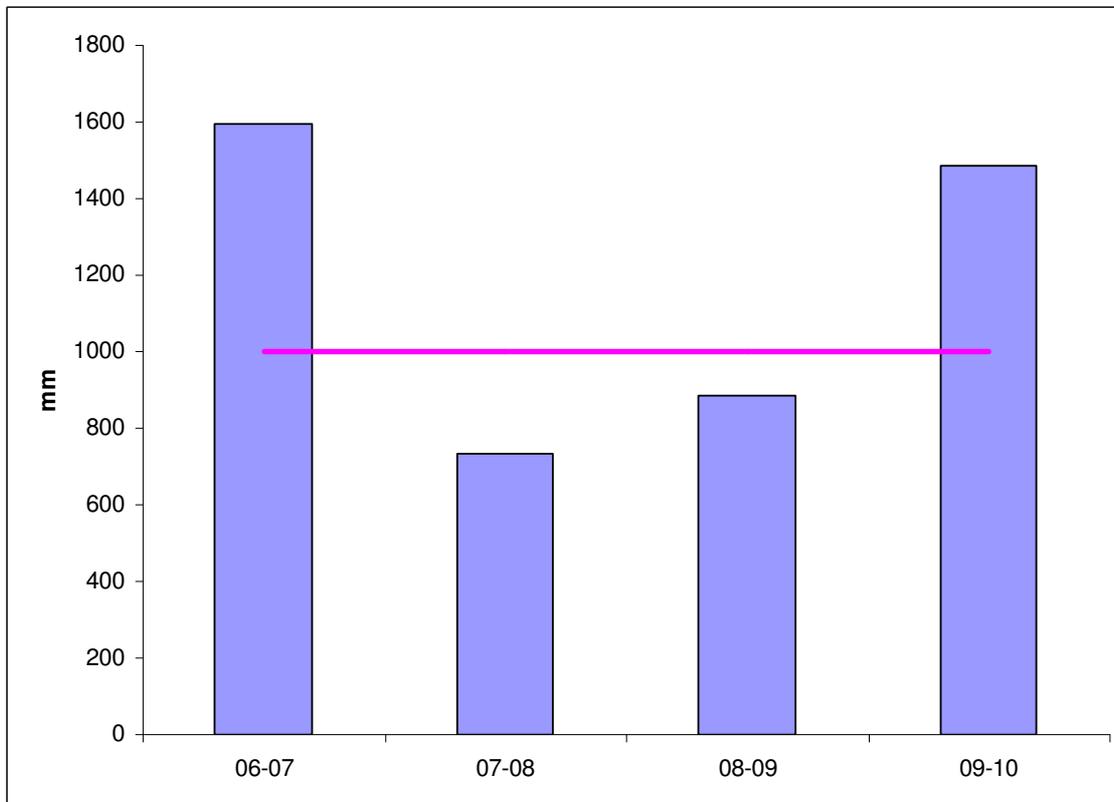


Figura 79. Lluvia acumulada anual en las campañas 06-07, 07-08, 08-09 y 09-10 (columnas) y precipitación histórica anual (línea).

5.3.2.2. Esgurrimiento

Los valores medios de esgurrimiento acumulado durante la campaña 09-10 de las secuencias de cultivos, luego de cuatro años de haberse establecido, se presentan en la Tabla 18. No hubo diferencias entre las secuencias de cultivo y la pérdida de agua anual por esgurrimiento fue seis veces mayor que en P y la mitad que la pérdida en L (Tabla 18). Ghidey y Alberts (1998) obtuvieron resultados similares comparando esgurrimiento de soja y maíz bajo SD con suelo laboreado y descubierto. Tampoco el esgurrimiento promedio fue indicador del efecto de las secuencias de cultivos sobre el ingreso de agua al suelo (Tabla 18) La ausencia de diferencia entre esgurrimientos puede deberse a su elevada variabilidad intra-tratamientos, debido a la variabilidad observada en los estados estructurales de las secuencias.

Tabla 18. Efecto de la secuencia de cultivos (cinco años después de haberse establecido) sobre esgurrimiento promedio y esgurrimiento acumulado (campaña 09-10).

Tratamientos	Esgurrimiento Acumulado	Esgurrimiento promedio
	(mm)	(mm)
S	273,2 a	9,4 a
M-T/S	258,4 a	8,9 a
T/S	306,9 a	10,6 a
CC-S	201,0 a	6,9 a
<i>P</i>	42,1	1,4
<i>L</i>	531	18,3

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD, $p < 0,05$). S=soja continua; CC-S=soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal; T/S=trigo/soja y M-T/S=maíz-trigo/soja; P=pastura y L=laboreado y sin cultivo.

Si bien no hubo diferencias significativas entre tratamientos, se encontraron en las distintas secuencias relaciones significativas lineales ($p < 0,01$) entre la lluvia y los esgurrimientos medios de cada evento ocurrido en la campaña 09-10 (Figura 80). Es decir que para todas las secuencias, inclusive para P y L, mayores lluvias generaron mayores esgurrimientos; sin embargo, la magnitud fue diferente. La pastura y el suelo descubierto se comportaron en forma extrema y las secuencias de cultivo bajo SD en forma intermedia. Las ecuaciones que se presentan en la Figura 80 se generaron con datos de la campaña 09-10. Ello se debió a que tuvo un número muy elevado de eventos de esgurrimiento (29), un régimen de precipitaciones 50 % superior al promedio histórico y también por contarse con tratamientos con repeticiones después de cuatro años de establecidas las secuencias y habiendo pasado dos fases de la rotación M-T/S de dos años de duración.

De las ecuaciones de la Figura 80 se puede deducir que debe ocurrir una lluvia superior a 23 mm para que se genere esgurrimiento en las secuencias de cultivo bajo SD (Tabla 19). La obtención de este dato resulta interesante ya que usualmente se admite un valor umbral de 12,5 mm, para indicar lluvias con potencial de esgurrimiento (Wischmeier y Smith 1958), valor cercano al umbral correspondiente al tratamiento L

en esta campaña. Estos resultados sugieren, por un lado, que bajo SD son necesarias lluvias de mayor volumen para generar escurrimiento, aún con una pendiente de 3,5%. Por otro lado, sugieren que cuando se supera el valor de lluvia mínima que genera escurrimiento, las diferencias entre secuencias de cultivos se manifiestan en las pendientes. Esto implica diferencias entre flujos más que de la capacidad de almacenamiento inicial entre secuencias.

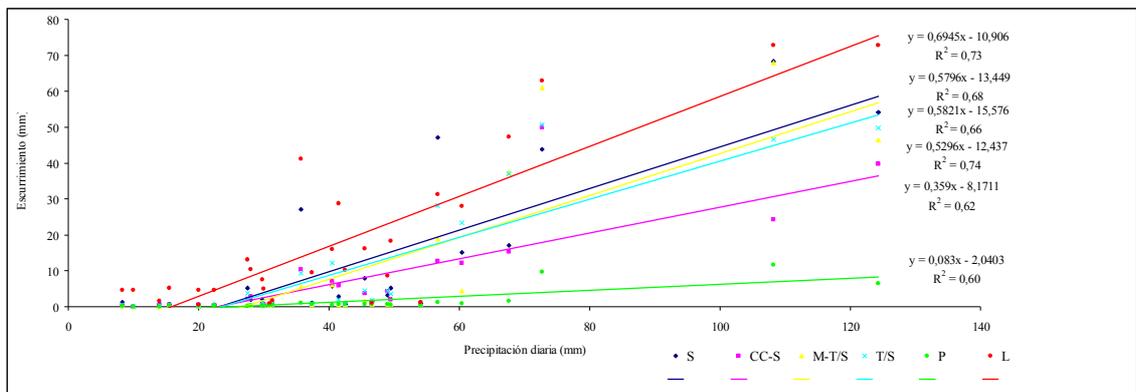


Figura 80. Relación entre precipitación diaria y escurrimiento para los eventos de la campaña 09-10. S=soja continua; CC-S=soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal; T/S=trigo/soja; M-T/S=maíz-trigo/soja; P=pastura y L=laboreado y sin cultivo.

Tabla 19. Precipitación (en mm) que genera escurrimiento para los distintos tratamientos. S=soja continua; CC-S=soja continua con trigo como cultivo de cobertura otoño-invernal; T/S=trigo/soja; M-T/S=maíz-trigo/soja; P=pastura y L=laboreado y sin cultivo.

Tratamiento	Precipitación que genera escurrimiento
	(mm)
S	23,2
CC-S	22,8
T/S	23,5
M-T/S	26,8
P	24,6
L	15,7

En Haplustoles típicos de Córdoba y Argiudoles típicos y vérticos de Santa Fe, Dardanelli et al. (2010) realizaron sucesivas mediciones de perfiles de humedad volumétrica con sonda de neutrones antes y después de cada evento de lluvia, en suelos bajo SD con cultivos invernales y estivales, barbechos y pasturas. Obtuvieron una función que indica que de lluvias de 30 y 60 mm se escurrirían 6 y 20 mm, respectivamente. Coincidentemente, utilizando las ecuaciones obtenidas en la Figura 84, bajo monocultivo de soja (situación prevaeciente en la región) se escurrirían 4 y 21 mm para 30 y 60 mm de lluvia, respectivamente.

Diferentes trabajos informan distintas relaciones escurrimiento/lluvia: 30% en el sur de Francia (Léonard y Andrieux 1998), 5% en el norte de Europa (Léonard et al. 2005). Weir (2002) analizó la relación escurrimiento/lluvia entre 1994-2001 en parcelas de escurrimiento ubicadas en INTA Marcos Juárez con 1% de pendiente y obtuvo valores de 1,6, 7 y 0,5% para T/S, S y P, respectivamente. En este trabajo, en la campaña 09/10, la relación escurrimiento/lluvia para las secuencias, fue 16%. Así, el porcentaje de agua de lluvia que ingresó al suelo (precipitación efectiva) osciló entre 64% para L en la campaña 09-10 y 97,8% para P en los años más secos. Las secuencias de cultivos bajo SD tuvieron valores intermedios y variables entre campañas: en años húmedos (06-07 y 09-10) el porcentaje de lluvia que ingresó al suelo fue 84% y en años secos (07-08 y 08-09), 91%.

El análisis de la relación entre la proporción de los distintos tipos de estructura y el escurrimiento consideró todas las parcelas con cultivos y P. El tratamiento L se descartó de este análisis debido a que no presentó tipos de estructuras comunes a los demás tratamientos, excepto la estructura delta cuya proporción es despreciable en todas las secuencias, y otros perfiles analizados en los capítulos anteriores. Las proporciones de estructuras Γ y Δ no tuvieron relación con el escurrimiento en ninguna de las campañas. Esto puede deberse a que en ninguno de los perfiles se encontró cerca de la superficie del suelo. Sin embargo, las proporciones de estructuras laminar y granular explicaron la variación del escurrimiento en las cuatro campañas analizadas. Mayor proporción de estructura laminar y menor proporción de estructura granular generaron mayores pérdidas por escurrimiento. En las Figuras 81 y 82 se presentan las relaciones entre el escurrimiento acumulado promedio de las cuatro campañas analizadas en función de la proporción de estructuras laminar ($R^2= 0,67$) y granular ($R^2= 0,69$), respectivamente. Si bien, sólo se presenta la Figura con los datos promedio, las regresiones entre estas estructuras y el escurrimiento acumulado en cada una de las cuatro campañas analizadas, fueron significativas (Tabla 20). Es decir, la proporción de estructuras laminar y granular explicaron entre el 32 y el 61 y entre el 31 y el 59 % de la variación del escurrimiento, respectivamente.

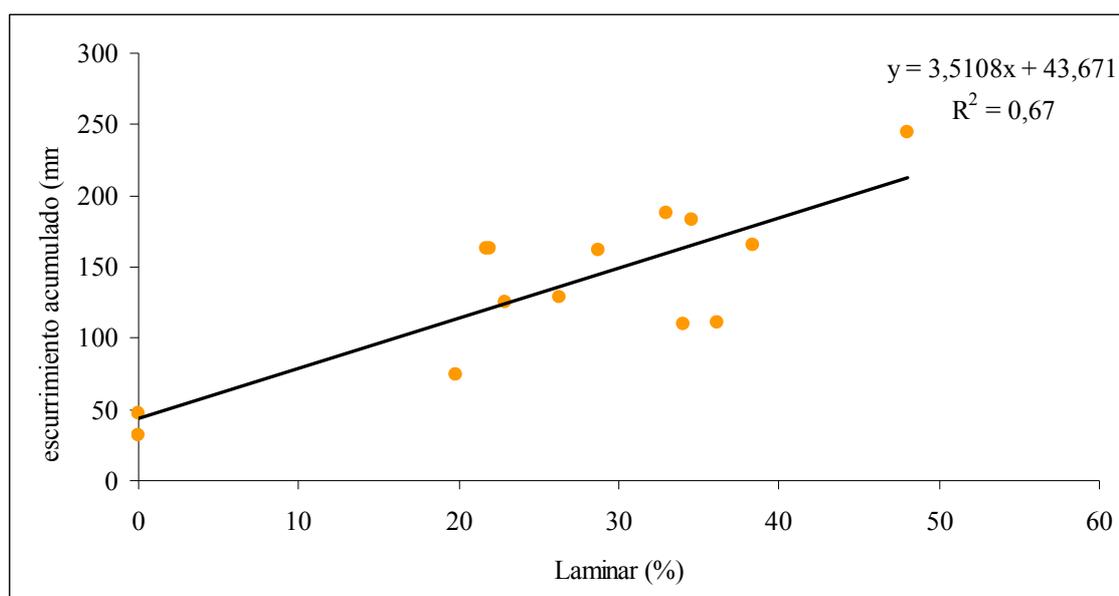


Figura 81. Regresión lineal entre porcentaje de estructura laminar y escurrimiento acumulado promedio de las cuatro campañas analizadas.

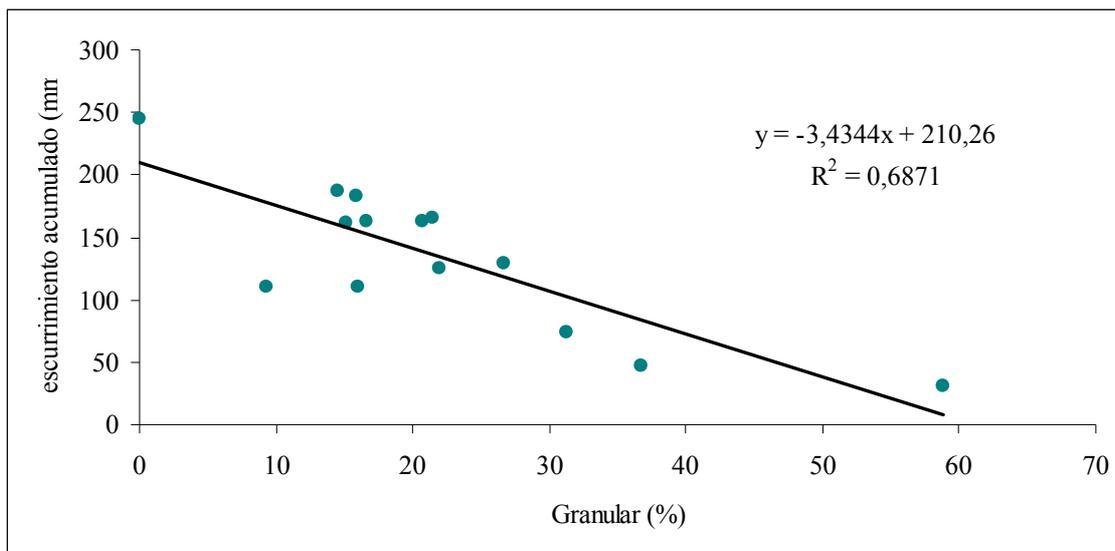


Figura 82. Regresión lineal entre porcentaje de estructura granular y escurrimiento acumulado promedio de las cuatro campañas analizadas.

Tabla 20. Coeficientes de determinación de regresiones lineales simples entre escurrimiento acumulado y porcentajes de estructuras laminar y granular en cuatro campañas.

		Campaña								
		Proporción Estructura	06/07	07/08	08/09	09/10				
Eskurrimiento acumulado	vs	Laminar	R ² 0,40	p<0,01	0,58	p<0,01	0,32	p<0,05	0,61	p<0,01
		Granular	0,38	p<0,05	0,51	p<0,01	0,40	p<0,01	0,59	p<0,01

Estos resultados indican que no hay evidencias suficientes para rechazar la primera hipótesis que enuncia que la estructura laminar restringe el ingreso y favorece el escurrimiento superficial en función de su proporción en el horizonte superficial. A partir de estos resultados, la descripción de la organización estructural con el método del perfil cultural adquiere mayor relevancia y se constituye en una herramienta de diagnóstico para predecir el ingreso de agua al suelo.

5.3.2.3. Infiltración

En coincidencia con los resultados de escurrimiento, el análisis de las propiedades hidrológicas estudiadas en las parcelas con secuencias de 10 años tampoco presentó diferencias significativas entre secuencias. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos a campo fueron moderadas a lentas (Kohnke 1968), y similares a las obtenidas en trabajos anteriores para suelos franco limoso bajo SD (Sasal et al. 2006). La conductividad hidráulica saturada medida a campo y en condiciones de laboratorio (a 0-0,04 y 0,04-0,08 m) sólo fue mayor en la pastura (Tabla 21). Aunque la conductividad hidráulica es considerada un indicador del movimiento del agua y de los cambios generados en el suelo por su uso, en este trabajo ni Kh ni Khc superficiales aparecen como variables de diferenciación de tratamientos bajo SD. Benjamin et al.

(2007) encontraron resultados similares en un suelo franco-limoso de USA, y no encontraron diferencias en el movimiento del agua entre diferentes rotaciones bajo SD. Estos autores también hallaron un valor superior de Khc en una pastura que en otros tratamientos agrícolas, debido al bajo tránsito de maquinaria y a la permanencia de raíces, que incrementan la estabilidad estructural y la continuidad de los poros durante el pasaje del agua.

Tabla 21. Efecto de la secuencia de cultivos sobre conductividad hidráulica saturada a campo (Khc) y conductividad hidráulica saturada de laboratorio (Kh) medias a dos profundidades (0-0,04 m y 0,04-0,08 m).

Tratamientos	Khc	Kh	Kh
	(mm h ⁻¹)	(mm h ⁻¹)	(mm h ⁻¹)
	superficie	0-0,04 m	0,04-0,08 m
S	27.36 b	29.76 b	4.3 b
M-T/S	34.82 b	30.16 b	77.9 ab
T/S	23.26 b	6.32 b	2.9 b
M	26.79 b	48.70 b	24.1 b
P	87.23 a	374.56 a	291.2 a
L	18.41 b	89.15 b	96.3 ab

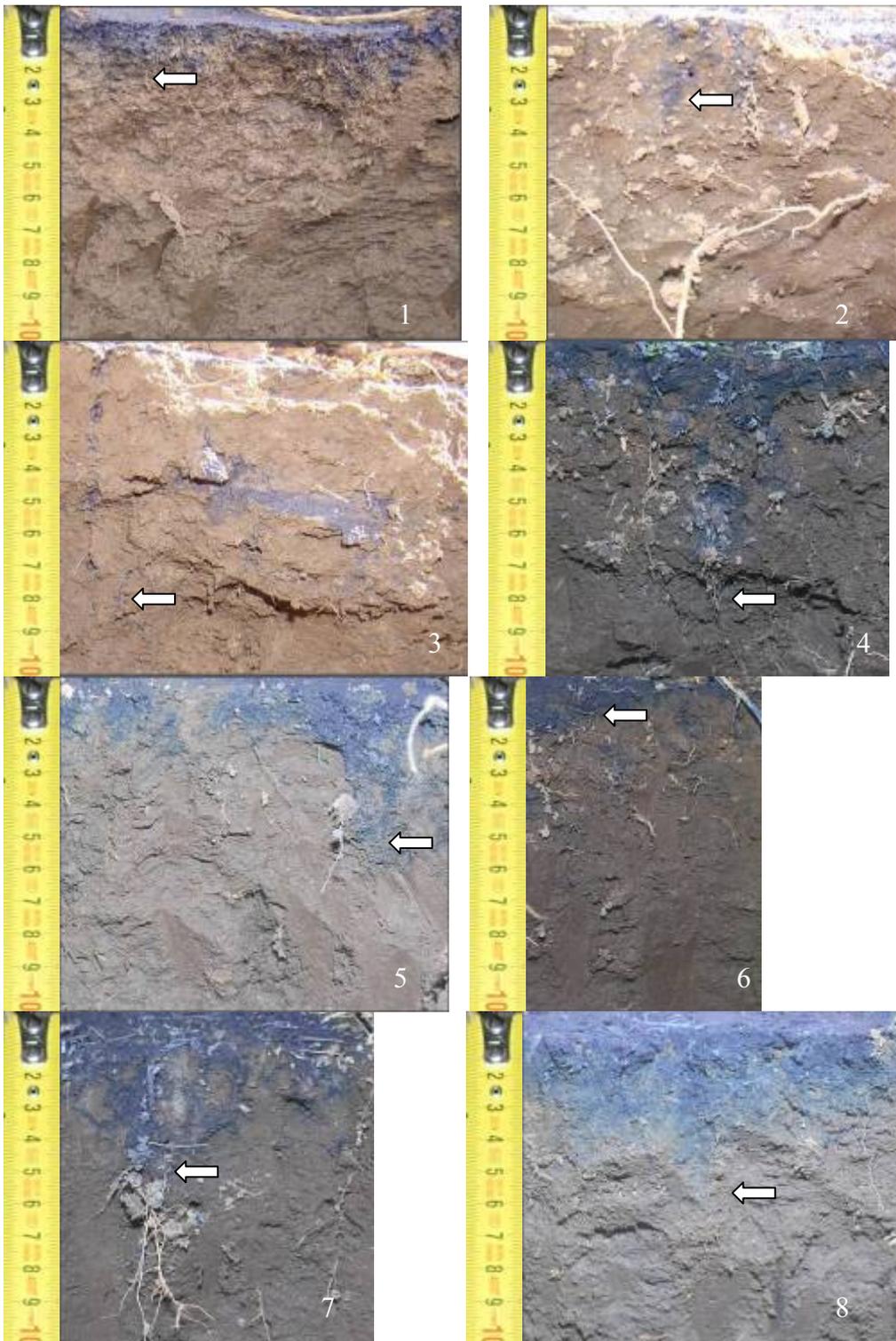
Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Hubo asociación significativa positiva entre Khc y Kh ($p < 0,01$, $r = 0,72$). Sin embargo, los valores promedio de estas propiedades difirieron, siendo Kh 2,5 veces mayor que Khc. Arya et al. (1998) también encontraron asociación positiva entre los datos de campo y de laboratorio; sin embargo, Kh fue dos a tres órdenes de magnitud menor que los valores medidos a campo. Estos autores atribuyeron estas diferencias a la compactación del suelo durante la extracción de los cilindros en condiciones de elevada humedad de suelo. En este trabajo, los valores medidos en laboratorio fueron mayores que los registrados a campo y presentaron elevada variabilidad. Esto puede deberse a la carga hidráulica constante impuesta de 0,02 m en el ensayo de laboratorio, así como a la disrupción de la muestra de suelo durante el muestreo y su transporte. Además, cuando los cilindros fueron insertados en el suelo y fueron usados para forzar flujo cuasi unidimensional, la estructura laminar superficial usualmente se rompe afectando fuertemente las tasas de infiltración (Léonard et al. 2005). Los tratamientos S y M-T/S tuvieron valores similares de Khc y Kh (0-0,04 m), mientras que T/S presentó bajos valores de Kh.

El pigmento *Blue Brilliant* ha sido exitosamente utilizado en experimentos de laboratorio y de campo, como trazador para caracterizar flujos preferenciales (Yasuda et al. 2001). Muchos estudios destacan la buena visibilidad en suelos de este colorante como trazador del movimiento del agua por los macroporos del suelo. En la Figura 83 se presentan fotografías tomadas de los primeros 10 cm de suelo de las 15 parcelas luego de aplicado el colorante *Blue Brilliant* con un infiltrómetro de disco.

Puede destacarse la baja permeabilidad del suelo evidenciada por la exigua profundización del trazador luego de aplicada una lámina de 50 mm. En general, el

pigmento coloreó una capa superficial continua y en algunos casos encontró vías de flujo preferencial, fundamentalmente raíces, para profundizar. Por ejemplo, en la parcela 11 puede observarse la superficie de una raíz teñida de azul. Un caso particular se presentó en la parcela 2 (S de 10 años), donde no se observó ingreso de agua en toda la superficie bajo el disco, sino que sólo se observó pasaje localizado. Esto se debe a que esta parcela fue la única que tuvo estructura laminar desde la superficie.



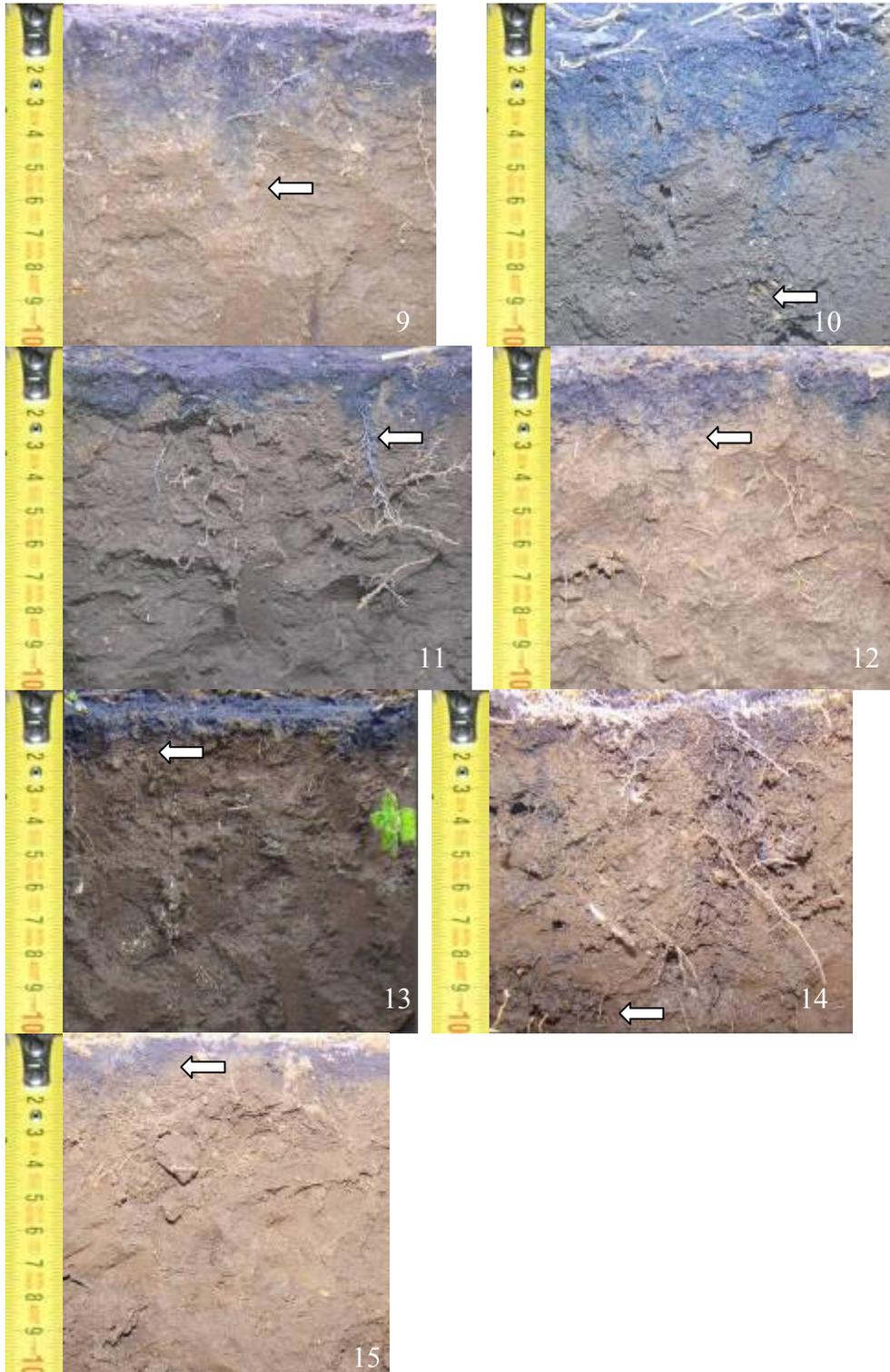


Figura 83. Fotografías de los primeros 10 cm del horizonte A de 15 parcelas luego de la aplicación de colorante *Brilliant Blue*. Las flechas blancas indican el espesor de suelo que fue coloreado con el trazador. 1, 3 y 6=CC-S; 2, 4 y 9=S; 5, 7 y 10=M-T/S; 8, 11 y 12=T/S; 13=M; 14=P y 15=L.

En la Figura 84 puede observarse la relación negativa entre el espesor de suelo que fue coloreado con el trazador y el escurrimiento acumulado promedio. El espesor coloreado explicó un 71 % de la variación del escurrimiento promedio de las cuatro

campañas. Esta relación fue significativa también para cada una de las campañas analizadas (Tabla 22).

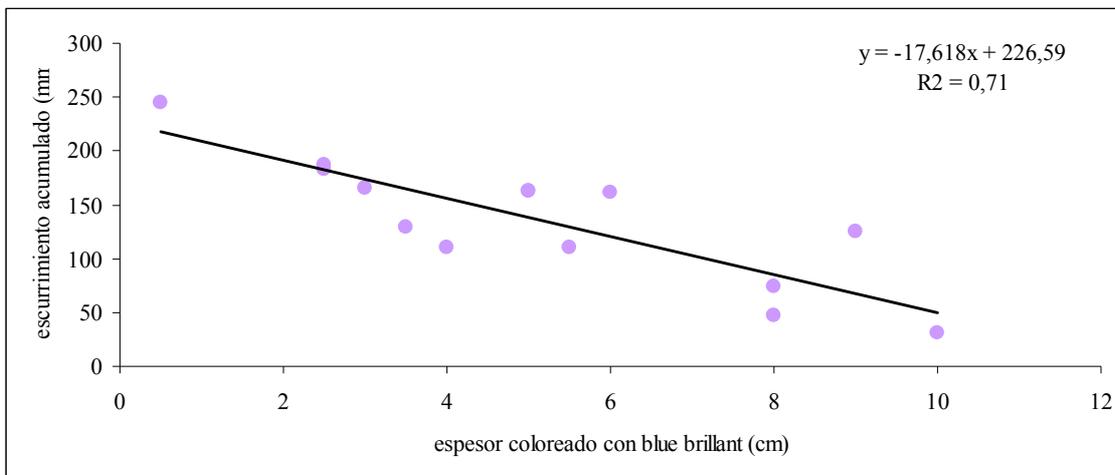


Figura 84. Correlación entre espesor coloreado con trazador *Brillant Blue* y escurrimiento acumulado promedio de las cuatro campañas analizadas.

Tabla 22. Coeficientes de correlación entre escurrimiento acumulado y espesor coloreado con trazador *Blue Brilliant* en cuatro campañas.

		Campaña			
		06/07	07/08	08/09	09/10
Escurrecimiento acumulado	vs	Espesor coloreado con Blue Brillant			
	R ²	0,50	0,64	0,39	0,56
	p	<0,01	<0,01	<0,05	<0,01

A su vez, los porcentajes de estructura laminar y granular explicaron el 70 y el 60% ($p < 0,01$), respectivamente, de la variación del espesor coloreado con el trazador. Es decir, que a mayor proporción de estructura laminar y menor proporción de estructura granular, el espesor coloreado por el trazador fue menor. De esta manera, puede visualizarse el efecto negativo de la estructura laminar y positivo de la estructura granular superficial sobre el ingreso de agua al suelo.

También, el espesor coloreado por el *Brillant Blue* estuvo altamente asociado con el espesor de la capa con estructura granular superficial (Figura 85). A su vez, el espesor de esta estructura condicionó el ingreso de agua al suelo y explicó el 85% del escurrimiento acumulado promedio (Figura 86). Como las observaciones en la Figura 85 se ubican por encima de la bisectriz 1:1, esto indica que en la estructura laminar subyacente también hubo almacenamiento y circulación de agua.

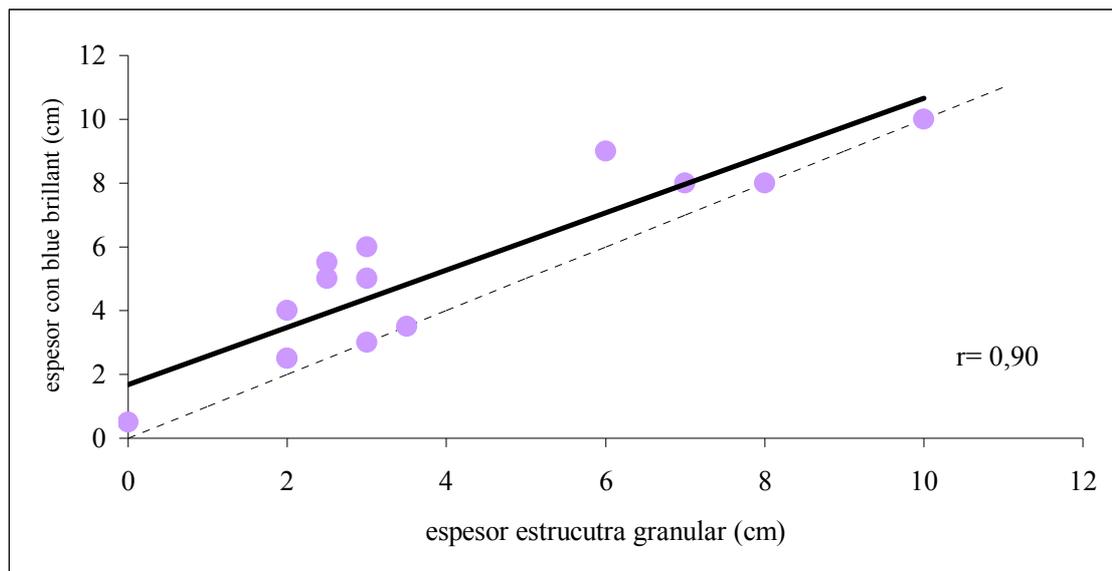


Figura 85. Correlación entre espesor coloreado con trazador *Blue Brilliant* y espesor de la estructura granular.

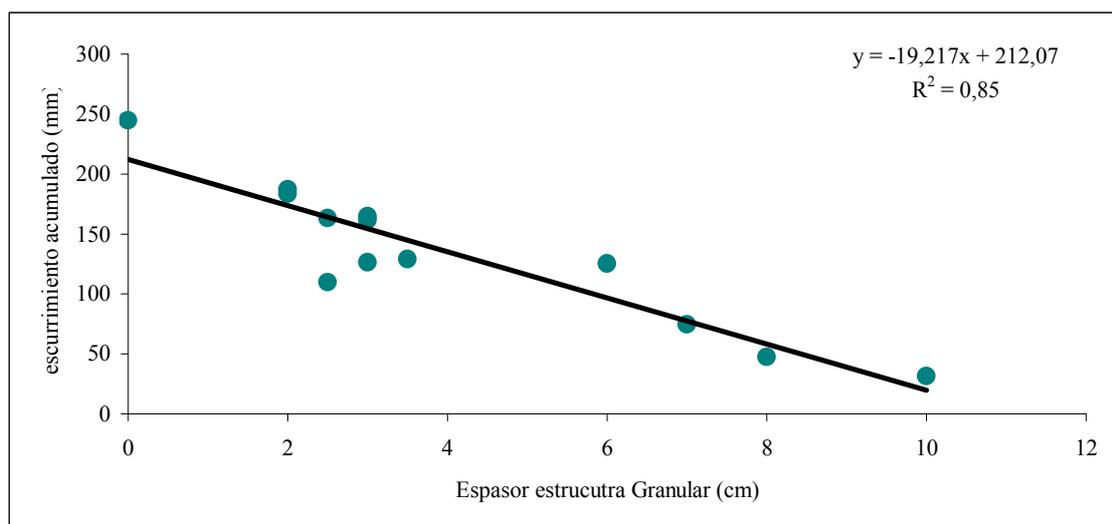


Figura 86. Regresión lineal entre espesor de la estructura granular y escurrimiento acumulado promedio de las cuatro campañas analizadas.

En general, la profundización del colorante *Brilliant Blue* bajo SD fue escasa. La lámina de 50 mm aplicada en condiciones de suelo húmedo requirió dejar los infiltrómetros en el campo durante 24 hs en la mayoría de las parcelas. Si bien, esto se corresponde con la baja K_{hc} medida, parece contraponerse con la relación lluvia/escurrimiento promedio estimada de 16%. La localización del colorante sólo en los primeros centímetros del suelo bajo SD podría explicarse por una elevada capacidad de retención de agua en la estructura granular debida a un mayor contenido de C. En efecto, en la Figura 66 (Capítulo 4) puede observarse que la estructura granular presenta un contenido de C 20% y 40% mayor que las estructuras laminar y gamma, respectivamente.

En este caso, la medición del espesor de estructura granular pudo realizarse con precisión en un perfil de 15 cm (debajo del disco del infiltrómetro). Sin embargo, es muy difícil establecer con precisión el espesor de una capa superficial para un perfil de un metro de ancho debido a la variabilidad del terreno. Por ello, la cuantificación de la proporción de estructuras en el perfil cultural resulta más adecuada para comparar tratamientos. La Figura 87 presenta la relación entre el escurrimiento acumulado promedio observado de las cuatro campañas y el simulado mediante una regresión múltiple ($y=133,11-2,11*\text{granular}+1,95*\text{laminar}$). Así, la combinación de la estructura laminar, consigno positivo, con la granular, con signo negativo, explican el 85 % de la variación del escurrimiento promedio.

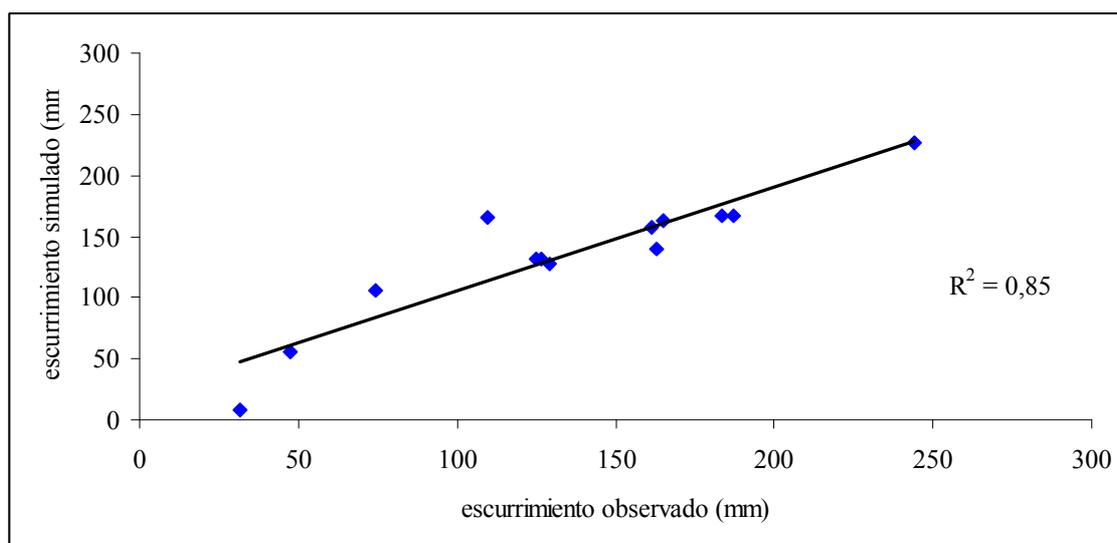


Figura 87. Relación entre escurrimiento acumulado promedio de las cuatro campañas observado y simulado ($y=133,11-2,11*\text{granular}+1,95*\text{laminar}$).

5.3.3. Cobertura en superficie e intensificación de la secuencia

Está documentado por numerosos autores el rol protector de la cobertura de residuos de cultivo bajo SD sobre la superficie del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, evitando así el sellado superficial y disminuyendo el escurrimiento. Basado en un extenso estudio, Wischmeier (1966) concluyó que la tasa de infiltración está más ligada a la condición superficial y manejo del suelo, que a sus propiedades intrínsecas. Bradford y Huang (1994) mencionan que la influencia de los rastrojos sobre la infiltración es más importante que la producida por el tratamiento realizado al suelo. De la Vega et al. (2004) encontraron que la tasa de infiltración básica de un Argiudol de la Pampa Ondulada estaba más regulada por el grado de cobertura que por el contenido inicial de agua edáfica y su Dap. Por ello, se analizó el aporte de materia seca en las distintas parcelas.

No hubo relación significativa entre el escurrimiento acumulado ni los coeficientes de escurrimiento y la materia seca de residuos aportada sobre la superficie en las distintas parcelas luego de la cosecha y la interrupción del ciclo del cultivo de cobertura en CC-S. La producción total de materia seca en la campaña 09/10 fue: 2.950, 6.900, 8.100 y 8.800 kg ha⁻¹ año⁻¹ para S, T/S, la fase T/S de la rotación M-T/S y CC-S,

respectivamente. El monocultivo de soja, con casi tres veces menor producción de materia seca y una baja relación C:N tuvo pérdidas por escurrimiento que no se diferenciaron significativamente del resto de las secuencias. Esto sugiere que la producción de MS, e indirectamente la cobertura superficial, no resultó un factor controlador del ingreso de agua al suelo. En general, las precipitaciones de mayor volumen se produjeron en otoño (Figura 78), en el momento de la cosecha de los cultivos de verano y cuando la superficie del suelo de todas las parcelas estaba totalmente cubierta. Esto explica que la variación en el ingreso de agua al suelo sea altamente dependiente de las características estructurales, particularmente de la proporción de estructuras laminar y granular.

Sin embargo, el ISI permitió explicar la variación del escurrimiento acumulado promedio (Figura 88). Este resultado corrobora que cuanto mayor es el tiempo ocupado por cultivos, menores son las pérdidas de agua por escurrimiento, y sugiere que para reducir el agua escurrida, el período del año ocupado por cultivos es más importante que la cantidad de residuos en superficie. En consecuencia en las condiciones en que se hizo la experiencia, no se recabaron evidencias suficientes para rechazar la segunda hipótesis que enuncia que diferentes secuencias de cultivos con la misma duración de SD modifican la relación lluvia/escurrimiento: el ingreso de agua al suelo es mayor en las secuencias de cultivos más intensificadas (>ISI).

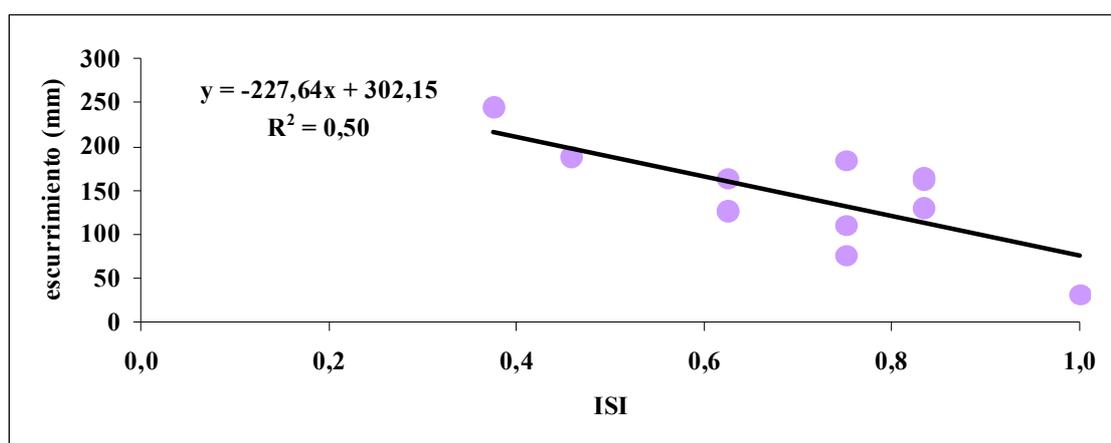


Figura 88. Regresión lineal entre el índice de intensificación de la secuencia (ISI) y el escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas (mm).

Los resultados indican que la reducción del escurrimiento y el consecuente incremento en la infiltración constituyen un aporte de la intensificación de las secuencias de cultivos a la sustentabilidad del sistema. El diseño de secuencias de cultivos orientadas a valorizar la disponibilidad de recursos (agua y radiación) durante el invierno es un punto importante dentro de los requisitos para lograr una intensificación sustentable en la Pampa, ya que la agricultura argentina se basa en el cultivo de soja con largos períodos de barbecho (Caviglia y Andrade 2010). En contraposición, la pastura, con ISI=1, mantiene cobertura con cultivos con raíces activas durante todo el año, no tuvo estructura laminar y la estructura granular ocupó el 60% del perfil del horizonte A. En este caso, se produjo la infiltración del 97% del agua de lluvia en todas las campañas.

Las secuencias de cultivo que incluyeron el cultivo invernal (trigo) para producción de granos o como cobertura tuvieron $ISI > 0,6$ y proporciones de estructuras laminar y granular menor que 30% y mayor que 15%, respectivamente. Particularmente, el trigo u otras gramíneas de invierno que se siembran con distanciamiento corto entre hileras (a diferencia de las gramíneas de verano como maíz o sorgo granífero) favorecen la interrupción de capas continuas de estructura laminar con sistemas radicales en cabellera y la formación de estructura granular superficial. Aplicando las ecuaciones generadas en este capítulo, comparando una secuencia T/S con $ISI = 0,83$ y un monocultivo de soja con $ISI = 0,38$, la mejora en el ingreso de agua al suelo con T/S asciende a 33%. La magnitud de este valor es variable según la escala espacial de consideración. En efecto, estará asociada con la reducción en los rendimientos de cultivos y a la degradación por erosión hídrica a nivel local y, a nivel regional, con la recarga de acuíferos y cursos de agua superficiales.

5.4. CONCLUSIONES

Las pérdidas por escurrimiento superficial y las restricciones al ingreso de agua al suelo generadas en suelos limosos de Entre Ríos con 10 años bajo SD y con diferentes secuencias de cultivos se cuantificaron en relación a las lluvias ocurridas en cuatro campañas. La importante variabilidad intra-tratamiento de este ensayo, debido a los diferentes cultivos antecesores de cada parcela, permitió contar con una amplia gama de situaciones con diferentes proporciones de estructuras en el perfil de horizonte A y encontrar funciones para relacionarlas con algunos componentes del balance de agua.

La clásica medición de conductividad hidráulica, tanto a campo como en laboratorio, no resultó un buen indicador del ingreso del agua al suelo y de los cambios generados en el suelo por su uso. Sin embargo, la aplicación del trazador *Brilliant Blue* permitió visualizar el efecto negativo de la estructura laminar y positivo de la estructura granular superficial sobre el ingreso de agua al suelo. A partir de estos resultados, la descripción de la organización estructural con el método del perfil cultural adquiere mayor relevancia y se comprueba su valor como herramienta de diagnóstico para predecir el ingreso de agua al suelo.

La consecuencia de la formación de estructura laminar es la principal restricción al ingreso y el escurrimiento superficial del agua en función de su proporción en el horizonte superficial. Un efecto contrario ejerció la presencia de estructura granular superficial. Así, a mayor proporción de estructura laminar y menor proporción de estructura granular se generaron mayores pérdidas de agua por escurrimiento.

Al igual que en el Capítulo 2, el ISI se relacionó con la proporción de estructura laminar. También, estuvo asociado a la proporción de estructura granular. La comparación de distintas secuencias, características de la región, y con la misma antigüedad de SD indicó que el ingreso de agua al suelo fue mayor en las secuencias de cultivos más intensificadas ($> ISI$). Así, por un lado se robustece el ISI como indicador, no sólo del estado estructural, sino también del funcionamiento hídrico del horizonte superficial del suelo. Por otro lado, se destaca el efecto negativo de la simplificación del sistema de cultivo, evidenciado en la expansión del monocultivo de soja, sobre la sustentabilidad ambiental del agroecosistema.

CAPITULO 6

Conclusiones generales

La evolución del funcionamiento físico de los suelos y su relación con la dinámica del agua son aspectos clave en la sustentabilidad ambiental de los agrosistemas. La SD resulta una práctica adecuada para mitigar procesos erosivos asociados a la labranza en Molisoles. Sin embargo, combinada con la simplificación de las secuencias de cultivos, particularmente con el monocultivo de soja, genera la necesidad de estudiar nuevos aspectos de la degradación física de los suelos cultivados.

Al presente, se carecía de una clara visión acerca de los efectos de la SD sobre la evolución de la estructura edáfica en suelos limosos. Algunos trabajos previos informaban la formación de una estructura laminar cercana a la superficie y otros, variaciones en la tasa de infiltración de lotes agrícolas bajo SD continua asociados al patrón estructural. Si bien, la estructura laminar había sido descrita por muchos autores nacionales y extranjeros, la causa de su formación fue atribuida en otras latitudes a condiciones climáticas no extrapolables a la región pampeana, ya que en general se la asocia a fisuras generadas por congelamiento del suelo.

El objetivo de esta tesis fue identificar factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo SD y analizar las consecuencias de la presencia de estructura laminar y otras estructuras asociadas sobre el balance de agua. La identificación y cuantificación de distintos tipos de estructuras en el horizonte superficial de lotes agrícolas, junto con ensayos manipulativos en suelos limosos permitió modelar la evolución de la estructura laminar, sus factores formadores y su efecto sobre el funcionamiento hídrico.

En el diseño de los ensayos y los muestreos de esta tesis, los parámetros tradicionalmente utilizados para caracterizar la aptitud física de un suelo (densidad aparente, distribución de poros por tamaño, estabilidad de agregados) sólo se usaron de forma complementaria a otras aproximaciones que permitieron visualizar los cambios en la organización de las estructuras del horizonte superficial del suelo. Esto se debió a la intención de tener una mirada integral y dinámica del funcionamiento del suelo y adecuada al sistema de SD. Bajo SD, la ausencia de labores tiene como efecto indirecto la ausencia de homogeneización de propiedades edáficas. Particularmente, en el estudio de la organización estructural de suelos limosos sin remoción, cobran relevancia las escalas de tiempo y espacio analizadas.

El método del perfil cultural con análisis de imágenes fue la metodología seleccionada para conocer la organización estructural de suelos limosos bajo SD, para poner en evidencia la extensión regional de la estructura laminar y para estudiar su evolución e hipotetizar sobre su origen. También, se realizó la medición directa de escurrimiento y la utilización del trazador *Blue Brilliant* para visualizar el movimiento del agua en el suelo. Estas técnicas no son novedosas en sí mismas, sino en su aplicación. Además, se incorporó al análisis un índice, ISI, que integra características de los sistemas de cultivo difíciles de cuantificar, como la duración de los barbechos, los momentos de siembra y cosecha, y la continuidad de la actividad biológica asociada a las raíces activas en el suelo.

Antes de comenzar esta tesis, no estaba claramente identificada la importancia de la presencia de la estructura laminar a escala espacial. Por ello, se estableció la magnitud de la extensión de la estructura laminar en la Pampa Húmeda norte, región relativamente homogénea en tipo de suelo, clima y características de la agricultura. El 100% de los lotes muestreados presentó estructura laminar. La utilización de la aproximación del perfil cultural, que permite la observación del horizonte superficial del suelo en pozos de gran tamaño, permitió hallar este resultado ya que la realización de pozos tradicionales, pequeños y para extracción de muestras a profundidades fijas no hubiera permitido identificar estructuras laminares muy delgadas o discontinuas. Así, para las condiciones en que se realizó la experiencia, no se reunieron evidencias suficientes para rechazar la primera parte de la hipótesis general de esta tesis: el horizonte superficial de suelos limosos bajo SD tiene un patrón estructural que combina distintas estructuras, con elevada frecuencia de aparición de la estructura laminar cerca de la superficie. Además, el estudio a escala regional de la estructura laminar permitió identificar algunos factores condicionantes de su proporción en el horizonte superficial, como los años de SD y la secuencia de cultivos.

La evolución de la estructura laminar bajo SD es compleja. Para aislar o identificar las causas de su origen, se realizaron ensayos de campo y laboratorio. Un hallazgo inesperado, a partir de los resultados de campo, fue que el tránsito de maquinaria agrícola y la cobertura superficial de residuos de cosecha no afectaron la evolución de la estructura laminar. Así, se rechazó una teoría generalmente aceptada, no sólo en el medio profesional local, sino también en la literatura, para explicar su formación. Se considera que éste es uno de los principales hallazgos originales de la tesis.

Mediante un ensayo con columnas de suelo, en laboratorio, se determinó que la estructura laminar se forma principalmente por fisuración debida a la acción de humedecimiento y secado de una estructura masiva. Esto está en concordancia con los modelos generados a escala regional, que indican que la estructura laminar se forma en detrimento de la estructura Γ subyacente. Estos resultados indican que no se reunieron evidencias suficientes para rechazar totalmente la segunda parte de la hipótesis general. La misma enunciaba que la estructura laminar es originada por fisuración horizontal, por ciclos de h-s, a partir de estructuras masivas generadas por aumentos de cohesión de las partículas edáficas y eventualmente incrementada por el tránsito con bajo volumen de cobertura. También, en laboratorio, se analizó la contribución de las raíces en la formación de la estructura laminar por el crecimiento lateral y exploración de la capa superficial del suelo debido al impedimento en su profundización por elevados valores de densidad aparente crítica de las estructuras Γ y Δ ($1,44 \text{ Mg m}^{-3}$). El valor de D_{ap} crítica se estableció usando el indicador de calidad edáfica IHO.

La comparación de secuencias de cultivos contrastantes como el monocultivo de soja y la rotación M-T/S en el ensayo con más de 20 años de Pergamino, permitió identificar características de la estructura Γ asociadas al movimiento del agua, clave en la formación de la estructura laminar. A largo plazo, el monocultivo de soja tuvo efecto sobre la distribución por tamaño de los macroporos de la estructura Γ y su estabilidad, afectando la microfisuración diferencial en esta estructura y la formación de agregados elongados. En la secuencia con gramíneas, adquiere relevancia el desarrollo de estructura granular desde la superficie del suelo.

En general, los perfiles culturales realizados consecutivamente en distintos ensayos, muestran que la proporción de los distintos tipos de estructuras es dinámica, en el corto plazo y aún luego de más de 20 años de establecidas las secuencias de cultivos. La proporción de estructura laminar en el perfil está asociada con el número de años bajo SD. El ISI resultó no sólo un buen indicador de la proporción de estructuras laminar y granular en el perfil del horizonte superficial sino también del funcionamiento hídrico del suelo.

La Figura 89 presenta un esquema conceptual propuesto sobre la evolución de la estructura en el horizonte superficial de suelos limosos bajo SD. Cuando se interrumpen las labores y se inicia el sistema de SD se produce la consolidación natural del suelo, luego la formación progresiva, por h-s y la actividad de las raíces, de la estructura laminar en detrimento de la estructura Γ , hasta que se torna continua y extendida completamente en el horizonte superficial. Finalmente, si la secuencia de cultivos es intensificada, la capa continua de estructura laminar se discontinúa y/o minimiza por actividad de organismos y raíces conduciendo a la formación de estructura granular en superficie. En cambio, si el ISI es bajo, por ejemplo con monocultivo de soja, la estructura laminar ocupa aproximadamente el 50% del horizonte superficial del suelo.

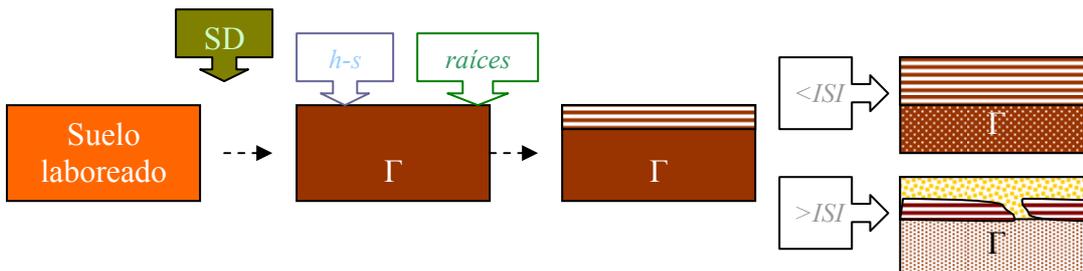


Figura 89. Esquema conceptual propuesto sobre la evolución de la estructura en el horizonte superficial de suelos limosos bajo SD

La disponibilidad de un ensayo de largo plazo con 10 años de SD en Paraná y diferentes secuencias de cultivos permitió contar con una amplia gama de proporciones de estructuras en el perfil de horizonte A, y encontrar funciones para relacionarlas con algunos componentes del balance de agua. Con los resultados obtenidos durante cuatro campañas, no se reunieron evidencias suficientes para rechazar la última parte de la hipótesis general. En efecto, se demostró que la estructura laminar altera el patrón de drenaje, restringe el ingreso de agua al suelo y aumenta el escurrimiento superficial en función de su proporción en el perfil del horizonte A, así como que la secuencia de cultivos implementada bajo SD condiciona la formación y las características de esta estructura.

La vinculación de la información del estado estructural con el balance de agua a la escala de lote permitió detectar patrones estructurales favorables o desfavorables y caracterizarlos. Además, las ecuaciones generadas permiten identificar, mediante el ISI, secuencias de cultivos con proporciones de estructuras laminar y granular que mejoran

la captación de agua para aumentar rendimientos de cultivos y minimizan riesgos ambientales asociados a las pérdidas de agua por escurrimiento.

Frecuentemente, en los capítulos que componen la tesis, se destacaron los diferentes efectos negativos de la simplificación del sistema de cultivo, evidenciado en la expansión del monocultivo de soja, sobre la sustentabilidad ambiental del agroecosistema. Entre ellos, la formación de estructura laminar de considerable espesor, la ausencia de estructura granular superficial, la menor proporción de macroporos mayores que 300 μm y la baja estabilidad de la estructura Γ y en consecuencia, la restricción al ingreso del agua que favorece el escurrimiento superficial. Por ejemplo, un aumento de la proporción de estructura laminar en el horizonte superficial de 20 a 50% puede duplicar las pérdidas de agua por escurrimiento.

Las secuencias más intensificadas en la región son las que presentan trigo, ya que es el principal cultivo de invierno y siempre precede a una soja de segunda fecha de siembra. De esta manera, se mantiene el suelo con elevado tiempo de ocupación, similar al tiempo que ocuparía una pastura. Además, el trigo se siembra con poca distancia entre hileras y así puede favorecer la interrupción de capas continuas de estructura laminar con sistemas radicales en cabellera y la formación de estructura granular superficial. Un aumento de la proporción de estructura granular en el horizonte superficial de 10 a 20 % puede reducir un 20% las pérdidas de agua por escurrimiento.

En esta tesis se discutieron los conceptos reestructuración, regeneración y degradación estructural. La *reestructuración*, a través de ciclos de h-s y/o de la actividad de raíces, a partir de una condición previa densificada puede considerarse como *regeneración o degradación* de la estructura del suelo, según el efecto sobre el funcionamiento hídrico. Así, el reestablecimiento de un nivel aceptable de porosidad estructural que se habría perdido por compactación, por la formación de una estructura laminar, con agregados elongados paralelos a la superficie del suelo, con poros de orientación preferencialmente horizontal y restricción al ingreso del agua al suelo, constituye un proceso de *degradación*. Aunque seguramente ofrecerá una mejora en infiltración si se la compara con la situación previa. Sin embargo, la evolución del suelo bajo SD en situaciones con elevado ISI, formación de estructura granular en superficie, estructura laminar delgada o discontinua y alta tasa de ingreso de agua al suelo se considera un proceso de *regeneración* estructural (Figura 90).

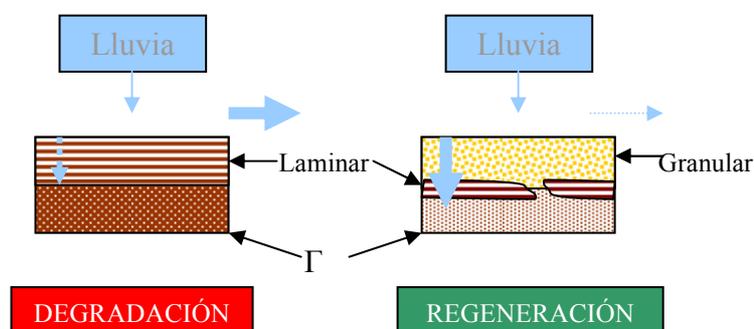


Figura 90. Esquema conceptual propuesto sobre el efecto del patrón estructural del horizonte superficial de suelos limosos bajo SD sobre el ingreso de agua al suelo y el escurrimiento (en flechas color celeste).

En síntesis, esta tesis contribuyó con

- la comprensión de la evolución y el funcionamiento físico de los suelos limosos bajo SD,
- la identificación de los factores que causan la formación de estructura laminar bajo SD,
- la valorización de metodologías de campo y laboratorio como herramientas de diagnóstico, para detectar las causas de mal funcionamiento estructural de los suelos limosos y predecir el ingreso de agua al suelo y
- la toma de decisiones para mejorar la planificación de las secuencias de cultivos a implementar.

Finalmente, de esta tesis surgieron temas de investigación para profundizar, entre los que se pueden destacar:

- la velocidad y tendencia de la evolución de un patrón estructural degradado, con el 50% de estructura laminar en el horizonte superficial
- el efecto de la alternancia de distintos cultivos en la rotación sobre los ciclos de h-s
- la influencia del crecimiento de las raíces entre agregados en la formación de estructura laminar y su influencia a través de la extracción de agua sobre los ciclos de h-s
- los factores que condicionan la formación de la estructura granular
- el impacto del patrón estructural sobre el almacenaje de agua, abastecimiento de nutrientes, rendimiento de los cultivos, hábitat de microorganismos, protección del carbono orgánico, erosión, filtrado y transformaciones de solutos.

Se prevé que el sistema de SD continuará prevaleciendo en los suelos cultivados pampeanos y esta tesis demuestra que la sustentabilidad de este sistema de manejo depende fuertemente del tipo de rotación y/o secuencia de cultivos implementada. En la exploración de impactos negativos de las prácticas agrícolas, hay niveles de profundización del conocimiento diferenciales para los distintos compartimentos del ambiente. En efecto, deben responderse aún muchos interrogantes que no fueron abordados en esta tesis, entre ellos cómo están relacionadas las distintas proporciones de estructuras edáficas bajo SD con el secuestro o pérdida de C orgánico, en función de la necesidad de mejorar la huella de carbono, la erosión hídrica y la calidad de cursos de agua superficiales o la emisión de gases, a fin de asegurar que la evolución de la estructura edáfica no constituya una limitante a la sustentabilidad de las producciones agrícolas.

BIBLIOGRAFIA

- Acuna, T., Botwright, L., Pasuquin, E. y Wade, L.J. 2007. Genotypic differences in root penetration ability of wheat through thin wax layers in contrasting water regimes and in the field. *Plant Soil*, 301:135-149.
- Alakukku, L. 1998. Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. *Soil Till. Res.*, 47:83-89.
- Alakukku, L., Weiskopf, P., Chamen, W.C.T., Tijink, F.G.J., Van der Linden, J.P., Pires, S., Sommer, C. y Spoor, G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73:145-160.
- Alvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutierrez Boem, F.H., Bono, A., Fernandez, P.L. y 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.
- Alvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutiérrez Boem, F.H., Fernández, P.L. y Prystupa, P. 2006. Distintos manejos del suelo en la Pampa Ondulada: I. Efecto sobre las propiedades edáficas. *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Salta.
- Alvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century model. *Soil Use Manage*, 17:62-66.
- Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *J. Sustain. Agr*, 14:83-150.
- Amézketa, E., Singer, M.J. y Le Bissonnais, Y. 1996. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1086-1090.
- Andrade, A., Wolfe, D.W. y Fereres, E. 1993. Leaf expansion, photosynthesis and water relations of sunflower plants grown on compacted soil. *Plant Soil*, 149:175-184.
- Andriulo, A.E., Sasal, M.C., Irizar, A.B., Restovich, S.B. y Rimatori, F. 2008. Efecto de diferentes sistemas de labranza, secuencias de cultivo y de la fertilización nitrogenada sobre los stocks de C y N edáficos. Pp. 117-129 en Galantini, J.A. (ed.) *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de Argentina*. Asociación Argentina de la Ciencia de Suelo.
- Ankeny, M.D. 1992. Methods and theory for unconfined infiltration measurements. En Topp, G.C., Reynolds, W.Y. y Green, R.D. (eds.) *Advances in measurement in soil physical properties: bringing theory into practice*. SSSA, Special Publication N° 30.
- Ankeny, M.D., Kaspar, T.C. y Horton, R. 1990. Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 54: 837-840.
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M. y Le Bissonnais Y. 2007. Soil Aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:413-423.
- Arvidsson, J. y Håkansson, I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil Till. Res.*, 39:175-197.
- Arya, L.M., Dierolf, T.S., Sofyan, A., Widjaja-Adhi, I.P.G. y Van Genuchten, M.Th. 1998. Field Measurement of the saturated hydraulic conductivity of a macroporous soil with unstable subsoil structure. *Soil Sci.*, 163:841-852.
- Ball, B.C. y Robertson, E.A.G. 1994. Effects of soil water hysteresis and the direction of sampling on aeration and pore function in relation to soil compaction and tillage. *Soil Till. Res.*, 32:51-60.
- Ball, B.C., Campbell, D.J., Douglas, J.T., Henshall, J.K. y O'Sullivan, M.F. 1997. Soil structural quality, compaction and land management. *Eur. J Soil Sci.*, 48:593-601
- Ball-Cohelho, B.R., Roy, R.C. y Swanton, C.J. 1998. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil Till. Res.*, 45:237-249.

- Barbagelata, P.A. y Melchiori, R.J.M. 2007. Balance de nutrientes en campos agrícolas de la provincia de Entre Ríos. Pp. 230 en Caviglia, O.P., Paparotti, O.F. y Sasal, M.C. (eds.) Agricultura Sustentable en Entre Ríos. Ediciones INTA.
- Bengough, A.G. y Mullins, C.E. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41:341–358.
- Benjamin, J.G., Mikha, M., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., Calderón, F. y Henry, W.B. 2007. Cropping intensity effects on physical properties of a no-till silt loam. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:1160-1165.
- Betz, C.L., Allmaras, R.R., Copeland, S.M. y Randall, G.W. 1998. Least Limiting Water Range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1384-1393.
- Bezerra de Oliveira, L. 1968. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em mostras de solo com estrutura indeformada. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 3:197-200.
- Bingham, I.J. 2001. Soil–root–canopy interactions. *Ann. Appl. Biol.*, 138:243–251.
- Blanchart, E., Albrecht, A., Brown, G., Decaens, T., Duboisset, A., Lavelle, P., Mariani, L. y Roose E. 2004. Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 104:303-315.
- Boizard, H., Capowiez, Y., Leonard, J., Cadoux, S., Lheureux, S., Cousin, I., Roger-Estrade, J. y Richard, G. 2009. Soil structure regeneration after compaction in a loamy soil in Northern France: the influence of climate and earthworms. *Actas del 18th Conference of the international soil tillage research organization (ISTRO)*, Izmir, Turkey.
- Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Dürr, C. y Boiffin, J. 2002. Cumulative effects of cropping systems on structure of the tilled layer in northern France. *Soil Till. Res.*, 64:149-164.
- Bonel, B., Morrás, H.J.M. y Bisaro, V. 2005. Modificaciones en la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo*, 23:1-12.
- Borie, F., Rubio, R., Rouanet, J.L., Morales, A., Borie, G. y Rojas, C. 2006. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol. *Soil Till. Res.*, 88:253-261.
- Boruvka, L., Valla, M., Donátová, H. y Nemecek K. 2002. Vulnerability of soil aggregates in relation to soil properties. *Rostlinná Vyroba*, 48: 329-334.
- Bradford, J.M. y Huang, C. 1994. Mechanisms of crust formation: physical components. Pp. 55-72 en Sumner, M.E. y Stewart, B.A. (eds.) *Soil crusting: Physical and Chemical Processes*. Lewis, Boca Raton, Florida.
- Bresson, L.M. y Moran, C.J. 2003. Role of compaction versus aggregate disruption on slumping and shrinking of repacked hardsetting seedbeds. *Soil Sci.*, 168:585-594.
- Bullock, P., Newman, A.C.D. y Thomasson, A.J. 1985. Porosity aspects of the regeneration of soil structure after compaction. *Soil Till. Res.*, 5:325-341.
- Burke, W., Gabriels, D. y Bouma J. 1986. *Soil structure assessment*. 92 p. Rotterdam, A.A. Balkema.
- Buschiazzo, D.E., Panigatti, J.L. y Unger, P.W. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.*, 49:105–116.
- Calonego, J.C. y Rosolem C.A. 2010. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *Eur. J. Agron.*, 33:242-249.
- Caron, J., Kay, B.D. y Stone, J.A. 1992. Improvement of structural stability of a clay loam with drying. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1583-1590.

- Caviglia, O.P. y Andrade, F.H. 2010. Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *Am. J. Plant Sci. Biotech.*, 3:1-8.
- Chan, K.Y., Oates, A., Swan, A.D., Hayes, R.C., Dear, B.S. y Peoples, M.B. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Till. Res.*, 89: 13-21.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1479-1486.
- Connolly, R.D. 1998. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review. *Soil Till. Res.*, 48: 1-19.
- Cosentino, D.J. 2006. Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme. Tesis doctoral. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Francia.
- Cosentino, D.J. y Pecorari, C. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 20: 9-16.
- Cosentino, D.J., Chenu, C. y Le Bissonnais, Y. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.*, 38: 2053-2062.
- Dabney, S.M., Wilson, G.V., McGregor, K.C. y Foster, G.R. 2004. History, residue, and tillage effects on erosion of loessial soil. *Trans ASAE*, 47:767-775.
- Dardanelli, J., Severina, I. y Andriani, J. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: su rol en la optimización del riego suplementario. Actas 1° Seminario Internacional "Potencial del Riego extensivo en Cultivos y Pasturas", 17 y 18 de agosto. Paysandú, Uruguay.
- Darder, M.L., Sasal, M.C., Andriulo, A.E., Wilson, M.G. y Chagas, C.I. 2010. Coeficientes de enriquecimientos de fósforo, nitrógeno y carbono de sedimentos erosionados en diferentes secuencias de cultivos bajo siembra directa. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.
- De Battista JJ, Andriulo A, Ferrari M, Pecorari C. 1994. Evaluation of the soils structural condition under various tillage systems in the pampa húmeda (Argentina). Actas del 13 ISTRO Conference, Alborg, Denmark.
- De Battista, J.J., Pecorari, C. y Albrecht, R. 1997. Evaluación del estado estructural en suelos con agricultura continua en siembra directa. INTA, EEA Rafaela. Información Técnica N° 205, 12 pp.
- De la Vega, G., Castiglioni, M.G., Massobrio, M.J., Chagas, C.I., Santanatoglia, O.J. e Iruetia, C. 2004. Efectos de la cobertura y la humedad inicial en la infiltración de un Argiudol Vértico bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 22: 25-27.
- Denef, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, S.D., Elliott, E.T., Merckx, R. y Paustian, K. 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biol. Biochem.*, 33:1599-1611.
- Derpsch, R. 2005. The extent of Conservation Agriculture adoption worldwide: Implications and impact. Actas del III World Congress on Conservation Agriculture. 3 al 7 Octubre, Nairobi, Kenya.
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120: 201-214.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G.A. y 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 Till. Res.*, 65:1-18.

- Domzal, H., Glinski, J. y Lipiec, J. 1991. Soil compaction research in Poland. *Soil Till. Res.*, 19: 99-109.
- Drees, L.R., Karathanasis, A.D., Wilding, L.P. y Blevins, R.L. 1994. Micromorphological Characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:508-517.
- Ekboir, J. 2001. Sistemas de innovación y política tecnológica: siembra directa en el MERCOSUR. Pp. 1-18 en Díaz Rosello R. (ed.) *Siembra directa en el Cono Sur*. PROCISUR, Montevideo, Uruguay.
- Elrick, D.E., Reynolds, W.D. 1992. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:320-323.
- European Conservation Agriculture Federation. 1999. *Agricultura de conservación en Europa: aspectos medioambientales, económicos y administrativos de la UE*. Bruselas, Bélgica.
- Fernández-Quintanilla, C. 1997. Historia y evolución de los sistemas de laboreo. El laboreo de conservación. Pp. 1-12 en García Torres, L. y González Fernández, P. (eds.) *Agricultura de Conservación: Fundamentos agronómicos, medioambientales y económicos*. Asociación Española Laboreo de Conservación/Suelos Vivos.
- Ferrari, M. 2010. ¿Nuestros sistemas de producción agrícola son ambientalmente sustentables? *Informaciones Agronómicas*, 48:6-10.
- Ferreras, L.A., De Battista, J.J., Ausilio, A. y Pecorari, C. 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:161-170.
- Foy, N. 2003. Effet des systèmes de culture sur l'évolution de la structure d'un sol limoneux. Mémoire de fin d'études d'Ingénieur des Techniques Agricoles, Ecole Nationale d'Ingénieur des Travaux Agricoles de Bordeaux, INRA, 62 p.
- Frossard, E. 2007. El futuro de la ciencia del suelo: el papel de los suelos para la sociedad y el medio ambiente. *El Futuro de la Ciencia del Suelo*. Hartemink, A.E. (ed.). Wageningen, IUSS International Union of Soil Science. The Netherlands.
- Gerster, G. y Vidal, D. 1997. Efecto de los sistemas de labranza sobre la capa arable en el cultivo de maíz. Informe técnico 53. INTA, EEA Oliveros. 11p.
- Ghidey, F. y Alberts, E.E. 1998. Runoff and soil losses as affected by corn and soybean tillage systems. *J. Soil Water Conserv.*, 53: 64-70.
- Grant, C.D. y Dexter, A.R. 1990. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of moulded soil during rapid wetting. *Aust. J. Soil Res.*, 28:361-369.
- Griffith, D., Mannering, J. y Moldenhauer, W. 1977. Conservation tillage in the Eastern Corn Belt. *J. Soil Water Cons.*, 32:20-28.
- Guerif, J., De Leon Gonzales, F. y Stengel, P. 1994. Variability of internal structure of clods in relation to soil conditions prior compaction, effect on soil strength. Pp 543-548 en Jensen, H.E., Schjonning, P., Mikkelsen, S.A., Madsen, K.B. (Eds.), *Actas del 13th international ISTRO conference Soil Tillage for Crop Production and Protection of the Environment*, 24-29 July, Aalborg.
- Håkansson, I. y Reeder, R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load - extent, persistence and crop response. *Soil Till. Res.*, 29:277-304.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M. y Culot, J.Ph. 1992. Field-crop systems of the pampas. Pp. 413-450 en Pearson, C.J. (Ed.), *Field Crop Ecosystems. Ecosystems of the World*. Elsevier, Amsterdam.
- Hamblin, A.P. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. *Adv. Agr.*, 38:95-128.
- Hammel, J.E. 1994. Effect of high-axle load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest USA. *Soil Till. Res.*, 29:159-203.

- Hamza, M.A. y Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.*, 82:121-145
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. London Academic Press, Inc., London, 413 p.
- Hillel, D. 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press. USA. 494 p.
- Horn, R., Way, T. y 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.
- Hubbard, R.K., Lowrance, R.R. y Williams, R.G. 2001. Preferential flow in clayey Coastal Plain soil as affected by tillage. *ASAE*,:261-262
- Hussein, J. y Adey, M.A. 1998. Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a vertisol caused by wet/dry cycles. *Geoderma*, 85:63-82.
- Imhoff, S., Silva, A.P., Dias Junior, M. y Tormena, C.A. 2001. Quantifying critical pressures for plant growth. *Braz. J. Soil Sci.*, 25:11-18.
- InfoStat. 2004. *InfoStat versión 2004*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Íñiguez, AM., Scoppa C.O. 1970. Los minerales de arcilla en los suelos "zonales" ubicados en entre los ríos Paraná y Salado (Pcia de Buenos Aires). *RIA* 3:1-41
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina). 1972. *Carta de suelos de la República Argentina*. Hoja Pergamino (3360-32). 106p + anexos.
- Kay, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 12:1-52.
- Kay, B.D. y VandenBygaart, A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.*, 66: 107-118.
- King, D. 2007. *La investigación para el manejo sustentable del suelo*. El Futuro de la Ciencia del Suelo. Hartemink, A.E. (ed.). Wageningen, IUSS Intenational Union of Soil Science. The Netherlands.
- Klute, A. y Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. Pp. 687-734 en Klute (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 1. 2ª ed. Agron. Monogra. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Kohnke, H. 1968. *Soil physics*. McGraw-Hill, New York, USA. 224 p.
- Konopka, B., Pages L. y Doussan C. 2009. Soil compaction modifies morphological characteristics of seminal maize roots. *Plant Soil Environ.*, 55:1-10.
- Lal, R. y Vandoren, D.M.Jr. 1990. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. *Soil Till. Res.*, 16:71-84.
- Lapen, D.R., Topp, G.C., Gregorich, E.G. y Curnoe, W.E. 2004. Least Limiting Water Range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.*, 47: 425-437.
- Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.*, 48: 39-48.
- Le Bissonnais, Y., Duval, O. y Gaillard, H. 2002. *Mesure de la stabilité de sols pour l'évaluation de la sensibilité à la battance et à l'érosion*. Fiche de protocole. INRA Orléans, Unité de Science du Sol.

- Le Souder, C., Le Bissonnais, Y. y Robert, M. 1991. Influence of a mineral conditioner on the mechanisms of disaggregation and sealing of soil surface. *Soil Sci.*, 152:395-402.
- Leão, T.P., Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S.y Euclides, V.P.B. 2006. Least Limiting Water Range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Till. Res.*, 88:279-285.
- Ledesma, J.G. y Papparotti, O.F. 1990. Determinación de la erosionabilidad (K de la ecuación universal de pérdidas de suelo) con lluvia simulada para la serie Tezanos Pinto. Informe técnico de beca. INTA EEA Paraná.
- Léonard, J. y Andrieux, P. 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in southern France. *Catena*, 32:209-223.
- Léonard, J., Ancelin, O., Ludwig, B. y Richard, G. 2005. Analysis of the dynamics of soil infiltrability of agricultural soils from continuous rainfall-runoff measurements on small plots. *J. hydrol.*, 326:122-134.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. Pp. 277-294 en *Advances in Soil science. Volume I.* Edited by B.A. Stewart. Springer-Verlag New York, Inc.
- Lipiec, J., Hakansson, I., Tarkiewicz, S. y Kassowski, J. 1991. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Till. Res.*, 19: 307-317.
- Logsdon, S. y Jaynes, D.B. 1993. Methodology for determining Hydraulic Conductivity with Tension Infiltrimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57 :1426-1431.
- Manichon, H. 1987. Observation morphologique de l'état structural et mis en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. Pp. 39-52 en Monnier, G., Goss, H.J. (eds). *Soil compaction and regeneration.* Balkema. Rotterdam. The Netherlands
- Masle, J. y Passioura, J.B. 1987. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, 14:643-656.
- Materechera, S.A., Dexter, A.R. y Alston, A.M. 1991. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant Soil*, 135:31-34.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G. y Swift, M.J. 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*, 277: 504-508.
- Mc Kenzie, D.C. y Mc Bratney, A.C. 2001. Cotton root growth in a compacted Vertisol (Grey Vertosol). I. Prediction using strength measurements and 'limiting water ranges'. *Aust. J. Soil Res.*, 39:1157-1168.
- Micucci, F. G. y 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 Till. Res.*, 86:152-162.
- Miller, R.M. y Jastrow, J.D. 1992. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. Pp: 29-44 en Bethlenfalvay, J.G. y Linderman, R.G. (eds). *Micorrhizae in sustainable agriculture.* Special Publication N° 54. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Moll, L., Rocca, R. y Terzariol, R. 1988. Loess soils: engineering practice in Argentina”, *International Conference of Special Problems on Regional Soils*, Beijing, Intl. Academic Publ. pp. 283-289.
- Monnier, G., Stengel, P. y Fies, J.C. 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application a l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24:533-545.

- Morrás, H.J.M., Tonel, B. y Michelena, R. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. En Actas del XIX Congreso Arg. de la Ciencia del Suelo, Paraná.
- Nani, L.A. y Paparotti, O.F. 1993. Determinación de las pérdidas de suelo y agua en parcelas con diferentes cultivos, prácticas de manejo y longitud de pendiente. Informe Plan de trabajo 551010. INTA – EEA Paraná.
- Nelson, D.W. y Sommers, L.E. 1996. Total Carbon, Organic carbon and organic matter. Bartels managing (ed.) en *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods-SSA Book series n°5.*
- Neyde, F., Balarezo, G., da-Silva, A.P., Imhoff, S. y Dexter, A.R. 2003. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma*, 113: 95-108.
- Nortcliff, S. 2007. La ciencia del suelo en el siglo XXI. El Futuro de la Ciencia del Suelo. Hartemink, A.E. (ed.). Wageningen, IUSS International Union of Soil Science. The Netherlands.
- Novelli, L., Melchiori, R. y Caviglia, O. 2009. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de C y N en diferentes tamaños de agregados. *RCA*, 13:25-32.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. y Sombroek, W.G. 1991. World map of the status human-induced soil degradation. An Explanatory Note. Global Assessment of soil degradation (GLASOD). 2ed. Ed. ISRIC, UNEP. In cooperation with Winand Staring Center-ISSS-FAO-ITC.
- Orellana de, J.A., Pilatti, M.A. y Grenón, D.A. 1997. Soil quality: An approach to physical state assessment. *J. Sustain. Agr.*, 9:91-108.
- Oussible, M., Crookston, R.K. y Larson, W.E. 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.*, 84:34-38.
- Pagliai, M., LaMarca, M. y Lucamante, G. 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in vitiviculture under zero and conventional tillage. *J. Soil Sci.*, 34:391-403.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N. y 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.
- Pardini, G., Pini, R., Barbini, R., Regiiks, D., Plana, F. y Gallart, F. 1995. Laser elevation measurements of a smectite-rich mudrock following freeze-thawing and wet-drying cycles. *Soil Tec.*, 8:161-175.
- Pardini, G., Vigna Guidi, G., Pini, R., Regüés, D. y Gallart, F. 1996. Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles. *Catena*, 27:149-165.
- Passioura, J.B. 1991. Soil structure and plant growth. *Aust. J. Soil Res.* 29:717–728.
- Passioura, J.B. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant Cell Environ.*, 25:311–318.
- Peña D. 2002. Regresión y diseño de Experimentos. Alianza Editorial. 744 p.
- Pillai-Mc Garry, U.P.P., Collis-George, N., 1990. Laboratory simulation of the surface morphology of self-mulching and non self-mulching vertisols. II Quantification of visual features. *Aust. J. Soil Res.* 28,141-152.
- Pimentel, D., Houser, J., Preiss, E., White, O., Fang, H., Mesnick, L., Barsky, T. Tariche, S., Schreck, J. y Alpert, S. 1996. Water resources: agriculture, the environment, and society. *BioScience*.
- Place, G., Bowman, D., Burton, M. y Rufty T. 2008. Root penetration through a high bulk density soil layer: Differential response of a crop and weed species. *Plant Soil*, 307:179-190.

- Plan Mapa de Suelos. 1998. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos. Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 17, 114 p.
- Quiroga, A.R., Buschiazzo, D.E. y Peinemann N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Till. Res.*, 52: 21-28.
- Radford, B.J., Yule, D.F., McGarry, D. y Playford, C. 2001. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil Till. Res.* 61:157–166.
- Rebella, C.M. y Zeljkovich, L.T. 1980. Probabilidades de deficiencias y excesos hídricos en la región de Pergamino. Pp. 79-93 en Actas de la IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires.
- Redolfi, E.R. 1993. Comportamiento de Pilotes en Suelos Colapsables. Tesis Doctoral.
- Reichert, J.M., Akiyoshi Sanchez Suzuki, L.E., Reinert, D.J., Rainer, H. y 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.
- Reinert, D.J., Albuquerque, J.A., Reichert, J.M., Aita, C. y Andrada, M.M.C. 2008. Bulk density critical limits for normal root growth of cover crops. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 32:1805-1816.
- Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J. y Guérif, J. 1999. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil Till. Res.*, 51:151-160.
- Richmond, P. y Rillo, S. 2006. Evaluación de las pérdidas causadas por el atraso en la fecha de cosecha en soja en el Partido de 9 de Julio. Experimentación en campo de productores. Pp. 162 -166 en Resultados de experiencias campaña 2005-06. EEA INTA Pergamino. UEEA 9 de Julio, Buenos Aires.
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard, H., Coquet, Y., Défossez, P. y Manichon, H. 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil Till. Res.*, 79: 33–49.
- Rohošková, M. y Valla, M. 2004. Comparison of two methods for aggregate stability measurement – a review. *Plant Soil Environ.*, 50: 379-382.
- Rojas, A.E.C. y Conde, A.A. 1985. Estimación del factor “R” de la ecuación universal de pérdidas de suelo para el centro-este de la República Argentina. *Ciencia del Suelo*, 3: 85-94.
- Rojas, A.E.C. y Saluso, J.H. 1993. Probabilidades de ocurrencia del factor “R” de la ecuación universal de pérdidas de suelo. *Ciencia del Suelo*, 11: 42-45.
- Rosolem, C.A. y Takahashi, M. 1998. Soil compaction and soybean root growth. Pp. 295-304 en Box, J.E. (Ed.). *Root demographics and their efficiencies in sustainable agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems*. Actas del 5th symposium of the international society of root research, Clemson, South Carolina, USA.
- Sadras, V.C., O’Leary, G.J. y Roget, D.K. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crop Res.*, 91:131-148.
- Saidi, D., Douaoui, A., Le Bissonnais, Y. y Walter, C. 1999. Sensibilité de la surface des sols des plaines du Chélif a la dégradation structurale. *Étude et Gestion des Sols* 6: 15-25.
- Salvagiotti, F., Cassman, K.G., Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A. y Dobermann, A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review. *Field Crops Res* 108:1–13.
- Samouelian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A. y Bruand, A. 2003. Electrical Resistivity Imaging for Detecting Soil Cracking at the Centimetric Scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1319–1326.

- Sarmah, A.K., Pillai-McGarry, U. y McGarry, D. 1996. Repair of the structure of a compacted Vertisol via wet/dry cycles. *Soil Till. Res.*, 38:17-33.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT User's guide, Version 6. 4th edition. Vol 2. Cary, NC: SAS Institute Inc. 846p.
- Sasal, M.C. 2004. Cualidades del sistema poroso que condicionan la dinámica del agua bajo Siembra Directa continua en Argiudoles de la Pampa Ondulada. Evaluación de la introducción de nabo forrajero en la rotación agrícola para recuperar horizontes degradados por compactación. Tesis de Magister en Ciencia del Suelo. UBA.
- Sasal, M.C. y Andriulo, A.E. 2003. Comparación de dos métodos para determinar la distribución de la porosidad edáfica en dos sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*, 21:74-77.
- Sasal, M.C., Andriulo, A.E. y Taboada, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in argentinian pampas. *Soil Till. Res.*, 87:9-18.
- Sasal, M.C., Castiglioni, M.G. y Wilson, M.G. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.*, 108:24-29.
- Satorre, E.H. 2005. Cambios Tecnológicos en la Agricultura Actual. *Ciencia Hoy*, 15: 24-31.
- Senigagliesi, C. y Ferrari, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. Pp. 27-35 en Buxton, D.R., Shibles, R., Forsberg, R.A., Blad, B.L., Asay, K.H., Paulsen, G.M., Wilson, R.F., (eds.). *International crops science I*. Madison, Wis., Crop Science Society of America, Inc.
- Shipitalo, M.J. y Protz, R. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.*, 67: 445-456.
- Silva, A.P. y Kay, B.D. 1997. Estimating the Least Limiting Water Range of soils properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883.
- Silva, A.P., Kay, B.D. y Perfect, E. 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781.
- Soane, B.D. y Van Ouwerkerk, C. 1995. Implications of soil compaction in crop production for quality of the environment. *Soil Till. Res.*, 35:5-22.
- Soane, B.D., Dikson, J.W. y Campble, D.J. 1982. Compaction by Agricultural Vehicle: A Review. III. Incidence and Control of Compaction in Crop Production. *Soil Till. Res.*, 2:30-36.
- Soane, J. R., Coté, M. y Visser, S. A. 1982. The relationship between voluntary intake and the physical properties of forages. *Can. J. Anim. Sci.*, 62:473-480.
- Soracco, C.G., Lozano, L.A., Sarli, G.O., Gelati, P.R. y Filgueira, R.R. 2010. Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Till. Res.*, 109:18-22.
- Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30: 27-51.
- Stengel, P. 1988. Análisis de la porosidad en horizontes de un suelo Brunizem en distintas condiciones de manejo y su relación con el crecimiento de las raíces del maíz. Pergamino. EEA. Informe Técnico N° 211.
- Stengel, P. y Bourlet, M. 1987. Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage: effet de l'humectation. Pp. 95-110 en Monnier, G. y Goss, M.J. (eds) *Soil compaction and Regeneration*, Balkema, Rotterdam, Boston.
- Stengel, P., Douglas, J.T., Guerif, J., Goss, M.J., Monnier, G. y Cannel, R.Q. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil Till. Res.*, 4: 35-53.

- Studdert, G.A. y Echeverría, H.E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1496-1503.
- Taboada, M.A., Barbosa, O.A. y Cosentino, D.J. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils. *Soil Sci.*, 173:130-142.
- Taboada, M.A., Barbosa, O.A., Rodriguez, M.B. y Cosentino, D.J. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma*, 123:233–244.
- Taboada, M.A., Folcia, A.M., Rodriguez, M.B., Cosentino, D.J. y Godeas, A.M. 2000. Relación entre porosidad y biota en suelos pampeanos no cultivados. *Actas XVII Congreso argentino de la Ciencia del Suelo*, Mar del Plata, 11-14 de abril.
- Taboada, M.A., Micucci, F.G., Cosentino, D.J. y Lavado, R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.*, 49:57-63.
- Taboada-Castro, M.M., Le Bissonnais, Y. y Duval, O. 2004. Aggregate breakdown mechanism by water in tillage horizons in NW Spain. *Actas del 13th International Soil Conservation Organisation Conferences*. Brisbane.
- Tebrugge, F. y During, R.A. 1999. Reducing tillage intensity –a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Till. Res.*, 53:15-28.
- Tisdall, J.M. 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Austr. J. Soil Res.*, 29:729-743.
- Tisdall, J.M. 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil*, 159:115-121.
- Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X.B., Botta, G.F., Tourn, M., Linares, P., Ressa M. y Balbuena, R. 2011. Traffic effect on soil compaction and yields of wheat in Spain. *Span. J. Agric. Res.*, 9:395-403.
- Topp, G.C., Wires, K.C., Angers, D.A., Carter, M.R., Culley, J.L.B., Holmstrom, D.A., Kay, B.D., Lafond, G.P., Langille, D.R., McBride, R.A., Patterson, G.T., Perfect, E., Rasiah, V., Rodd, A.V. y Webb, K.T. 2002. Changes in Soil Structure. <http://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/html>
- Tormena, C.A., Silva, A.P. y Libardi, P.L. 1998. Characterization of the Least Limiting Water Range of an Oxisol under no-tillage. *Braz. J. Soil Sci.*, 22:573-581.
- Tormena, C.A., Silva, A.P., Libardi, P.L., 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the Least Limiting Water Range approach. *Soil Till. Res.*, 52:223-232.
- Tullberg, J.N. 1990. Why control field traffic. Pp: 13–25 en Hunter, M.N., Paull, C.J. y Smith, G.D., (eds). *Proceedings of Queensland Department of Primary Industries Soil Compaction Workshop*. Toowoomba, Australia.
- Universidad Politécnica de Madrid. España.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D. y Miller, J.J. 1999. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loams soils of southern Ontario. *Soil Till. Res.*, 51:139-149.
- Venanzi, S., Vallati, A. y Kruger, H. 2002. Crecimiento temprano del trigo en función de la densidad aparente del suelo. *Actas del XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Puerto Madryn, Argentina.
- Vitousek, P.M., Money, H.A., Lubchenco, J. y Melillo, J.M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494–499.
- Vocanson, A., Roger-Estrade, J., Boizard, H., Jeuffroy, M-H. 2006. Effects of soil structure on pea (*Pisum sativum* L.) root development according to sowing date and cultivar. *Plant Soil*, 281:121-135.

- Voorhees, W.B. 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:129–133.
- Voorhees, W.B. y 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.
- Walker, B.H. y Salt, D. 2006. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Island Press, Washington, D.C., USA. 174p.
- Weir, E. 2002. Pérdida de suelo y agua en parcelas de escurrimiento. Actas del 2º taller de contaminación por agroquímicos. 23 de Agosto. AIANBA. Pergamino. Bs. As.
- White, I. y Sully, M.J. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.*, 23:1514-1522.
- White, I., Sully, M.J. y Perroux, K.M. 1992. Measurement of surface-soil hydraulic properties: disk permeameters, tension infiltrometers, and other techniques. En Topp, G.C., Reynolds, W. y Green, R.D. (eds.) *Advances in measurement in soil physical properties bringing theory into practice*. SSSA Special Publication N° 30.
- Wilson, M.G. y Cerana, J.A. 2004. Mediciones físicas en suelos con características vérticas. *RCA*, 8:11-22.
- Wilson, M.G., Paparotti, O., Paz Gonzalez, A. y Díaz Ucha E. 2006. Ecuaciones de ajuste entre la Resistencia Mecánica a la Penetración y el contenido hídrico en un lote en siembra directa. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta y Jujuy, Argentina.
- Wischmeier W H. 1966. Surface runoff in relation to physical and management factors. Pp: 237-244 en *Proc. First Pan Am. Soil Conserv. Congress*. Sao Paulo, Brazil.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. *Agricultural handbook 537*. United States Department of Agriculture. Washington. D.C.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.*, 4:1259-1273.
- Wright, S.F. y Upadhyaya, A. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.*, 161:575-586.
- Wright, S.F. y Upadhyaya, A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*, 198:97-107.
- Wright, S.F., Franckee-Snyder, M., Morton, J.B. y Upadhyaya, A. 1996. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant Soil*, 181:193-203.
- Wu, L., Feng, G., Letey, J., Ferguson, L., Mitchell, J., McCullough-Sanden, B., Markegard, G. 2003. Soil management effects on the non-limiting water range. *Geoderma*, 114:401-414.
- Yasuda, H., Berndtsson, R., Persson, H., Bahri, A. y Takuma, K. 2001. Characterizing preferential transport during flood irrigation of a heavy clay soil using the dye Vitasyn Blau. *Geoderma*, 100:49–66.
- Zadocks, J.C., Chang, T.T. y Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.*, 14: 415-421.