

Estructura de suelos manejados en siembra directa: efectos sobre la extracción y conversión de agua en el cultivo de soja (*Glycine max L. Merrill*).

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

Guillermo Ezequiel Peralta
Ing. Agrónomo – UBA - 2008

Lugar de trabajo: Instituto de Suelos – CIRN INTA Castelar



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



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Miguel Angel Taboada

Ingeniero Agrónomo (FAUBA)

Docteur Fonctionnement Ecosystèmes et Agrosystèmes (Institut National Polytechnique de Toulouse; Francia)

Co-director

Adriana Graciela Kantolic

Ingeniera Agrónoma (FAUBA)

Doctora en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Consejero de Estudios

Gerardo Rubio

Ingeniero Agrónomo (FAUBA)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Post-doctorado: Laboratory of Plant Nutrition (Penn State University)

JURADOS DE TESIS

María Carolina Sasal

Ingeniera Agrónoma (UNR)

Magister en Ciencias del Suelo (FAUBA)

Doctora en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Alberto Raúl Quiroga

Ingeniero Agrónomo (UNLPam)

Magíster en Ciencias Agrarias (UNSur)

Doctor en Agronomía (UNSur)

Martín Díaz Zorita

Ingeniero Agrónomo (UNLPam)

Magíster en Ciencias Agrarias (UNSur)

Doctor of Philosophy (University of Kentucky)

Fecha de defensa de la tesis: 17 de noviembre de 2020

1

2

Dedicatoria

3

A Roubi, por apoyarme en la que sea, siempre, a Vicente y a Aureliano, la nueva

4

incorporación, y a mis viejos.

5

1

Agradecimientos

2 A mi tío Rody, por contagiarme su pasión por la profesión, desde chiquito y seguir
3 enseñándome, siempre. A mi amigo y director Miguel, por el tiempo, soluciones, buena
4 onda, y libertad para trabajar. Un placer trabajar así. A Adri, por segunda vez, por el
5 tiempo, apoyo constante e ideas, sobre todo al final de la recta, cuando más difícil se hizo
6 encontrar tiempo y energía. Pero por sobre todo por haberme insistido para hacer el
7 doctorado cuando ni lo tenía en los planes. A Gerardo, por el tiempo, por las ideas, por
8 insistirme y ponerse al hombro las publicaciones, y facilitarme directamente o
9 indirectamente instrumental, laboratorio, o contactarme con quien podía darme una mano.
10 Los tres miembros del equipo, un lujo...A los jurados, Carolina, Alberto y Martín, por el
11 tiempo dedicado para leer la tesis, y por los valiosísimos aportes y sugerencias para
12 mejorar el trabajo. En serio, muchas gracias. Costó, llevó tiempo, pero definitivamente
13 valió la pena. A los asesores y productores/dueños de los establecimientos El Tala, San
14 Nicolás, La Matilde, Las Matreras, El Saladillo, El Pilar, La Oración, San Andrés, Marito,
15 San Patricio, La Fe, L.L., La Federala, (y a los que seguramente me esté olvidando) por
16 facilitar los sitios y financiar parcial o totalmente los muestreos en sus campos. A Belu y
17 a al programa Chacras de AAPRESID, por facilitarme sitios de muestreo y la información
18 necesaria siempre que les pedí. A Gonzalo, Marcelo, Lalo, y Federico por facilitarme
19 escenarios, medios, información y algunos sitios de ensayo. A Emiliano, Romina y
20 Natalia del Instituto de suelos del INTA, por los muestreos en Areco y generar la guía, y
21 a Juan y Jorge por darme una mano con los ensayos en el invernáculo. A María y Karina
22 del INBA, por darme una mano enorme para aprender a usar el WinRhizo y con los
23 muestreos de nódulos. A CONICET, por financiar la beca y permitirme hacer el proyecto.
24 A mis amigos. Y especialmente a la EPG por la calidad humana y profesional en todo el
25 proceso. ¡A todos muchísimas gracias!

26

1 **Declaración**

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

6

1

Publicaciones derivadas de esta tesis

2

Peralta, G. E., Taboada, M. A., Kantolic, A., Rubio, G. 2020. Topsoil Hardening: Effects on Soybean Root Architecture and Water Extraction Patterns. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-13.

5

6

Peralta, G. E., Coyos, T., Madias, A., Ventroni, L., Gil, R. 2017. La Siembra Directa y la Gestión del Agua. En: Waldman, S. (Ed). *Inundación y Manejo de Cuencas. Clima, Suelo, Prácticas Agrícolas y Medio Ambiente*. Orientación Gráfica Editora-CADIA, CABA. 352pp. ISBN 978-987-1922-22-2.

7

8

9

10

11

ÍNDICE GENERAL

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33

Contenido

Capítulo 1. Introducción General	2
1.1. Introducción	2
1.1.1. La siembra directa y su expansión.....	2
1.1.2. La siembra directa y la estructura del suelo	3
1.1.3. Alteraciones de la estructura en SD: la compactación de suelos.....	4
1.1.4. La compactación en SD y sus efectos sobre el cultivo de soja	8
1.1.5. Los mecanismos de acción de la compactación de suelos	9
1.1.6. Alternativas frente a la compactación de suelos en SD.....	11
1.2. Objetivos Generales.....	13
1.3. Hipótesis generales de trabajo	13
1.4. Estructura de la tesis	13
2. Capítulo 2. Estado de la estructura de suelos en siembra directa de acuerdo con la historia agrícola.	17
2.1. Introducción	17
2.2 Materiales y métodos.....	23
2.3. Resultados.....	30
2.4. Discusión	49
2.5. Conclusiones	59
3. Capítulo 3. Compactación de suelos en siembra directa: crecimiento y funcionalidad del sistema radical de soja. Resultados de experimentos en columnas de suelo	61
3.1. Introducción.....	61
3.2. Materiales y métodos.....	66
3.3. Resultados	79
3.4. Discusión.....	103
3.5. Conclusiones.....	116
4. Capítulo 4. Compactación de suelos en siembra directa: distribución y actividad de nódulos de soja.	118
4.1. Introducción.....	118
4.2. Materiales y métodos.....	122

1	4.3. Resultados	125
2	4.4. Discusión.....	138
3	4.5. Conclusiones.....	146
4	5. Capítulo 5. Descompactación mecánica de suelos en siembra directa: efectos	
5	sobre las propiedades físicas.....	148
6	5.1. Introducción.....	148
7	5.2. Materiales y métodos.....	152
8	5.3. Resultados	159
9	5.4. Discusión.....	173
10	5.5. Conclusiones.....	183
11	6. Capítulo 6. Descompactación mecánica de suelos en siembra directa: efectos	
12	sobre los rendimientos y la captura y conversión de recursos en soja. Resultados	
13	de ensayos de campo.....	187
14	6.1. Introducción.....	187
15	6.2. Materiales y métodos.....	193
16	6.3. Resultados	204
17	6.4. Discusión.....	222
18	6.4. Conclusiones.....	236
19	7. Capítulo 7. Discusión y Conclusiones Generales	239
20	7.1. Esquema racional de la Tesis	239
21	7.2. Contraste de hipótesis y análisis integral	241
22	7.2.1. Diagnóstico del problema	241
23	7.2.2. Efectos de la compactación sobre el cultivo de soja	243
24	7.2.3. Alternativas de reversión: descompactación mecánica	246
25	7.3. Integración: Modelo general de la compactación.....	253
26	7.4. Principales contribuciones y aportes originales de esta tesis	257
27	7.5. Implicancias agronómicas	261
28	7.6. Futuras líneas de trabajo	264
29	7.7. Consideraciones finales	266
30	8. Bibliografía.....	267
31		
32		

1

ÍNDICE DE CUADROS

2	Cuadro 2.1 Tratamientos, situaciones y estaciones de muestreo incluidas en el análisis regional.....	25
3		
4	Cuadro 2.2 Coeficientes de correlación entre el índice de intensificación de la rotación, los aportes de carbono, e indicadores físicos en las situaciones muestreadas.....	44
5		
6		
7	Cuadro 2.3 Coeficientes de correlación entre los distintos indicadores físicos relevados.....	46
8		
9	Cuadro 3.1 Resistencia a la penetración a capacidad de campo y a 50% de agua útil; densidad aparente; infiltración de agua; macroporosidad; y espesor ponderado de estructuras laminares; y estructura por prueba de estallido, para suelos compactados y no compactados utilizados para los experimentos controlados.....	79
10		
11		
12		
13	Cuadro 3.2 Longitud total, superficie total, longitud específica y superficie específica de raíces, a nivel de planta entera, en soja creciendo en suelos en condiciones compactadas o no compactadas, sobre suelos con 100% o 50% de humedad superficial, o sobre subsuelos franco-arenosos o arcillosos, en los experimentos 1 y 2.....	87
14		
15		
16		
17	Cuadro 3.3 Valores estimados para los parámetros de los modelos sigmoideo y bi-lineal, para la profundización aparente de raíces, según la humedad superficial y la condición de compactación superficial en el experimento 1; o según la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo en el experimento 2.....	94
18		
19		
20		
21	Cuadro 3.4 Consumo de agua en las etapas de siembra-fijación de vainas, fijación de vainas-llenado, y llenado de grano a madurez, de acuerdo a la humedad superficial y la condición de compactación superficial en el experimento 1.....	97
22		
23		
24	Cuadro 3.5 Consumo de agua en las etapas de siembra-fijación de vainas, fijación de vainas-llenado, y llenado de grano a madurez, según la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo en el experimento 2.....	100
25		
26		
27	Cuadro 4.1 Coeficientes de correlación de Pearson entre la biomasa de plantas individuales (aérea total, grano, aérea vegetativa, raíces) y la masa total de nódulos por planta, número de nódulos por planta; diámetro promedio de nódulos y peso promedio de nódulos individuales; en experimentos 3 y 4	136
28		
29		
30		
31	Cuadro 5.1 Propiedades químicas iniciales del horizonte superficial (0-0,2 m), para sitios de monocultura de soja y rotados de cada experimento: carbono orgánico total, pH, nitrógeno total, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico	160
32		
33		
34	Cuadro 5.2 Características estructurales iniciales del horizonte superficial (0-0,2 m), para sitios de monocultura de soja y rotados de cada experimento: Frecuencia de aparición de Estructuras laminares y masivas; espesor promedio y máximos de las estructuras laminares; diámetro promedio y máximo de las estructuras masivas.	160
35		
36		
37		
38	Cuadro 5.3 Cobertura de rastrojo y contenido de nitrógeno como nitratos de 0-0,6 m, a la siembra de soja, para los tratamientos testigo y descompactado con para-till, para sitios de monocultura de soja y rotados de cada experimento	161
39		
40		
41	Cuadro 5.4. Densidad aparente, porosidad de aireación e infiltración, muestreados en el estrato superficial (0-0,1 m) y subsuperficial (0,1-0,2 m) del suelo, para los tratamientos	
42		

1	testigo y descompactado con para-till, en sitios con historia agrícola contrastante: sitios	
2	de monocultura de soja (SJ) y sitios rotados (ROT); en el año 1 y año 2.....	164
3	Cuadro 5.5 Correlación entre los niveles de resistencia a la penetración, densidad	
4	aparente e infiltración en los tratamientos testigo; y en los cambios en estos indicadores	
5	(Δ testigo - descompactados), y los parámetros de suelo, clima e historia agrícola, de todos	
6	los ensayos incluidos en el meta-análisis.....	170
7	Cuadro 6.1. Contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez	
8	permanente (PMP), cada 0,2 m de profundidad. Promedio de todos los sitios y	
9	experimentos.....	196
10	Cuadro 6.2 Correlación entre la respuesta al rendimiento de soja y: la resistencia a la	
11	penetración, densidad aparente e infiltración en los tratamientos testigo, en los cambios	
12	en estos indicadores, y los parámetros de suelo (arena, arcilla y materia orgánica), clima	
13	(precipitación promedio anual, temperatura promedio anual, de la localidad del ensayo);	
14	e historia agrícola (años en SD, % soja en la rotación, índice de intensidad de cultivos) ,	
15	de todos los ensayos incluidos en el meta-análisis.....	205
16	Cuadro 6.3. Temperatura media diaria, precipitaciones acumulada, radiación global	
17	incidente diaria, déficit de presión de vapor diario y evapotranspiración de referencia	
18	diaria, promedios para las etapas de siembra – fijación de vainas (S-R3), fijación de	
19	vainas-llenado de grano (R3-R6), y llenado de grano-madurez fisiológica (R6-R8);	
20	durante los experimentos de los años 1 y 2.....	206
21	Cuadro 6.4. Número de plantas a cosecha, Biomasa aérea total, Biomasa aérea	
22	vegetativa, rendimiento en grano, e índice de cosecha, para el tratamiento testigo y el	
23	tratamiento descompactado, en sitios de monocultura de soja y rotados, de los	
24	experimentos de descompactación del año 1 y 2.....	207
25	Cuadro 6.5 Valores estimados para los parámetros del modelo sigmoideo de	
26	profundización aparente de raíces y del modelo bilineal, para los tratamientos testigo y	
27	descompactado con para-till en los experimentos del año 1, en sitios de monocultura de	
28	soja y rotados.....	209
29	Cuadro 6.6 Oferta total de agua en el ciclo precipitaciones y agua útil inicial ($PP + Ai$);	
30	evapotranspiración real (ETr); eficiencia de captura ($ETr/PP+Ai$); eficiencia de uso del	
31	agua evapotranspirada ($EUA=B/ETr$); Productividad del agua total ofertada en biomasa	
32	aérea ($PA_B ; B/(PP+Ai)$) o grano ($PA_Y ; Y/(PP+Ai)$); en los experimentos del año 1 y 2,	
33	para los tratamientos testigo y descompactado con paratill, en sitios de monocultura de	
34	soja y rotados.....	214
35	Cuadro 6.7 Oferta total de radiación en el ciclo (Rs), Radiación interceptada (R_{int});	
36	eficiencia de captura o intercepción de radiación (R_{int}/Rs); eficiencia de uso de la	
37	radiación ($EUR=B/R_{int}$); Productividad de la radiación en biomasa aérea ($PR_B ; B/Rs$) o	
38	grano ($PR_Y ; Y/Rs$); en los experimentos del año 1 y 2, para los tratamientos testigo y	
39	descompactado con paratill, en sitios de monocultura de soja y rotados.....	219
40	Cuadro A.1 Experimentos analizados para el meta-análisis del Capítulo 3.....	Anexo,1
41		
42		

1

ÍNDICE DE FIGURAS

2	Figura 2.1 Ubicación de lotes de producción, ensayos de macro-parcelas y condiciones	
3	cuasi prístinas muestreados.....	24
4	Figura 2.2 (A) Relación entre los aportes anuales de carbono promedio y la intensidad	
5	de ocupación del suelo para diferentes secuencias. (B) Aportes de carbono total, de	
6	biomasa aérea o de raíces; para rotaciones de distinta intensidad.....	31
7	Figura 2.3 (A) Contenido de carbono orgánico del suelo superficial, (B) carbono	
8	orgánico subsuperficial, y (C) relación de estratificación del carbono orgánico para	
9	rotaciones de distinta intensidad	32
10	Figura 2.4 (A) Relación entre el carbono orgánico total superficial y el carbono orgánico	
11	particulado superficial; (B) Contenido de carbono orgánico particulado para rotaciones	
12	de distinta intensidad.....	33
13	Figura 2.5 Fragmentación en bloques de distinto tamaño a través del método de la prueba	
14	de estallido modificado	34
15	Figura 2.6 (A) Proporción de bloques diámetro menor a 0,05 m; (B) de bloques de	
16	diámetro > a 0,1 m; y (C) de estructuras laminares (expresado como espesor ponderado);	
17	para rotaciones de distinta intensidad	35
18	Figura 2.7 Presencia de estructuras laminares en los primeros 0,2 m, ordenadas de	
19	acuerdo a su desarrollo creciente.....	36
20	Figura 2.8 Densidad aparente, resistencia a la penetración promedio y máxima en	
21	capacidad de campo, porosidad de aireación e infiltración básica, en el estrato superficial,	
22	subsuperficial, y su relación de estratificación, para rotaciones de distinta intensidad....	39
23	Figura 2.9 Relación entre la densidad aparente del suelo y: la resistencia a la penetración;	
24	la porosidad de aireación; y la infiltración; para estratos superficiales y subsuperficiales	
25	para rotaciones de distinta intensidad	41
26	Figura 2.10 Relación entre la densidad aparente del suelo y la resistencia a la penetración;	
27	la porosidad de aireación; y la infiltración; de acuerdo a la profundidad de muestreo, o de	
28	acuerdo a la historia agrícola	49
29	Figura 3.1 Esquema de tratamientos de los dos experimentos en invernáculo.....	71
30	Figura 3.2 Representación esquemática de la evolución del contenido de agua útil,	
31	ajustada según una función <i>plateau-decaimiento exponencial</i> , para dos tratamientos de	
32	ejemplo.....	74
33	Figura 3.3 Representación esquemática de los parámetros de los modelos sigmoideos y	
34	bi-lineales para la profundidad aparente de raíces en el tiempo, para dos tratamientos de	
35	ejemplo.....	76
36	Figura 3.4 Temperatura media diaria, radiación solar incidente diaria, y déficit de presión	
37	de vapor a las 12 hs; a partir de la siembra, para los experimentos 1 (2014-15) y 2 (2015-	
38	16).....	80
39	Figura 3.5 Índice de estrés hídrico por temperatura foliar y déficit de presión de vapor al	
40	momento de la medición, a lo largo del ciclo, según la humedad superficial y la condición	

1	de compactación superficial en el experimento 1; y según la condición de compactación	
2	y el tipo de subsuelo en el experimento 2.....	82
3	Figura 3.6 Biomasa aérea total, rendimiento en grano; biomasa de raíz en plantas de soja,	
4	según la humedad superficial y la condición de compactación superficial en el	
5	experimento 1; y según la condición de compactación y el tipo de subsuelo en el	
6	experimento 2.....	84
7	Figura 3.7 Índice de cosecha; relación raíz: tallo; raíz: grano en plantas de soja, según la	
8	humedad superficial y la condición de compactación superficial en el experimento 1; y	
9	según la condición de compactación y el tipo de subsuelo en el experimento 2.....	85
10	Figura 3.8 Perfil de distribución en profundidad de la densidad de longitud de raíces en	
11	R7 para plantas de soja, según la humedad superficial y la condición de compactación	
12	superficial en el experimento 1; y según la condición de compactación y el tipo de	
13	subsuelo en el experimento 2.....	89
14	Figura 3.9 Imágenes digitales del sistema de raíces de soja creciendo en suelos	
15	compactados y no compactados superficialmente, provenientes de cosechas en subsuelos	
16	francos arenosos del experimento 1 ó del experimento 2.....	90
17	Figura 3.10 Evolución de la profundidad aparente de profundización de raíces para	
18	plantas de soja, según la humedad superficial y la condición de compactación superficial	
19	en el experimento 1; y según la condición de compactación y el tipo de subsuelo en el	
20	experimento 2.....	93
21	Figura 3.11 Tasas de absorción de agua a diferentes profundidades, durante siembra-	
22	floración, fijación de vainas-llenado de granos, y llenado de grano-madurez; para plantas	
23	de soja, según la humedad superficial y la condición de compactación superficial en el	
24	experimento 1.....	95
25	Figura 3.12 Tasas de absorción de agua a diferentes profundidades, durante siembra-	
26	floración, fijación de vainas-llenado de granos, y llenado de grano-madurez; para plantas	
27	de soja, según la condición de compactación y el tipo de subsuelo en el experimento	
28	2.....	99
29	Figura 3.13 Tasas de absorción específica promedio de planta, según la humedad	
30	superficial y la condición de compactación superficial en el experimento 1; y según la	
31	condición de compactación y el tipo de subsuelo en el experimento 2.....	101
32	Figura 3.14 (A) Relación entre la tasa específica de absorción de agua en el período de	
33	llenado de granos y la densidad de longitud de raíces, observadas en diferentes estratos	
34	de 20 cm. (B) Relación entre la tasa de extracción de agua del suelo en el período de	
35	llenado de granos y la densidad de longitud de raíces, según la humedad superficial y la	
36	condición de compactación superficial en el experimento 1; y según la condición de	
37	compactación y el tipo de subsuelo en el experimento 2.....	102
38	Figura 3.15 Poros y canales al momento de la extracción de monolitos en el experimento	
39	1 y en el experimento 2.....	106
40	Figura 4.1 (A) Número total de nódulos y (B) masa seca total de nódulos, según la	
41	humedad superficial y la condición de compactación superficial en el experimento 1; y	
42	según la condición de compactación y el tipo de subsuelo en el experimento 2.....	127

1	Figura 4.2 Perfil de distribución en profundidad del número de nódulos a R7 para plantas	
2	de soja según la humedad superficial y la condición de compactación superficial en el	
3	experimento 1; y según la condición de compactación y el tipo de subsuelo en el	
4	experimento 2.....	129
5	Figura 4.3 Perfil de distribución en profundidad de la masa de nódulos a R7 para plantas	
6	de soja, según la humedad superficial y la condición de compactación superficial en el	
7	experimento 1; y según la condición de compactación y el tipo de subsuelo en el	
8	experimento 2.....	130
9	Figura 4.4 (A) Distribución del tamaño de nódulos a R7 y (B) diámetro promedio de	
10	nódulos en distintos momentos fenológicos (R2 = floración; R5= inicio de llenado de	
11	grano, y R7 = inicio de madurez fisiológica), según la condición de compactación	
12	superficial en el experimento 3.....	141
13	Figura 4.5 Perfil de distribución en profundidad del peso fresco de los nódulos de mayor	
14	tamaño a floración e inicio de llenado de granos, según la condición de compactación	
15	superficial del experimento 3.....	132
16	Figura 4.6 Perfil de concentración de leghemoglobina en profundidad, según la	
17	condición de compactación superficial del experimento 3.....	133
18	Figura 4.7 (A) Contenido total de leghemoglobina por nódulo en función a su tamaño;	
19	y (B) contenido específico de leghemoglobina en los nódulos en función a su tamaño;	
20	según la condición de compactación superficial del experimento 3.....	134
21	Figura 4.8 Contenido total de leghemoglobina por planta en distintos momentos	
22	fenológicos (R2 = floración; R5= inicio de llenado de grano), según la condición de	
23	compactación superficial del experimento 3.....	135
24	Figura 4.9. Relaciones entre la masa total de nódulos por planta y (a) la biomasa aérea	
25	total, (b) rendimiento y (c) biomasa radical por planta, en términos relativos.....	137
26	Figura 5.1 Localización de los sitios de los 32 ensayos incluidos en el meta-análisis de	
27	descompactación de la región pampeana.....	158
28	Figura 5.2 Perfil de resistencia a la penetración cada 0,05 m hasta los 0,3 m, en los	
29	experimentos de campo de esta tesis, para los tratamientos testigo y descompactado con	
30	para-till, en sitios con historia agrícola contrastante: sitios de monocultura de soja y sitios	
31	rotados.....	162
32	Figura 5.3 Frecuencias acumuladas en los valores observados de infiltración (0-10 y 10-	
33	20 cm) en experimentos del año 1 y del año 2, para los tratamientos testigo y	
34	descompactado con para-till, en sitios con historia agrícola contrastante: monocultura de	
35	soja y sitios rotados.....	165
36	Figura 5.4 Perfil de resistencia a la penetración (cada 0,025 m hasta 0,45 m de	
37	profundidad), en tratamientos T0 sin descompactar y descompactados mecánicamente.	
38	Datos extraídos de 32 trabajos publicados para la región pampeana.....	166
39	Figura 5.5 (A): Meta-análisis: Relación entre la resistencia a la penetración (promedio	
40	0-0,2 m) en los T0 sin descompactar y en los tratamientos descompactados	
41	mecánicamente. (B): Cambio en la resistencia a la penetración (Descompactados – T0)	
42	en relación al nivel de resistencia a la penetración del T0.....	167

1	Figura 5.6 (A): Meta-análisis: Relación entre la densidad aparente (promedio 0-0,2 m)	
2	en los T0 sin descompactar y en los tratamientos descompactados mecánicamente. (B):	
3	Cambio en la densidad aparente (Descompactados – T0) en relación al nivel de densidad	
4	aparente del T0.....	168
5	Figura 5.7 (A): Meta-análisis: Relación entre infiltración superficial de agua en los T0	
6	sin descompactar y en los tratamientos descompactados mecánicamente. (B): Cambio en	
7	la infiltración (Descompactados – T0) en relación al nivel de infiltración del	
8	T0.....	169
9	Figura 5.8 Perfiles de resistencia a la penetración hasta los 0,3 m, al mes (Inicio), a los	
10	12 meses y a los 24 meses de la descompactación, para los tratamientos testigo y	
11	descompactado con para-till, en sitios de monocultura de soja y rotados.....	171
12	Figura 5.9 Meta-análisis y ensayos propios: Evolución temporal de la resistencia a la	
13	penetración de suelos descompactados respecto a los valores observados en los T0 sin	
14	descompactar.....	173
15	Figura 5.10 (A): Fragmentos luego de la descompactación mecánica con para-till, en los	
16	primeros 20 cm de suelo. (B): Infiltración de agua por grietas y fisuras generadas en	
17	tratamientos descompactados con para-till.....	179
18	Figura 6.1 Cobertura del entresurco de soja por método digital de Purcell (2000). Imagen	
19	original y filtrada.....	200
20	Figura 6.2 (A): Relación entre el rendimiento de soja en los T0 sin descompactar y en	
21	los tratamientos descompactados. Datos extraídos de 32 trabajos publicados para la región	
22	pampeana. (B): Cambio en rendimiento (Descompactados – T0) en relación al nivel de	
23	rendimiento del T0.....	204
24	Figura 6.3 Evolución de la profundidad aparente de enraizamiento (profundidad del	
25	frente de extracción de agua) observada en los experimentos del año 1, y ajustada a través	
26	de modelos sigmoideo, para los tratamientos testigo y descompactados con paratill, en	
27	dos sitios: A) monocultura de soja y B) rotado.....	209
28	Figura 6.4 Evolución en el ciclo de la lámina de agua útil acumulada a 2 m de	
29	profundidad en los experimentos del año 1, para los tratamientos testigo y descompactado	
30	con para-till en dos sitios: monocultura de soja y rotado.....	211
31	Figura 6.5 Evolución en el ciclo del contenido de humedad en los 0,2-0,4 m durante el	
32	año 1, para los tratamientos testigo y descompactado con paratill, en el experimento del	
33	sitio de monocultura de soja.....	212
34	Figura 6.6 Evolución en el ciclo de la lámina de agua útil acumulada a 2 m de	
35	profundidad en los experimentos del año 2, para los tratamientos testigo y descompactado	
36	con para-till en dos sitios: monocultura de soja y rotado.....	211
37	Figura 6.7 Relación entre la evapotranspiración y biomasa aérea acumulada a lo largo	
38	del cultivo; para los tratamientos testigo y descompactados, en sitios de monocultura de	
39	soja y rotados.....	215
40		
41		
42		

1	Figura 6.8 Evolución en el ciclo de la interceptación de radiación incidente, en los	
2	experimentos del año 1 y del año 2, para los tratamientos testigo y descompactado con	
3	paratill, en sitios de monocultura de soja y rotados.	217
4	Figura 6.9 Relación entre la radiación interceptada a lo largo del ciclo del cultivo, con la	
5	producción de materia seca; para los tratamientos testigo y descompactados, en sitios de	
6	monocultura de soja y rotados. Se muestra el ajuste por regresión lineal para los distintos	
7	tratamientos y sitios, y los coeficientes de ajuste en cada caso.....	220
8	Figura 6.10 Relación entre: (A) productividad del agua y productividad de la radiación	
9	para la generación de grano (PA_Y-PR_Y); (B) productividad del agua y productividad de la	
10	radiación para la generación de biomasa (PA_B-PR_B); (C) eficiencia uso (conversión) del	
11	agua y eficiencia de uso (conversión) de la radiación ($EUA-EUR$); y (D) eficiencia de	
12	captura de agua ($E_t/Oferta\ Total$) y eficiencia de captura de radiación (R_{int}/R_s).....	221
13		
14	Figura 7.1 Esquema racional de esta tesis.....	240
15	Figura 7.2 Mecanismos por los cuales la compactación de suelos en SD puede afectar la	
16	producción de biomasa y grano en el cultivo de soja.....	254
17	Figura 7.3 Efectos de la compactación de suelos en SD sobre la Productividad del agua	
18	y sus componentes parciales. Las líneas llenas indican efectos observados en los ensayos	
19	de campo y controlados.....	255
20		
21		
22		

1

ABREVIATURAS

- 2 Ai – agua útil inicial
- 3 ARC – subsuelo arcilloso
- 4 AU – agua útil
- 5 BAA -biomasa aérea aportada
- 6 BRA - biomasa radical aportada
- 7 C – tratamientos compactados
- 8 CC - capacidad de campo
- 9 CI – índice de intensificación de la rotación
- 10 COP – carbono orgánico particulado
- 11 COS – carbono orgánico del suelo
- 12 C-PR - condiciones cuasi-prístinas
- 13 CWSI - índice de estrés hídrico del cultivo
- 14 DAP – densidad aparente
- 15 DLR – densidad de longitud de raíz
- 16 DPV – déficit de presión de vapor
- 17 ETr – evapotranspiración del cultivo
- 18 EUA – eficiencia de uso (o conversión) del agua
- 19 EUR – eficiencia de uso (o conversión) de la radiación
- 20 FBN -fijación biológica de nitrógeno
- 21 FRA – subsuelo franco arenoso
- 22 H100% - humedad superficial manejada en 100% de agua útil
- 23 H50% - humedad superficial manejada en 50% de agua útil
- 24 IC – índice de cosecha
- 25 K – tasa de extracción de agua
- 26 NC – tratamientos no compactados
- 27 PA- pasturas consociadas para corte
- 28 PA_B-PA_Y – productividad del agua para producción de biomasa (B) o grano (Y)
- 29 PME – profundidad máxima de enraizamiento
- 30 PMP - punto de marchitez permanente
- 31 PP – precipitaciones

- 1 PPef – precipitaciones efectivas
- 2 PR_B-PR_Y – productividad de la radiación para producción de biomasa (B) o grano (Y)
- 3 PTILL – descompactado con para-till
- 4 R : T – relación raíz/tallo
- 5 Rint – radiación interceptada
- 6 ROT AI - rotaciones de “alta intensidad”
- 7 ROT BI- rotaciones de “baja intensidad”
- 8 Rs – radiación incidente
- 9 S – superficial
- 10 SD – siembra directa
- 11 SJ - monocultura de soja
- 12 SS – subsuperficial
- 13 T0 – testigo compactado
- 14 Y -rendimientos
- 15 Z – espesor del estrato
- 16

1

RESUMEN

2 Esta tesis tuvo por objetivo avanzar en el entendimiento de los factores que favorecen la
3 compactación de suelos en siembra directa, analizar los mecanismos por los cuales las
4 compactaciones afectan la productividad del agua en soja (*Glycine max L. Merrill*), y
5 analizar la efectividad de intervenciones mecánicas sobre su reversión. Para esto se
6 combinaron: muestreos de suelo a nivel regional, experimentos en invernáculo, un meta-
7 análisis de publicaciones y experimentos de campo. El muestreo regional mostró que la
8 compactación entre 10-20 cm es un proceso ampliamente extendido, independientemente
9 de la intensidad y aportes de carbono de las rotaciones. Los experimentos controlados
10 mostraron que la compactación genera alteraciones en el crecimiento del sistema de raíces
11 en su conjunto, no sólo en las raíces directamente afectadas. La compactación retrasó la
12 profundización de raíces, y redujo la proliferación de raíces en estratos superficiales y
13 profundos, más allá de 150 cm. Se observaron mecanismos compensatorios a nivel de
14 absorción de agua por unidad de raíz, pero éstos se vieron limitados ante reducciones
15 marcadas en la longitud de raíces. La compactación generó otros efectos que ameritan
16 mayores estudios: redujo la cantidad y actividad de los nódulos directamente e
17 indirectamente afectados. De acuerdo al meta-análisis, la descompactación mecánica
18 permite aliviar las compactaciones y aumentar los rendimientos de soja de la región
19 pampeana (~540 kg.ha⁻¹ en promedio). La descompactación permitió incrementar la
20 captación de agua en el perfil, y su extracción por el cultivo, aunque no la eficiencia de
21 conversión a biomasa. Los efectos no parecen prolongarse más allá de 18-24 meses. Esta
22 tesis permitió una mejor comprensión de los mecanismos por los cuales el deterioro
23 estructural de los suelos en SD, y particularmente la compactación, afecta la utilización
24 de agua y los rendimientos en soja, y en qué medida la descompactación puede aliviar
25 estos efectos.

26 **Palabras clave:** compactación de suelos, descompactación mecánica, estructura, siembra
27 directa, soja, productividad del agua, eficiencia de uso del agua, raíces

28

1

ABSTRACT

2 The aim of this thesis was to advance in the understanding of factors that contribute to
3 topsoil compaction in no-till soils, to analyze the mechanisms by which topsoil
4 compaction affects water productivity in soybeans (*Glycine max L. Merrill*), and to
5 analyze the effectiveness of mechanical decompaction labors. In order to accomplish this,
6 we combined: a regional sampling study, greenhouse experiments, a meta-analysis of 32
7 publications and field experiments. The regional sampling showed that soil compaction
8 between 10-20 cm is a widely extended process, independently of crop intensity and
9 carbon inputs of agricultural rotations. Greenhouse experiments showed that topsoil
10 compaction affects the complete root system, not only directly exposed roots. Topsoil
11 compaction reduced root biomass and length in both superficial and deep subsoil layers,
12 even beyond 150 cm. Compensatory mechanisms were observed in terms of water uptake
13 rates per root unit, but these mechanisms were limited when marked reductions in root
14 length occurred. Topsoil compaction generated other below-ground effects that deserve
15 further studies: it reduced the number, mass and activity of directly and non-directly
16 exposed nodules. According to the meta-analysis, mechanical decompaction alleviates
17 compaction effects and increases soybean yields (~540 kg.ha⁻¹ on average). Subsoiling
18 increased water infiltration and water extraction by soybean, but water use efficiency (i.e.
19 conversion to biomass) was not affected. However, the effects of mechanical
20 interventions do not last beyond 18-24 months. This thesis allowed a better understanding
21 of the mechanisms by which the structural degradation in no-till soils, and particularly
22 topsoil compaction, affects water use and soybean yields, and to what extent mechanical
23 decompaction can alleviate these effects.

24 **Key words:** soil compaction, mechanical decompaction, bulk density, soil structure, no-
25 till, soybean, water productivity, water use efficiency, roots

26

Capítulo 1

Introducción General

1 **Capítulo 1. Introducción General**

2

3 **1.1.Introducción**

4 **1.1.1. La siembra directa y su expansión**

5 Para el 2050 la demanda mundial de cereales y oleaginosas se incrementará entre
6 36 y 60% (Tweetin y Thompson, 2009; Nelson et al., 2010; Grafton et al., 2015). Sin
7 embargo, la superficie cultivable actualmente representa cerca del 12% del total de la
8 superficie terrestre, y se estima que podría extenderse como máximo hasta el 15% para
9 mantener el impacto ambiental dentro de límites aceptables (Henry et al., 2018).
10 Paralelamente, el incremento en los costos energéticos y otros insumos, la creciente
11 escasez y competencia por agua a nivel global, la degradación y contaminación de
12 ecosistemas y el proceso de cambio climático, generarán presiones adicionales sobre los
13 sistemas de producción (Kassam et al., 2010). La posibilidad de satisfacer la demanda
14 mundial de alimentos y derivados agrícolas minimizando el impacto ambiental dependerá
15 entonces del desarrollo de sistemas agrícolas conservacionistas (Kassam et al., 2010), que
16 incrementen la producción por unidad de tiempo y superficie a través de una elevada
17 eficiencia en el uso de los recursos productivos (Cassman et al., 2003; Caviglia y
18 Andrade, 2010).

19 Diversos autores han destacado el rol de la siembra directa (SD) como un
20 componente fundamental en el desarrollo de una agricultura conservacionista y eficiente
21 en el uso de recursos (Huggins y Reganold, 2008; Kassam et al., 2015; Lal, 2015). Han
22 sido ampliamente estudiados los efectos de la SD sobre el control de la erosión,
23 conservación de la humedad edáfica, mejora de la estabilidad de los agregados del suelo,
24 desarrollo y mantenimiento de porosidad vertical, disminución de escurrimientos y

1 aumento de la infiltración de agua, atenuación de cambios en la temperatura, y fomento
2 de la actividad microbológica y de la meso-fauna del suelo, entre otros. Existen múltiples
3 revisiones que resumen estos beneficios tanto a nivel internacional (Thomas et al., 2007;
4 Lal et al., 2007; Cavalieri et al., 2009; Soane et al., 2012) como a nivel local (Panigatti et
5 al., 2001; Díaz-Zorita et al., 2002 a; Álvarez y Steinbach, 2009).

6 Argentina ha sido uno de los países de mayor y más rápida adopción de la SD a
7 nivel global, y actualmente alrededor del 91% de la superficie del país se maneja bajo
8 esta modalidad (AAPRESID, 2019). Sin embargo, los sistemas agrícolas en SD en
9 Argentina han presentado en las últimas décadas algunas características distintivas
10 (Calviño y Monzón, 2009; Milesi Delaye et al., 2013; SIIA, 2017): entre el 55-60% de la
11 producción se realiza bajo arrendamiento, el cultivo de soja (*Glycine max L. Merrill*)
12 ocupa cerca del 55% de la superficie agrícola, y predominan condiciones de barbecho sin
13 cultivo durante los meses invernales. A pesar de las múltiples ventajas antes mencionadas,
14 se ha encontrado que los planteos agrícolas continuos con escasa rotación de cultivos y
15 predominio de barbechos invernales pueden impactar negativamente sobre la estructura
16 de los suelos en SD (Álvarez et al. 2014; Sasal et al., 2017 b).

17 **1.1.2. La siembra directa y la estructura del suelo**

18 La estructura de un suelo puede entenderse como el arreglo entre sus
19 constituyentes minerales y orgánicos, y del espacio de poros generado entre ellos, en las
20 distintas escalas del espacio (Hamblin, 1985; Letey, 1991; Roger-Estrade et al., 2013).
21 La estructura de un suelo no depende únicamente de las proporciones entre los
22 componentes sólidos y poros, sino también del arreglo entre estos componentes, que
23 determinan la forma, tamaño, arreglo espacial, cohesión y estabilidad de las partículas
24 primarias y agregados, así como las características del espacio poroso, incluyendo la
25 distribución del tamaño de los distintos poros, su orientación, continuidad, geometría y

1 su estabilidad (Rabot et al., 2018). Este arreglo entre sólidos y poros es dinámico,
2 complejo, y aún no se encuentra del todo comprendido (Lal y Shukla, 2004; Rabot et al.,
3 2018).

4 Ese ordenamiento entre sólidos y poros regula el funcionamiento del suelo: al
5 influir sobre la capacidad de retener y transmitir agua y compuestos orgánicos e
6 inorgánicos en solución, la actividad microbiológica y el ciclado de nutrientes y carbono,
7 la difusión de gases como O₂, N₂ y CO₂, y el crecimiento y desarrollo de los sistemas
8 radiculares de los cultivos (Bronick y Lal, 2005; Baize y van Oort, 2013; Rabot et al.,
9 2018).

10 En suelos en SD se han evidenciado distintos procesos de alteración de la estructura:
11 incrementos en la proporción de tipos estructurales laminares con una orientación de
12 poros predominantemente horizontal (Morrás et al., 2004; Sasal et al., 2006; Sasal, 2012;
13 Lozano, 2014; Álvarez et al. 2014; Sasal et al., 2017 a y b), la formación de tipos
14 estructurales masivos con porosidad reducida, y elevada cohesión interna (Bacigaluppo
15 et al., 2011; Sasal, 2012), incrementos en la dureza suelo (Taboada et al., 1998; Díaz-
16 Zorita et al., 2002 a; Micucci y Taboada, 2006), y la ocurrencia de procesos de
17 compactación del horizonte superficial y subsuperficial inmediato del suelo (Taboada et
18 al., 1998; Quiroga et al., 1999; Botta et al., 2006 a y b; Tolón-Becerra et al., 2011; Sasal,
19 2012; Fernández et al., 2015; Sivarajan et al., 2018).

20 **1.1.3. Alteraciones de la estructura en SD: la compactación de suelos**

21 La compactación constituye una de las principales alteraciones de la estructura del
22 en suelos en SD y bajo otros sistemas de manejo (Horn et al., 1995; Quiroga et al. 1999;
23 Bronick y Lal, 2005; Hamza y Anderson, 2005; Nawaz et al., 2013; Guimarães et al.,
24 2017). La compactación puede definirse como un proceso de compresión del suelo en

1 condiciones no saturadas de agua, que implica una disminución de volumen y/o la
2 deformación del suelo frente a la aplicación de un estrés o presión, tanto externo como
3 interno (Horn y Lebert, 1994). Los estreses externos pueden deberse a la aplicación de
4 cargas estáticas o dinámicas en la forma de vibraciones, pisoteos o tránsito de maquinaria
5 agrícola, mientras que los internos pueden deberse a la presión o succión de agua durante
6 los ciclos de humedecimiento y secado. La compactación del suelo puede así originarse
7 a partir de la deformación de las partículas sólidas del suelo, de la compresión y
8 movimiento o expulsión del líquido o gas del espacio poroso, y/o del reordenamiento de
9 las partículas sólidas (Harris, 1971; Horn y Lebert, 1994).

10 La compactación de suelos agrícolas generalmente se ha identificado con un
11 proceso de densificación o aumento de la densidad aparente del suelo, en el cual
12 disminuye el espacio poroso (Soane y van Overwerk, 1994; Hamza y Anderson, 2005;
13 Soil Science Society of America; 2008). Sin embargo, si bien desde el punto de vista
14 mecánico una compresión implica una disminución de volumen y del espacio entre dos
15 puntos, luego de la aplicación de un estrés las partículas de un suelo pueden también
16 reorientarse y reacomodarse, generándose procesos de cementación inter-partículas
17 (Dexter et al., 1988). Esto puede dar lugar a aumentos en la cohesión entre partículas, en
18 la dureza del suelo, y/o alteraciones en la continuidad del sistema de poros, aún sin
19 cambios en la densidad aparente del suelo o porosidad total (Dexter et al., 1988; Micucci
20 y Taboada, 2006). Este efecto se ha denominado endurecimiento tixotrópico
21 (*“thixotropic-hardening”* o *“age-hardening”*; Utomo y Dexter, 1981; Dexter et al, 1988;
22 Taboada et al., 1998). En algunos suelos en SD, este fenómeno se ha denominado también
23 *“coalescencia”* (*“soil coalescence”*, Cockroft y Olson, 2000) y se ha asociado a la
24 migración y re-acomodamiento de partículas y agregados durante los ciclos de
25 humedecimiento y secado del suelo. Estos procesos se han asociado a incrementos en los

1 niveles de dureza del suelo, en los cuales los niveles de macro-porosidad o infiltración de
2 agua no necesariamente se ven severamente afectados. El tránsito de la maquinaria
3 también es capaz de generar deslizamientos y re-acomodamientos de las partículas del
4 suelo, generando aumentos en la cohesión, que no necesariamente se traducen en cambios
5 volumétricos (Cohron, 1971; Horn y Lebert, 1994).

6 En la práctica, resulta por lo tanto difícil discriminar las causas que dan origen a la
7 presencia de estratos de suelo con alta cohesión interna, elevada resistencia mecánica, y/o
8 elevada densidad aparente en el horizonte antrópico. La presencia de estratos de estas
9 características puede deberse a los efectos del tránsito de maquinaria, a los ciclos de
10 humedecimiento-secado (y sus efectos sobre el reacomodamiento de partículas y
11 agregados), y/o a su efecto conjunto (Horn y Lebert, 1994; Sasal, 2012; Álvarez et al.,
12 2014; Boizard et al., 2017; Botta et al., 2018). De modo de facilitar la comprensión, a lo
13 largo de esta tesis se usará el término de compactación para referirse a la presencia de
14 estratos (densificados o no) en los cuales se ven alteradas una o más de las propiedades
15 relacionadas al comportamiento funcional del suelo (i.e. resistencia o dureza del suelo,
16 porosidad total, porosidad de aireación), y/o se generen cambios en su densidad aparente,
17 independientemente de su origen.

18 A su vez, es válido aclarar que no toda compactación del suelo es necesariamente
19 perjudicial. En algunos suelos, como aquellos con elevado contenido de partículas de
20 arena en superficie, al aumentar la cohesión interna y resistencia del suelo, la
21 compactación puede disminuir la erosión del suelo (Bouwman y Arts, 2000; Hamza y
22 Anderson, 2005; Nawaz et al., 2013). De este modo, habría un nivel de compactación
23 óptimo más allá del cual la compactación podría considerarse como “excesiva” al generar
24 efectos negativos sobre los cultivos (Gupta et al., 1989; Hamza y Anderson, 2005). El
25 término “compactación” se referirá a lo largo de esta tesis a estas condiciones de

1 compactación excesiva, en la cual las propiedades físicas del suelo se ven alteradas de
2 modo tal que puedan ocasionar una restricción al normal crecimiento de los cultivos.

3 Un caso que requiere especial atención son los suelos con elevado contenido de
4 limo en superficie, que se caracterizan por su susceptibilidad a compactarse y formar tipos
5 estructurales masivos, por causas naturales y/o antrópicas (Hamblin y Davies, 1977;
6 Alakukku, 1998; Álvarez et al. 2014; Sasal et al., 2017 b; Boizard et al., 2017). Sin
7 embargo, todavía existen interrogantes en cuanto a la presencia y magnitud de los
8 procesos de compactación en suelos de estas características en SD. Los ensayos de Botta
9 et al. (2006; 2008; 2010; 2018) sugieren que el tránsito de maquinaria sin remoción genera
10 compactaciones superficiales y subsuperficiales en estos suelos, en especial a partir de las
11 operaciones de cosecha.

12 Sin embargo, la porosidad y grietas generada por las raíces y fauna, y las fisuras
13 producidas por los ciclos de humedecimiento y secado, pueden favorecer cambios en el
14 tipo de estructuras presentes, y se han encontrado evidencias de conversión de estructuras
15 masivas compactadas a estructuras laminares y de otros tipos, de menor cohesión interna
16 (Sasal, 2012; Sasal et al., 2017b; Boizard et al., 2017). Existen también evidencias de que
17 sistemas agrícolas de mayor intensidad (entendido como un mayor número de cultivos de
18 cosecha o servicio por año respecto al sistema predominante) y diversidad de cultivos
19 pueden incrementar los niveles de aportes de carbono y mejorar gradualmente algunas
20 propiedades físicas en suelos de estas características (Sasal et al., 2006; Sasal, 2012;
21 Álvarez et al., 2012; Novelli et al., 2017). Sin embargo, no se conoce en qué medida la
22 intensidad y diversidad de cultivos pueden aliviar posibles compactaciones o prevenir su
23 formación en suelos de estas características.

1 **1.1.4. La compactación en SD y sus efectos sobre el cultivo de soja**

2 La compactación puede entonces afectar el volumen de poros del suelo, la distribución
3 de los distintos tamaños de poros, su geometría y continuidad, los flujos de agua y gases,
4 y/o la cohesión interna de los suelos, y por ende el ambiente donde se desarrolla la
5 actividad de microorganismos y raíces (Lipiec y Hatano, 2003; Alaoui et al., 2011;
6 Reszkowska et al., 2011). La compactación puede impactar negativamente sobre los
7 rendimientos de distintos cultivos (Bengough y Young, 1993; Lipiec y Hatano, 2003;
8 Dam et al., 2005; Sadras et al., 2005; Siczek y Lipiec, 2011; Pfeifer et al., 2014). Sin
9 embargo, la influencia de la compactación de suelos en SD sobre los rendimientos de los
10 cultivos todavía no está esclarecida en profundidad, en particular en lo que respecta a
11 cuáles son los mecanismos por los cuales afecta. La mayoría de los estudios han sido
12 generados en suelos artificialmente compactados o en panes de labranza, que no
13 necesariamente reflejan la distribución y continuidad del sistema poroso de suelos
14 compactados en SD.

15 La presencia de canales y bioporos continuos, sumados a las condiciones de mayor
16 conservación de humedad por la cobertura de rastrojo asociadas a la SD, pueden
17 enmascarar los efectos de la compactación sobre los rendimientos de algunos cultivos
18 bajo este sistema (Ball-Coelho et al., 1998; Díaz-Zorita et al., 2002 a; Williams y Weill,
19 2004). Algunos estudios han planteado que los niveles de densidad aparente y resistencia
20 mecánica encontrados en suelos en SD generalmente no resultan limitantes para el
21 crecimiento de los cultivos (Álvarez y Steinbach, 2009). Otros autores han planteado en
22 cambio que los rendimientos de cultivos como maíz (*Zea mays*) y soja pueden verse
23 afectados por la presencia de compactaciones en suelos SD (Bacigaluppo et al., 2011,
24 Botta et al., 2013; 2016). Asimismo, muchos aumentos de resistencia tienen lugar sin
25 afectar ni la densidad aparente ni la porosidad (Taboada et al., 1998), por lo cual no son

1 identificados como tales. Existe por lo tanto controversia acerca de los efectos de la
2 compactación de los suelos en los sistemas de SD sobre los rendimientos de los cultivos.

3 Existe por lo tanto controversia acerca de los efectos de la compactación de los suelos
4 en los sistemas de SD sobre los rendimientos de los cultivos.

5 La mayor parte del conocimiento actual referente a los efectos de la compactación de
6 suelos sobre los cultivos se ha generado en cultivos como trigo (*Triticum aestivum*),
7 cebada (*Hordeum vulgare*), maíz (*Zea mays*) y algodón (*Gossypium hirsutum*), (Tardieu
8 et al., 1994; Sadras et al., 2005; Bengough et al., 2011). Los efectos y los mecanismos
9 por los cuales la compactación en SD puede estar afectando los rendimientos de soja no
10 se conocen en detalle, en especial si lo compara con otros cultivos. Este aspecto cobra
11 especial relevancia dada la difusión del cultivo de soja en SD a nivel nacional y en otros
12 de los países líderes en exportación de sus granos y subproductos bajo este sistema de
13 producción, como Brasil y EEUU (Meade et al., 2016; Domínguez y Rubio, 2019).

14 **1.1.5. Los mecanismos de acción de la compactación de suelos**

15 Los estudios en gramíneas como trigo muestran que las disminuciones del
16 rendimiento por la compactación de suelos pueden estar mediadas por reducciones en la
17 disponibilidad de recursos y/o en su captura (Sadras et al., 2005; Andersen et al., 2013).
18 En los sistemas agrícolas de secano el agua disponible para los cultivos durante la estación
19 de crecimiento resulta generalmente el factor más limitante (Grassini et al., 2009; Monzón
20 et al., 2012). Según Passioura (2006), la efectividad con la cual un cultivo pueda utilizar
21 un suministro limitado de agua para generar rendimiento en secano depende de: (a) la
22 captura de la mayor cantidad de agua posible a partir de la oferta total para (b) ser
23 transpirada por el cultivo; (c) la producción de la mayor cantidad de foto-asimilados por
24 unidad de agua transpirada; y (d) la partición de la mayor cantidad de foto-asimilados

1 hacia los granos. Estos conceptos resultan análogos a los conceptos de eficiencia de uso
 2 de precipitaciones (Farahani et al., 1998; Hatfield et al., 2001) o productividad del agua
 3 (PA, en $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$; o $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) (Caviglia et al., 2004 b; Fereres y González-Dugo,
 4 2009), y pueden representarse a través del siguiente modelo conceptual:

$$5 \quad PA = \frac{Almz}{PP+Almi} \frac{ET}{Almz} \frac{B}{T} \frac{Y}{B} \quad [1.1]$$

6
 7 donde $PP+Almi$ representa la oferta total de agua, dada por el aporte lluvias (PP , en
 8 mm) en el total del período a considerar y el agua almacenada en el suelo al inicio de ese
 9 período ($Almi$, en mm de agua útil) hasta una profundidad máxima determinada; $Almz$ (en
 10 mm de agua útil) representa la cantidad de agua almacenada en el suelo hasta la
 11 profundidad observada de exploración de las raíces (i.e. descontando las pérdidas de agua
 12 por escurrimiento y drenaje profundo más allá de la zona de exploración radical); ET (en
 13 mm) es la cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo; B es la biomasa aérea total
 14 producida (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ o $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ e Y es el rendimiento en grano (en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ o $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$).

15 Los efectos de la compactación sobre el ingreso de agua (primer componente
 16 de la ec. 1.1) han sido ampliamente estudiados (Alaoui et al., 2011; Garbout et al., 2013;
 17 Abdollahi et al., 2014). En cambio, aún no se encuentran del todo esclarecidos los efectos
 18 de la compactación, y en especial para el cultivo de soja en SD, sobre los componentes
 19 que se refieren al desarrollo y funcionamiento radical y absorción de agua por el cultivo
 20 (“captura por el cultivo”; segundo componente de la ec. 1.1) y en su conversión a biomasa
 21 y partición grano (tercer y cuarto componentes de la ec. 1.1).

22 Con respecto a estos últimos componentes, existen evidencias de que las
 23 compactaciones afectan la arquitectura del sistema radical y su actividad en gramíneas y
 24 en cultivos como el algodón (Taylor y Brar, 1991; Tardieu, 1994; Bengough et al., 2006;

1 2011). Sin embargo, la importante plasticidad observada en soja en la parte aérea (Vega
2 et al., 2001; Vega y Sadras., 2003; Andrade y Abbate, 2005), sugiere que podrían existir
3 mecanismos compensatorios en el caso de las raíces de este cultivo, como se observara
4 en cebada (Pfeifer et al., 2014).

5 Además, la eficiencia de uso del agua puede estar mediada por la disponibilidad y
6 utilización de otros recursos como la radiación o nutrientes (Sadras et al., 1991; Caviglia
7 y Sadras, 2001; Sadras, 2004, 2005; Caviglia et al., 2004 b). La complejidad de la
8 nutrición nitrogenada del cultivo de soja, en parte basada en el proceso de fijación
9 biológica de N atmosférico (FBN), permite suponer que este comportamiento sea
10 diferente de otros cultivos (Sadras y Richards, 2014).

11 **1.1.6. Alternativas frente a la compactación de suelos en SD**

12 Existen evidencias de que la descompactación mecánica de suelos compactados puede
13 incrementar la evapotranspiración de los cultivos, y aumentar el aprovechamiento de
14 agua, como muestran los resultados en gramíneas como trigo creciendo en suelos con
15 elevado contenido de arena de ambientes semiáridos (Sadras et al., 2005). Sin embargo,
16 los resultados en cuanto a los efectos y perdurabilidad de la práctica sobre suelos y
17 cultivos en suelos con alto contenido de limo en SD, en especial sobre el cultivo de soja,
18 han sido extremadamente variables. Se han observado así tanto cambios favorables en
19 algunas propiedades físicas del suelo (Álvarez et al., 2009 a) como alteraciones negativas
20 (Bonet et al., 2004) luego del uso de descompactadores, y se han informado tanto
21 reducciones en los rendimientos (Mon, 2008; Vallejos, 2014; Lozano et al., 2016), como
22 respuestas superiores a los 1000 kg.ha⁻¹(Tesouro et al., 2006; Mon, 2008).

23 La variabilidad en las respuestas y la efectividad y perdurabilidad de las labores
24 mecánicas es el resultado de múltiples factores, entre los que podemos incluir: el grado

1 de impedancia para el crecimiento de raíces y movimiento de agua previo al pasaje del
2 implemento; las condiciones hídricas experimentadas por el cultivo; la profundidad a la
3 que se encuentran las capas densificadas y su espesor; las características texturales del
4 suelo; el estado estructural del suelo y la existencia previa de vías naturales para el pasaje
5 de raíces y movimiento de agua; el drenaje general, entre otros factores (Spoor, 2006). A
6 pesar de las distintas experiencias, todavía no están esclarecidos en detalle los efectos de
7 la descompactación mecánica sobre los distintos componentes de la productividad del
8 agua y los rendimientos del cultivo de soja, ni sobre los factores que pueden estar
9 condicionando estos efectos.

10 En síntesis, la Argentina posee una de las mayores superficies de producción
11 manejadas con SD del mundo, y el cultivo de soja es actualmente el principal cultivo a
12 nivel nacional y regional en producción y superficie. Debido a una serie de razones
13 mayormente de índole técnica-económica, la forma de cultivar soja se ha realizado en
14 planteos de agricultura continua y escasa intensidad de cultivos, lo cual se ha relacionado
15 a procesos de deterioro de la estructura de los suelos, como la compactación. La presencia
16 de compactaciones puede estar contribuyendo a las brechas de rendimiento observadas
17 para el cultivo en SD (Aramburu Merlos et al., 2015), tal como lo sugieren algunas
18 investigaciones (Bacigaluppo et al. 2011), pero la información respecto a los efectos y
19 mecanismos por los cuales la compactación podría afectar al cultivo de soja mismo resulta
20 aún escasa. Conocer el grado de extensión y magnitud de las compactaciones del
21 horizonte antrópico bajo distintos esquemas productivos en los suelos en SD, entender
22 los mecanismos por los cuales estas alteraciones en la estructura pueden estar limitando
23 el aprovechamiento de recursos como el agua en el cultivo de soja, así como la efectividad
24 de su corrección, facilitará el desarrollo de estrategias de manejo de suelos que permitan
25 disminuir las brechas productivas.

1 **1.2.Objetivos Generales**

2 Esta tesis tuvo por objetivos generales:

- 3 a) avanzar en el conocimiento de los factores que favorecen la compactación de
4 suelos en sistemas manejados en siembra directa; y de los mecanismos por los
5 cuales las compactaciones afectan la productividad del agua en el cultivo de soja;
6 b) analizar la efectividad de intervenciones mecánicas (descompactación) sobre su
7 reversión.

8 **1.3.Hipótesis generales de trabajo:**

- 9 c) La compactación del horizonte antrópico del suelo asociada a planteos de escasa
10 intensidad y diversificación de cultivos en SD, actúa como limitante no sólo para
11 el ingreso de agua al perfil, sino también para la extracción de agua y su
12 transformación a biomasa y rendimiento en soja.
13 d) La intervención mecánica a través de subsoladores mejora estos indicadores en
14 suelos compactados; los efectos son mayores mientras mayores sean las
15 restricciones físicas superficiales previas a la labor.

16

17 **1.4.Estructura de la tesis**

18 La presente tesis está orientada a responder los siguientes interrogantes: ¿Cuál es el
19 estado de la estructura en suelos con alto contenido de limo en SD, y particularmente cuán
20 extendidos se encuentran los procesos de compactación en suelos de estas características
21 de acuerdo a la historia agrícola? ¿Cómo afecta la compactación de suelos en SD a los
22 rendimientos y utilización de agua en el cultivo de soja? ¿Cómo pueden remediarse los
23 efectos de la compactación sobre el cultivo de soja? Para contestar estos interrogantes, la
24 presente tesis fue organizada en siete Capítulos. En el presente capítulo (Capítulo 1) se
25 han expuesto los antecedentes generales e interrogantes sobre el tema, y plantearon los

1 objetivos e hipótesis generales de trabajo. En los Capítulos 2 al 6 se presentan los estudios
2 desarrollados en el marco de esta tesis, organizados en sus correspondientes secciones:
3 introducción, objetivos e hipótesis específicos del capítulo, materiales y métodos,
4 resultados, discusión y conclusiones parciales. En el Capítulo 2 se intenta responder al
5 primer interrogante. Se analiza el estado de la estructura de suelos en SD de acuerdo a su
6 historia agrícola previa, y en particular la presencia de procesos de compactación, a partir
7 del muestreo de lotes de producción, en Molisoles con elevado contenido de limo en
8 superficie como los de la subregión de la Pampa Ondulada. En el Capítulo 3 se intenta
9 responder al segundo interrogante, y se analiza el efecto de la compactación del horizonte
10 superficial del suelo sobre el crecimiento y extracción de agua del sistema de raíces
11 completo de plantas de soja, en ensayos controlados en invernáculo (experimentos 1 y 2).
12 En el Capítulo 4 se exploran otros efectos asociados a la compactación del horizonte
13 antrópico sobre el sistema radical de las plantas de soja: la cantidad y distribución de
14 nódulos (utilizando los experimentos 1 y 2), y el tamaño y actividad de esos nódulos
15 (experimento 3). Los Capítulos 5 y 6 intentan responder el tercer interrogante. En el
16 Capítulo 5 se analiza la efectividad de las intervenciones mecánicas (descompactación
17 con subsoladores) sobre la reversión de la compactación de suelos en SD, a través de los
18 cambios generados en las propiedades físicas del suelo, así como su perdurabilidad en el
19 tiempo. Esta información surge de ensayos de campo propios de esta tesis,
20 complementados con un trabajo de meta-análisis en el que se revisaron distintas
21 experiencias de la región pampeana. En el Capítulo 6, con los mismos ensayos de campo
22 de esta tesis y casos del meta-análisis del Capítulo 5, se analizan los efectos de la
23 descompactación mecánica sobre los rendimientos de soja, y sobre los distintos procesos
24 ligados al aprovechamiento de agua por el cultivo (ecuación 1.1). La tesis concluye con
25 el Capítulo 7 (Discusión y Conclusiones generales), donde se contrastan las hipótesis

- 1 formuladas, se resumen los principales hallazgos, y se analizan implicancias y caminos a
- 2 seguir en futuras investigaciones.
- 3

Capítulo 2

Estado de la estructura de suelos en siembra directa de acuerdo con la historia agrícola.

1 **2. Estado de la estructura de suelos en siembra directa de acuerdo con la historia** 2 **agrícola.**

3 **2.1. Introducción**

4 La estructura ejerce una gran influencia sobre la capacidad de retener y transmitir
5 agua y compuestos orgánicos e inorgánicos en solución, en la actividad microbiológica y
6 el ciclado de nutrientes y carbono, en la difusión de gases como O₂, N₂ y CO₂, y en el
7 crecimiento y desarrollo de los sistemas radicales de los cultivos (Bronick y Lal, 2005;
8 Baize y van Oort, 2013). El estado de la estructura de un suelo puede entenderse como su
9 capacidad para cumplir con esas funciones y de mantener esa capacidad de forma
10 eficiente y sustentable en el largo plazo (Doran, 2002; Shukla et al, 2006).

11 El estado de la estructura en un determinado momento depende de la interacción
12 entre mecanismos de agregación y desagregación, regulados tanto por factores naturales
13 como por factores antrópicos (Taboada y Álvarez, 2008; Taboada et al., 2008). El
14 contenido de materia orgánica, la textura y mineralogía del suelo, la presencia de óxidos
15 y cationes, la ocurrencia de ciclos de humedecimiento y secado, la acción de la
16 vegetación, microorganismos y mesofauna, la acción antrópica, y las complejas
17 interacciones que se dan entre estos factores influyen marcadamente sobre la estructura
18 de los suelos (Lal y Shukla, 2004). La materia orgánica tiene un rol preponderante en el
19 estado de la estructura de los suelos (Six et al., 2000; Six et al., 2004; Bronick y Lal,
20 2005). Por un lado, las sustancias orgánicas de menor tasa de descomposición en el suelo,
21 como los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas, pueden formar puentes entre las
22 superficies de las partículas de arcilla y cationes polivalentes como el calcio, y actuar
23 como cementantes de gran persistencia (Piccolo, 1996; Tarchitzky et al., 2000). Este tipo
24 de uniones proporcionan una mayor estabilidad a los agregados del suelo de menor

1 tamaño y disminuyen el impacto disruptivo de distintos agentes de desagregación,
2 naturales o antrópicos (Piccolo et al., 1997; Six et al., 2000).

3 Por otro lado, la materia orgánica particulada (medida a través del contenido de
4 carbono orgánico particulado, COP), compuesta por residuos orgánicos de rápida
5 descomposición, actúa como un núcleo para la formación de agregados de mayor tamaño
6 (Six et al. 2000; 2004). Esta materia orgánica particulada actúa también como un agente
7 importante de unión de micro-agregados para formar macro-agregados. Al
8 descomponerla, los microorganismos producen sustancias carbonadas lábiles como
9 polisacáridos, mucílagos y otras sustancias, que actúan como cementantes temporarios
10 (Chenu y Guerif, 1991; Jastrow, 1996; Ritz y Young, 2004). Así, mayores
11 concentraciones de estas sustancias se han relacionado a mejores condiciones
12 estructurales de los suelos (Shepherd et al., 2001; Debosz et al., 2002). A su vez, las
13 características hidrofóbicas de estos compuestos orgánicos (Cosentino et al., 2006) le
14 confieren un efecto protector sobre los agregados. Esta hidrofobicidad permite disminuir
15 la velocidad de humedecimiento de agregados del suelo y atenuar el efecto disruptivo del
16 agua (Denef, 2001; Cosentino et al., 2006). Así, mayores niveles de carbono orgánico en
17 el suelo, en sus distintas fracciones, se relacionan a una mayor agregación, y una mayor
18 resiliencia del arreglo entre componentes sólidos y espacio poroso frente estreses
19 disruptivos (Chenu et al., 2000; Bronick y Lal, 2005).

20 Los niveles totales de materia orgánica y de sus distintas fracciones dependen del
21 balance entre los aportes de sustancias orgánicas y la mineralización de la materia
22 orgánica del suelo (Parton et al., 1994; Six et al., 2002; Franzluebbbers y Doraiswamy,
23 2007). La inclusión de un mayor número de cultivos de cosecha o cultivos de servicio al
24 año (i.e. mayor intensidad), ha permitido aumentar el aporte de residuos orgánicos aéreos
25 y subterráneos de los cultivos al suelo en muchos sistemas productivos (Shaver et al.,

1 2003; Caviglia et al., 2010; Novelli et al., 2017). Esto promueve una mayor y más
2 continua actividad de raíces y microorganismos respecto de sistemas con mayor inclusión
3 de períodos de barbechos sin cultivos (Acosta-Martínez et al., 2007; Franzluebbers et al.,
4 2014; O’Dea et al., 2015). Estos efectos han permitido en algunos sistemas productivos
5 aumentar los niveles de carbono orgánico total del suelo o de sus fracciones más lábiles,
6 y mejorar el estado de la estructura del suelo, reflejado a través de aumentos en la
7 porosidad total y macro-porosidad, incrementos en la conductividad hidráulica e
8 infiltración de agua, disminuciones en los niveles de densidad aparente, y/o aumentos en
9 la estabilidad de los agregados (Cambardella y Elliot, 1992; Villamil et al., 2006; Álvaro-
10 Fuentes et al., 2008; Calonego y Rosolem, 2010; Novelli et al., 2011; 2013; 2017).

11 A pesar que los suelos de clima templado se caracterizan en general por su
12 adecuada relación vulnerabilidad-resiliencia (Kay, 1997), aquellos con elevado contenido
13 de limo y arenas finas resultan altamente vulnerables y escasamente resilientes (Taboada
14 et al., 2008; Álvarez et al., 2009 b). Así, a pesar de las mejoras observadas en suelos de
15 estas características bajo SD en indicadores como la estabilidad de agregados (Álvarez y
16 Steinbach, 2009; Álvarez et al., 2012), esto no ha necesariamente resultado en
17 incrementos en otros indicadores como la macro-porosidad o infiltración de agua
18 (Taboada et al., 1998; Sasal et al., 2006; Soracco et al., 2010; Álvarez et al., 2012). Estos
19 suelos resultan también susceptibles a la formación de tipos estructurales laminares en los
20 horizontes superficiales (Sasal et al., 2006; Sasal, 2012; Álvarez et al. 2014; Lozano,
21 2014). Sistemas con mayores aportes de carbono al suelo y mayor actividad de raíces a
22 lo largo del año favorecerían una estructura más estable frente a los estreses disruptivos
23 como los ciclos de humedecimiento y secado, y la posterior orientación de las partículas
24 de limo y poros en forma horizontal (Sasal, 2012; Sasal et al., 2017).

1 Independientemente del origen (Capítulo 1), la compactación constituye una de
2 las alteraciones de la estructura de suelos más difundidas en sistemas en SD (Guimarães
3 et al., 2017; Sivarajan et al., 2018). Algunos autores han destacado que a pesar de que los
4 suelos con alto contenido de limo en SD son susceptibles a la compactación superficial,
5 la no remoción del suelo puede generar procesos de endurecimiento sin que por ello se
6 incremente la densidad aparente o se vean alteradas propiedades físicas funcionales como
7 la porosidad o la distribución del tamaño de poros (Taboada et al., 1998; Micucci y
8 Taboada, 2006), o se incrementen los niveles de resistencia a la penetración por encima
9 de niveles críticos (Álvarez y Steincbach, 2009). En cambio, distintos ensayos de campo
10 en los que se ha estudiado el impacto del tránsito agrícola en suelos de similares
11 características, han demostrado que los niveles de densidad aparente y resistencia a la
12 penetración pueden incrementarse más allá de valores críticos, con restricciones severas
13 en los niveles de porosidad (Botta et al. 2006 b; 2008; 2010). Por lo tanto, todavía existe
14 controversia en cuanto a la presencia y magnitud de las compactaciones en SD en este
15 tipo de suelos, y en cuánto a qué propiedades funcionales de los suelos pueden verse
16 afectadas, especialmente en escenarios reales de producción.

17 A su vez, se ha sugerido que las capas compactadas pueden ser gradualmente
18 transformadas en diferentes tipos estructurales (Boizard et al., 2017; Sasal et al., 2017),
19 de menor densidad aparente y cohesión interna (granulares o laminares, dependiendo de
20 la rotación agrícola). Una mayor intensidad de cultivos respecto de los sistemas
21 predominantes podría aliviar o evitar la formación de compactaciones en SD: a partir de
22 mayores aportes de carbono total y lábil que otorguen mayor resiliencia al suelo frente al
23 estrés compresivo (Hamza y Anderson, 2005), a partir de una actividad más continua de
24 creación de poros y fisuras por las raíces a lo largo del año (Boizard et al., 2017), o
25 indirectamente a partir de una mayor periodicidad de ciclos de humedecimiento y secado

1 del suelo (Sasal, 2012). Así, se han documentado reducciones en la resistencia mecánica
2 o densidad aparente al incluir cultivos de cobertura o rotaciones más intensas (Chan y
3 Heenan, 1996; Calonego y Rosolem, 2010). En los últimos años, algunos productores han
4 implementado esquemas agrícolas de elevada intensidad, tendientes al doble cultivo
5 continuo anual a través de una mayor proporción de cultivos o coberturas invernales
6 (Caviglia y Andrade, 2011; Agosti et al., 2014), o a través de esquemas que incorporan
7 ciclos de pasturas (Fernández et al., 2011). Estos esquemas pueden generar mayores
8 aportes de residuos y carbono, y generar mejoras en el estado de la estructura a través de
9 los mecanismos antes mencionados, pero a su vez pueden implicar una mayor intensidad
10 de tránsito de maquinaria asociado a distintas labores. La difusión y estudio de estos
11 esquemas de elevada intensidad en SD continúa siendo escasa, y en particular en cuanto
12 a sus posibles efectos sobre el desarrollo o alivio de la compactación del suelo.

13 Por último, la caracterización de la estructura de los suelos es una tarea compleja,
14 y no existe aún un método universalmente aceptado para cuantificar y caracterizar su
15 estado (Díaz-Zorita et al., 2002 b; Rabot et al., 2018). Existen métodos disruptivos para
16 cuantificar la distribución del tamaño de agregados, bloques o fragmentos del suelo luego
17 de la aplicación de una fuerza mecánica (Díaz-Zorita et al., 2002 b; Shepherd, 2009);
18 métodos de análisis de imágenes por tomografía computada (Wildenschild and Sheppard,
19 2013; Pot et al., 2015), métodos de observación visual de campo (Ball et al., 2013;
20 Guimarães et al., 2017) o en el perfil de suelo sin disturbar (Manichon, 1987; Sasal et al.,
21 2017 a; Boizard et al., 2017), entre otros. Aun así, caracterizar adecuadamente el estado
22 y evolución de la estructura del suelo requiere complementar observaciones de los
23 distintos tipos estructurales a campo con indicadores físicos relacionados al
24 funcionamiento del suelo, como pueden ser la porosidad y distribución del tamaño de
25 poros, la capacidad de aireación, la conectividad y orientación de poros, la infiltración de

1 agua y resistencia a la penetración de raíces, entre otras (Rabot et al., 2018). Conocer qué
2 propiedades funcionales del suelo relacionadas al estado de la estructura pueden verse
3 afectados de acuerdo con la historia agrícola reciente en suelos limosos en SD facilitará
4 el desarrollo de estrategias de manejo de suelos y cultivos específicas. Pero a pesar que
5 existen estudios que han analizado los efectos de los sistemas de labranzas sobre las
6 propiedades físicas del suelo (Álvarez, 2012), o los efectos de la intensidad de cultivos
7 sobre el desarrollo de estructuras laminares (Lozano, 2014; Sasal, 2017 a y b), no existen
8 estudios en escenarios reales de producción, que hayan analizado los efectos de la
9 intensidad de la historia agrícola en SD y sus niveles de aportes de carbono al suelo, sobre
10 el estado de la estructura del suelo en general, y en particular en el desarrollo de posibles
11 impedancias al crecimiento de raíces, al movimiento de agua, y/o a la capacidad de
12 aireación del suelo.

13 Por lo tanto, aún persisten algunos interrogantes con respecto al estado de la
14 estructura de suelos como los descritos anteriormente ¿Cómo afecta la historia de
15 intensidad agrícola y la historia de aportes de carbono al estado de la estructura en estos
16 suelos? ¿Qué aspectos funcionales de la estructura del suelo (i.e. movimiento de agua,
17 aireación, impedancias al crecimiento de raíces) se ven afectados, y en qué medida, por
18 la historia agrícola? ¿Cuán extendidos se encuentran los procesos de compactación
19 (entendidos según lo descrito en el Capítulo 1)? ¿Pueden aliviarse las compactaciones a
20 través de la intensidad de cultivos y el aporte de C al suelo? ¿Es suficiente una mayor
21 intensidad de rotaciones para mantener los suelos manejados en SD con un estado
22 estructural favorable y sin compactación y/o endurecimientos potencialmente
23 perjudiciales?

24 El objetivo específico de este capítulo fue caracterizar el estado de la estructura del
25 horizonte antrópico en Argiudoles en SD de acuerdo con la historia agrícola reciente, en

1 particular el desarrollo de compactaciones, a través de indicadores del funcionamiento
2 físico del suelo.

3 La hipótesis de trabajo es que los esquemas de mayor intensidad aumentan los
4 aportes de carbono (C) al sistema, lo cual permite:

5 a) aumentar los niveles de carbono orgánico total (COS) y el carbono asociado a
6 sus fracciones más lábiles (COP),

7 b) disminuir la proporción de estructuras laminares y masivas; y

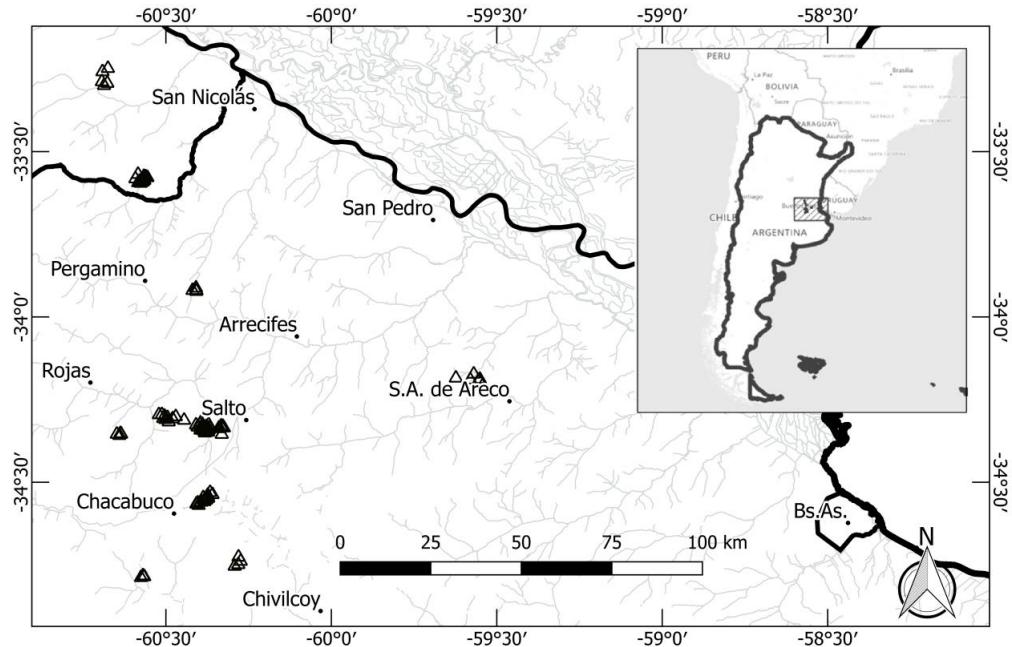
8 c) evitar el desarrollo de compactaciones al disminuir los niveles de densidad
9 aparente y resistencia a la penetración, y aumentar los niveles de infiltración de
10 agua y porosidad de aireación.

11 **2.2 Materiales y métodos**

12 **2.2.1. Sitios, Suelos y Situaciones analizadas**

13 Se seleccionaron 55 situaciones de producción, (lotes o macro-parcelas de ensayos
14 con superficie mayor a 15 ha), y cinco situaciones no cultivadas, ubicados sobre
15 Argiudoles Típicos (fino, illítico, térmico; US Soil Taxonomy) de la región pampeana,
16 específicamente en la subregión de la Pampa Ondulada (Fig. 2.1). Los suelos
17 correspondieron en todos los casos a suelos de alta aptitud agrícola (I-II), de las series
18 Peyrano (Py), Urquiza (Ur), Arroyo Dulce (AD), Chacabuco (Cha) y Capitán Sarmiento
19 (Sm), con texturas franco-limosas en superficie (0-0,2 m; Arcilla < 2 μm = 220-270 g. kg⁻¹;
20 Limo 2-50 μm = 560-640 g.kg⁻¹), (INTA, 2018). Las situaciones productivas incluyeron
21 lotes en SD desde un período de 15 años o más, con una historia agrícola reciente
22 contrastante en cuanto a sus rotaciones (últimos 5-10 años), y pasturas consociadas de 3-
23 5 años destinadas a confección de rollos (secuencia agricultura-pastura). Los sitios no

- 1 cultivados o condiciones cuasi-prístinas de referencia incluyeron sectores de los campos
 2 con vegetación de gramíneas no implantadas ni pastoreadas o “piquetes” con una carga
 3 animal despreciable.



- 4
 5 **Figura 2.1** Ubicación de lotes de producción, ensayos de macro-parcelas y condiciones cuasi-
 6 prístinas muestreados (triángulos). Las líneas negras indican los límites inter-provinciales, y las
 7 líneas grises los cursos de agua. Se indica la escala en kilómetros, y ubicación de localidades de
 8 referencia.

9 2.2.2. Intensidad de las rotaciones

- 10 A partir de los registros de la historia agrícola de los últimos 5-10 años, se estimó
 11 para cada situación productiva el índice de intensidad de cultivos (CI), como la
 12 proporción de días en el año con crecimiento activo de cultivos (siembra a madurez
 13 fisiológica de cultivos; o siembra a secado químico en el caso de las coberturas; días días⁻¹),
 14 de manera similar a lo propuesto por Novelli et al. (2013; 2017). En aquellos lotes en
 15 donde no se contó con registros fenológicos, se estimó la duración siembra-madurez en
 16 base a registros de producción disponibles para la región (arveja = 150; cebada = 165;
 17 trigo = 190; Soja 1^a = 130; Soja 2^a = 95; Sorgo 1^a = 140; Maíz 1^a = 150; Maíz 2^a = 150
 18 días). Para las pasturas y condiciones cuasi-prístinas se empleó un CI = 1,0 (por

1 considerarse todo el año en activo crecimiento aéreo o subterráneo). A partir de las
 2 estimaciones del índice de intensificación y de la historia agrícola reciente, las situaciones
 3 de muestreo se agruparon en 5 categorías o tratamientos para su posterior análisis (Cuadro
 4 2.1).

5 **Cuadro 2.1.** Situaciones incluidas en el análisis. SJ = secuencias tendientes a Monocultura de
 6 soja; ROT BI = Rotaciones de “Baja intensidad”; ROT AI = Rotaciones de “Alta intensidad”; PA
 7 = Pastura consociada de 3-5 años para confección de rollos; C-PR = Condición cuasi-prístina.
 8 Series de suelo incluidas en el análisis: Py (Peyrano), AD (Arroyo Dulce), Cha (Chacabuco), Sm
 9 (Capitán Sarmiento), Ur (Urquiza).

	SJ	ROT BI	ROT AI	PA	C-PR
Rango textura superficial (g.kg⁻¹)	Arcilla =220-270 Limo=560-640	Arcilla =220-270 Limo=560-640	Arcilla =220-270 Limo=560-640	Arcilla =220-240 Limo =620-640	Arcilla =220-270 Limo=560-640
Series de suelo	Py, AD, Cha, Sm	Py, AD, Cha, Sm	Py, Ur, AD, Cha, Sm	Py, AD	Py, AD, Cha
Lotes/situaciones de muestro	15	22	13	5	5
Estaciones de muestreo totales	54	78	52	18	13
Intensidad de cultivos. Promedio y rango (días.días⁻¹)	0,39 (0,34-0,45)	0,50 (0,46-0,6)	0,66 (0,63-0,71)	1,0	1,0
Secuencia representativa	Soja 1 ^a > 80%	Maíz 1 ^a ~35% Soja 1 ^a ~ 40% Trigo/Soja 2 ^a ~25 %	Invernal/Maíz 2 ^a ~ 50% Invernal/Soja 2 ^a ~50%	100% Pastura consociada 3-5 años	100% Vegetación Natural

10 2.2.3. Estimación de aportes de materia seca y carbono

11 Se calcularon los aportes de materia seca de la rotación al suelo, siguiendo la
 12 propuesta de Novelli et al. (2017), a partir de estimaciones de los aportes de materia seca
 13 aérea y radical de cada cultivo de la secuencia. La biomasa aérea aportada (BAA, kg de
 14 materia seca. ha⁻¹) como rastrojo se estimó a través de los registros de rendimientos (Y,
 15 en kg de materia seca. ha⁻¹) de cada lote (corregidos a 0% de humedad) y el índice de
 16 cosecha del cultivo (IC, sin unidades):

$$17 \quad BAA = Y \cdot IC^{-1} - Y \quad [2.1]$$

1 A pesar de la posible variación en el índice de cosecha de los distintos cultivos
 2 (Feres y González-Dugo, 2009), en aquellas situaciones en las que no se contaron con
 3 registros, se utilizó un índice de cosecha promedio (tomando como base valores indicados
 4 en Dardanelli et al., 2003 y Álvarez y Steinbach, 2006; Irizar et al., 2015; soja = 0,45;
 5 maíz = 0,5; trigo/cebada = 0,35; sorgo = 0,35; arveja = 0,42). La biomasa radical aportada
 6 (BRA, en kg materia seca. ha⁻¹) por cada cultivo (raíces + rizodeposiciones) se estimó a
 7 partir de la biomasa aérea total (BAT, kg materia seca.ha⁻¹, calculada como $Y \cdot IC^{-1}$) y la
 8 proporción de raíces respecto a la biomasa aérea total (relación raíz: tallo, R:T, sin
 9 unidades):

$$10 \qquad \qquad \qquad \text{BRA} = (Y \cdot IC^{-1}) \cdot R:T \qquad \qquad \qquad [2.2]$$

11 Se asumió una proporción de raíces en los primeros 0,2 m de 20-30%, para los
 12 distintos cultivos (R:T = 0,25, promedio de valores informados por Álvarez y Steinbach,
 13 2006; Milesi-Delaye et al., 2013; Irizar et al., 2015). Para el caso de las pasturas, se siguió
 14 la propuesta de Poeplau (2016) para pasturas de corte. Los aportes de carbono aéreos y
 15 subterráneos de las condiciones cuasi-prístinas se estimaron utilizando la función
 16 *equilibrio* del modelo Roth-C (Coleman y Jenkinson, 1996), utilizando registros
 17 climáticos históricos mensuales (1968-2015) de la localidad de Pergamino.

18 **2.2.4. Determinaciones**

19 En cada lote se fijaron 3-5 estaciones de muestreo georreferenciadas
 20 (aproximadamente 1 estación cada 10 hectáreas homogéneas), dentro de ambientes
 21 homogéneos diferenciados a gabinete utilizando el software QGIS. Se emplearon como
 22 criterios de homogeneidad: la posición relativa y pendiente, ubicación sobre la misma
 23 serie y fase de suelo georreferenciada (Cartas de Suelo de la provincia de Bs.As. y Santa
 24 Fe), nivel de cobertura de rastrojo (apreciación visual a campo) y posición en micro

1 relieve. El número de estaciones de muestreo en cada caso dependió por lo tanto de la
2 superficie total del lote, de la heterogeneidad de ambientes diferenciados dentro del lote,
3 y de la superficie de los ambientes diferenciados. En cada estación de muestreo se
4 determinaron los siguientes indicadores edáficos:

- 5 - Concentración de carbono orgánico total del suelo por oxidación húmeda (g.kg^{-1} COS,
6 método Walkley y Black; en Nelson y Sommers, 1996) a profundidades de 0-0,05 m
7 y 0,05-0,2 m; e índice de estratificación de carbono (de Oliveira-Ferreira et al., 2013)
8 como la relación 0-0,05 m y 0,05-0,2 m. Se tomó una muestra compuesta (por diez
9 piques de barreno) en cada estación de muestreo.
- 10 - Contenido de carbono orgánico total del suelo (Mg.ha^{-1}) de 0-0,05 m y 0,05-0,2 m:
11 considerando la concentración de carbono orgánico total (g.kg^{-1}), la densidad aparente
12 superficial (Mg.m^{-3}), y la profundidad (m). Cada valor se corrigió por una masa
13 equivalente de suelo de referencia o masa equivalente para cada profundidad (Steffens
14 et al., 2008; Lee et al., 2009). La masa de suelo de referencia se estimó a partir de la
15 masa de suelo promedio 0-0,5 m y 0,05-0, 2 m de las condiciones cuasi-prístinas.
- 16 - Concentración de carbono orgánico particulado (COP; g.kg^{-1}) a una profundidad de 0-
17 0,05 m; con tamiz de 50 micrones (Cambardella y Elliot, 1993).
- 18 - Tasa de infiltración en flujo estacionario, a capacidad de campo, utilizando
19 permeámetro de disco (Perroux y White, 1988), en superficie y a los 0,1 m, con 3
20 submuestras por estación de muestreo.
- 21 - Resistencia a la penetración a campo utilizando penetrómetro manual (Modelo H4200,
22 Humboldt Mfg. Co., SchillerPark, Illinois, USA), cada 0,05 m hasta una profundidad
23 de 0,3 m, a capacidad de campo (3-5 días después de una lluvia de 20 mm o más); 3
24 submuestras por estación de muestreo. Se registró el valor máximo de resistencia o

1 pico observado en cada estrato (Sivarajan et al., 2018), y a su vez se agruparon los
2 resultados de 0-0,1 m (superficial) y 0,1-0,2 m (subsuperficial).

3 - Densidad aparente con el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), superficial (0-
4 0,1 m), y subsuperficial (0,1-0,2 m; subsuperficial), con 1 muestra por estación de
5 muestreo.

6 - Porosidad de aireación (PA), superficial (0-0,1 m), y subsuperficial (0,1-0,2 m;
7 subsuperficial), con 1 muestra sin disturbar por estación de muestreo, en cilindros de
8 0,05 de alto y 0,05 cm de diámetro. La PA se estimó a partir de la distribución de
9 tamaño de poros obtenido por curvas de retención hídrica con mesas de tensión
10 (Danielson y Sutherland, 1986). Se consideraron como poros de aireación a aquellos
11 con más de 30 μm de diámetro (Kay, 1990; Pulido Moncada et al., 2014), capaces de
12 retención de agua a tensiones de hasta 10 kPa. La PA (en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) se estimó entonces
13 como la diferencia ente el contenido volumétrico de humedad a saturación a tensión
14 de 0 kPa ($\Theta_{h\ 0\ \text{kPa}}$; en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) y el contenido volumétrico de humedad a una tensión
15 de 10 kPa ($\Theta_{h\ -10\ \text{kPa}}$; en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$):

$$16 \quad PA = \Theta_{h\ 0\ \text{kPa}} - \Theta_{h\ -10\ \text{kPa}} \quad [2.3]$$

17 Los resultados de los indicadores físicos fueron contrastados con los valores de referencia
18 y críticos para Argiudoles indicados por Pilatti y Orellana (2012). A su vez, se estimaron
19 valores de referencia para la densidad aparente, porosidad de aireación y conductividad
20 hidráulica saturada utilizando las funciones de pedo-transferencia propuestas por Saxton
21 y Rawls (2006), en condiciones no compactadas (i.e. factor de “densificación relativa” <
22 1,0). Para esto se usaron los datos de textura correspondientes a la serie de suelos de los
23 sitios de extracción (INTA, 2018), y el carbono orgánico promedio de 0,2 m de cada
24 lote/situación muestreada.

1 El estado de la estructura del suelo se complementó a través de una modificación de
2 carácter cuantitativo del método cualitativo de evaluación visual de estructura por “*drop-*
3 *test*” o prueba de estallido (VSA, Visual Soil Assessment; Shepherd, 2009; Mueller et al.,
4 2009; 2013). Para esto se extrajeron con pala y cuchillo muestras sin disturbar de 0,2 x
5 0,2 x 0,2 m del horizonte superficial, a contenidos de capacidad de campo o similar (75-
6 100% AU), representando un volumen de suelo comparable entre sitios de muestreo. La
7 masa de suelo extraída se arrojó desde una altura de 1,5 m sobre una superficie plana de
8 madera ubicada por debajo de un paño de tela de 1 x 0,5 m, y se separaron manualmente
9 los terrones o bloques resultantes luego de la ruptura mecánica, de acuerdo a su mayor
10 diámetro (medida de mayor longitud de extremo a extremo del bloque) en 3 clases:
11 mayores a 0,1 m (categoría “mayor tamaño”); bloques de 0,05-0,1 m (categoría
12 “intermedios”), y bloques menores a 0,05 m (categoría “bloques pequeños”). Se pesaron
13 con la humedad de extracción las distintas fracciones y se expresaron las proporciones
14 respecto al peso húmedo total. A través de esta metodología se buscó identificar la
15 presencia de tipos estructurales coincidentes con estructuras de tipo “ Δ ” masivas,
16 descritas para SD por De Battista et al (1994), Sasal (2012) y Boizard et al. (2017):
17 elevada cohesión, nula a escasa porosidad visible y caras de ruptura lisas de aspecto
18 continuo.

19 Siguiendo una aproximación similar a la propuesta por Álvarez et al. (2014), se estimó
20 la frecuencia de aparición de estructuras laminares (consolidadas, de más de 0,01 m de
21 espesor, y características similares a las estructuras de tipo “P” descritas por Boizard et
22 al., 2017) en cinco puntos de observación (0,2 m de profundidad) en cada estación de
23 muestreo, y se registró el espesor promedio (cm) de cada observación. Se calculó el grado
24 de desarrollo de estructuras laminares como un espesor ponderado, según esta ecuación
25 en cada estación de muestreo:

1 Espesor ponderado (cm) = Frecuencia (0-1) . Espesor promedio (cm) [2.4]

2 **2.2.5. Análisis estadístico**

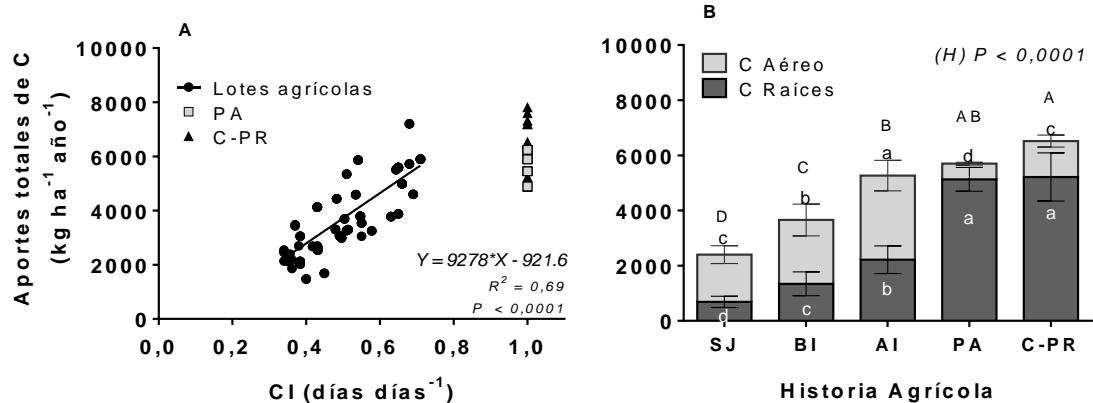
3 Se analizaron las diferencias asociadas a la historia agrícola a través de un análisis de
4 varianza (ANOVA) por modelos mixtos, utilizando el procedimiento *lme* del paquete
5 *nlme* (Pinheiro *et al.*, 2014) de R v 3.1.3 (R Development Core Team, 2015), para cada
6 profundidad de muestreo. El factor “historia agrícola” se consideró como efecto fijo,
7 mientras que los lotes/situaciones y estaciones de muestreo se consideraron como efectos
8 aleatorios. A su vez, el factor “estación de muestreo” fue anidado dentro del factor
9 “lote/situación”, anidado en “historia agrícola”. Se realizaron pruebas de comparaciones
10 múltiples por LSD Fisher con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$. El análisis se realizó
11 utilizando InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2011), como interfaz del paquete *nlme* de R. Se
12 analizaron las correlaciones entre las propiedades del suelo, el CI y los aportes de carbono
13 través del coeficiente de Pearson, utilizando el mismo paquete estadístico.

14 **2.3. Resultados**

15 **2.3.1. Historia agrícola: intensidad y aportes de carbono**

16 Los aportes de carbono estimados (aportes de C no humificado) variaron entre
17 ~1400 y 7800 kg C.ha⁻¹.año⁻¹, y se relacionaron significativamente y positivamente con la
18 intensidad de cultivos ($P<0,0001$, $r^2 = 0,69$; Fig. 2.2 A). Aquellos esquemas con un mayor
19 tiempo de ocupación del suelo con cultivos en crecimiento generaron mayores aportes de
20 carbono. Las situaciones tendientes a la monocultura de soja presentaron los menores
21 aportes de C, y las pasturas y las condiciones cuasi prístinas los mayores aportes
22 ($P<0,0001$; Fig. 2.2 B). Los lotes rotados presentaron valores intermedios, y las rotaciones
23 con un CI superior al 60% generaron aportes de C similares a las pasturas. Sin embargo,
24 mientras que en las situaciones puramente agrícolas los aportes estimados provinieron

1 principalmente del rastrojo (Fig. 2.2 B), en las situaciones con pasturas y cuasi-prístinas
 2 provinieron mayormente de la biomasa subterránea. Las estimaciones de aportes de C
 3 provenientes de raíces representaron un 28 % del aporte total de C en las situaciones de
 4 monocultura, entre un 37 - 42% en las rotaciones de distinta intensidad, y cercano al 80-
 5 90 % en situaciones cuasi-prístinas y de pasturas respectivamente.



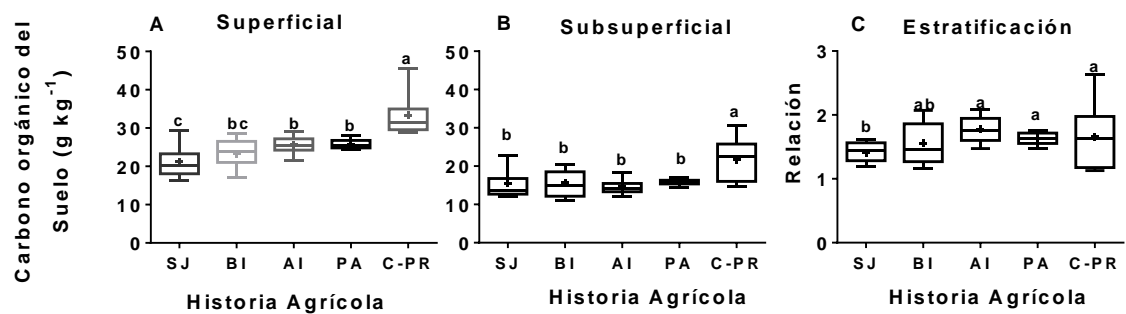
6

7 **Figura 2.2 (A):** Relación entre los aportes anuales de carbono promedio estimados a partir de la
 8 historia agrícola y el Índice de intensidad de cultivos (CI: días cultivo en crecimiento. días año⁻¹),
 9 para las diferentes secuencias muestreadas. La línea indica el ajuste lineal para las situaciones
 10 puramente agrícolas. Se indica la ecuación y coeficiente de ajuste, y significancia de la relación.
 11 **(B):** Aportes de carbono promedio estimados (por biomasa aérea o por raíces) para situaciones de
 12 monocultura de soja (SJ); rotaciones de baja intensidad (ROT BI); rotaciones de alta intensidad
 13 (ROT AI); pasturas (PA); y condiciones cuasi-prístinas (C-PR). Las letras minúsculas indican
 14 diferencias significativas ($P < 0,05$) entre historias agrícolas (H), en las estimaciones del aporte de
 15 carbono de raíces o el de carbono aéreo. Se indica la significancia de los efectos de la historia
 16 agrícola. Las letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre historias
 17 agrícolas en el aporte de carbono total. Las barras indican el desvío estándar.

18 2.3.2. Carbono orgánico del suelo (COS)

19 Los mayores niveles de COS en los primeros 0,05 m del suelo (Fig. 2.3) se
 20 observaron en las condiciones cuasi-prístinas. El COS 0-0,05 m resultó superior en
 21 rotaciones de mayor intensidad (AI) y condiciones de pastura (PA) respecto de las
 22 rotaciones tendientes a la monocultura. No se advirtieron diferencias significativas
 23 ($P > 0,05$) en el COS 0-0,05 m entre rotaciones de baja intensidad (BI) y rotaciones
 24 tendientes a la monocultura. En el estrato subsuperficial, únicamente se advirtieron
 25 diferencias significativas entre las situaciones productivas y las condiciones cuasi-

1 prístinas (Fig. 2.3 B). Del mismo modo, al considerar niveles de todo el estrato 0-0,2 m,
 2 únicamente se advirtieron diferencias entre las condiciones cuasi-prístinas y las
 3 situaciones productivas ($P < 0,05$; $25,2 \text{ g kg}^{-1}$ en C-PR vs. $17,2 - 18,6 \text{ g kg}^{-1}$ en SJ a PA).
 4 La misma tendencia se observó al comparar el contenido de C de 0-0,2 m corregidos en
 5 masa equivalente ($P < 0,05$; $58,36 \text{ Mg.ha}^{-1}$ en C-PR vs. $41,62-43,66 \text{ Mg.ha}^{-1}$ en SJ a PA).
 6 Todos los sitios muestreados presentaron una estratificación del COS (relación COS
 7 superficial: COS subsuperficial > 1 , Fig. 2.3 C). Sin embargo, una mayor ocupación del
 8 suelo favoreció una mayor estratificación del COS respecto de las situaciones de
 9 monocultura.

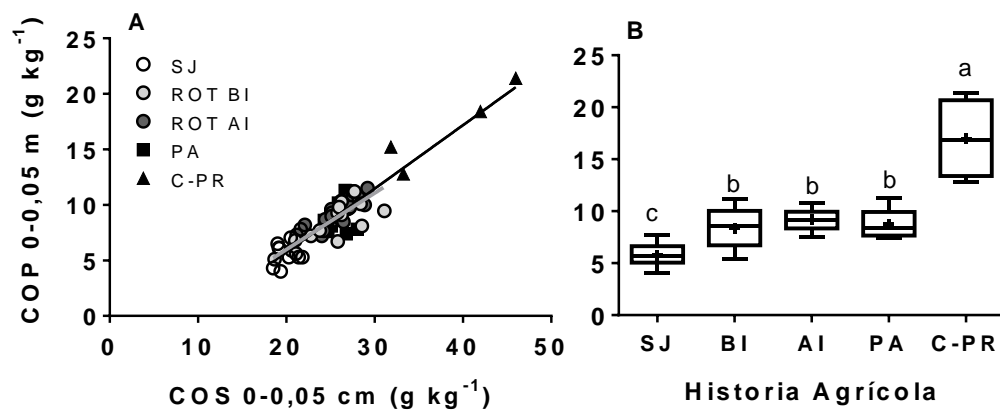


10 **Figura 2.3** (A) Contenido de carbono orgánico superficial del suelo (0-0,05 m), (B) carbono
 11 orgánico subsuperficial (0,05-0,20 m), y (C) relación de estratificación del carbono orgánico
 12 (COS superficial : COS subsuperficial); para situaciones de monocultura de soja (SJ); rotaciones
 13 de baja intensidad (ROT BI); rotaciones de alta intensidad (ROT AI); pasturas (PA); y
 14 condiciones cuasi-prístinas (C-PR). Las barras indican los percentiles 10 y 90. Letras distintas
 15 indican diferencias significativas entre historias agrícolas (H) ($P < 0,05$).
 16

17 Alrededor de un 35 % del carbono orgánico total superficial (rango 20-47%)
 18 estuvo comprendido por las fracciones más lábiles (carbono orgánico particulado; COP).
 19 Mayores contenidos de carbono orgánico superficial se relacionaron positivamente
 20 ($P < 0,0001$) con mayores contenidos de carbono lábil, tanto al considerar la totalidad de
 21 las situaciones muestreadas (Fig. 2.4 A, línea llena negra; $r^2 = 0,91$), como al considerar
 22 sólo las situaciones productivas (i.e. excluyendo condiciones cuasi prístinas; Fig. 2.4 A,
 23 línea llena gris; $r^2 = 0,69$). Las rotaciones más intensas y con pasturas presentaron mayores
 24 niveles de COP que las secuencias tendientes a la monocultura ($P < 0,0001$; Fig. 2.4 B),

1 aunque no se observaron diferencias significativas entre situaciones productivas con un
 2 índice de intensificación mayor a 0,45. Las condiciones cuasi-prístinas mostraron la
 3 mayor acumulación de COP superficial de los distintos casos analizados.

4



5

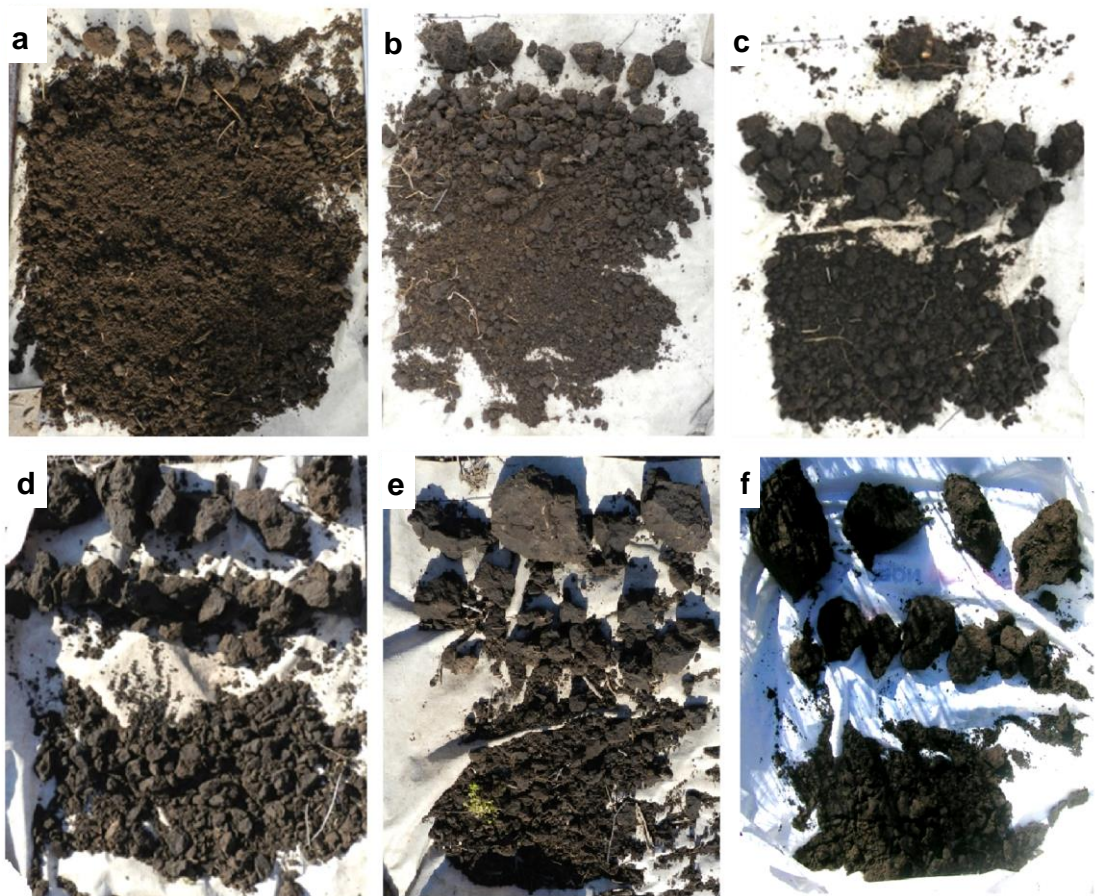
6 **Figura 2.4 (A)** Relación entre el carbono orgánico total superficial (COS) y el carbono orgánico
 7 particulado superficial (COP). Los puntos representan estaciones de muestreo dentro de un lote,
 8 para situaciones de monocultura de soja (SJ); rotaciones de baja intensidad (ROT BI); rotaciones
 9 de alta intensidad (ROT AI); pasturas (P); y condiciones cuasi-prístinas (C-PR). Se muestran las
 10 rectas de ajuste de la regresión lineal para todos los casos (línea llena negra; $y=0,57x-5,69$;
 11 $R^2=0,91$) o para las situaciones productivas, excluyendo a las condiciones C-PR (línea llena gris;
 12 $y=0,51x-4,21$; $R^2=0,69$). **(B)** Contenido de COP superficial para las distintas situaciones indicadas
 13 en (A). Las barras indican los percentiles 10 y 90. Letras distintas indican diferencias
 14 significativas entre historias agrícolas ($P<0,05$).

15 2.3.3. Estructura por prueba de estallido y tipos estructurales

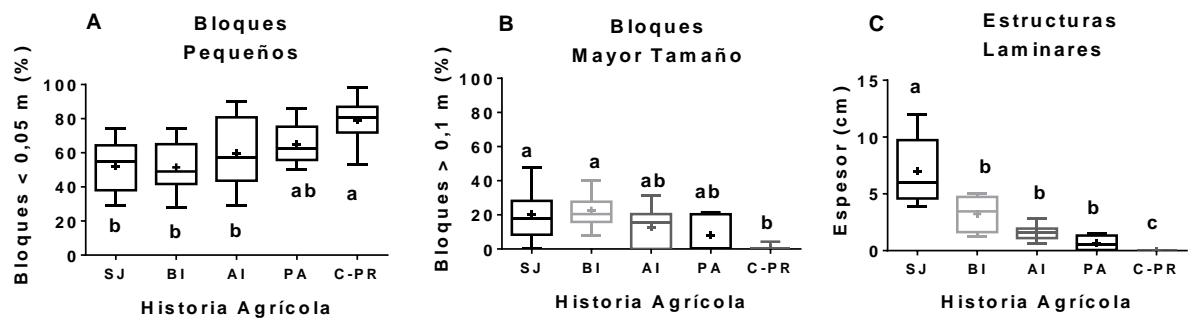
16 La estructura de los primeros 0,2 m varió ente situaciones, e incluso entre muestras
 17 dentro de los lotes. La Figura 2.5 ejemplifica la fragmentación en bloques de distintos
 18 tamaños luego de la evaluación por prueba de estallido. Aquellas situaciones donde se
 19 observó a campo un predominio de tipos estructurales granulares o en bloques
 20 subangulares pequeños al momento de la extracción, coincidieron con una mayor
 21 proporción de bloques con diámetros menores a 0,05 m luego de la prueba. Las imágenes
 22 a y b de la Figura 2.5 ejemplifican condiciones con una mayor proporción de este tipo de
 23 bloques pequeños. En los distintos casos analizados, los bloques de más de 0,1 m luego
 24 de la fragmentación mecánica presentaron características similares a las estructuras

1 descriptas como tipo “ Δ ” (tipo estructural masivo) en De Battista et al. (1994), Sasal
2 (2012) y Boizard et al. (2017). Las imágenes “e” y “f” de la Figura 2.5 ejemplifican
3 condiciones de mayor proporción de estos bloques de mayor tamaño ($> 0,1$ m), con escasa
4 porosidad visible.

5 Únicamente las situaciones de pasturas presentaron una distribución de tamaño de
6 bloques que no difirió estadísticamente respecto a las situaciones cuasi-prístinas (Fig. 2.6
7 A y B). Se observó la presencia de bloques de características masivas (coincidentes con
8 bloques $> 0,1$ m de diámetro) en todas las condiciones productivas. Sin embargo, las
9 situaciones de mayor intensidad presentaron una mayor proporción de muestreos con un
10 menor porcentaje de estructuras masivas (Fig. 2.6 B).

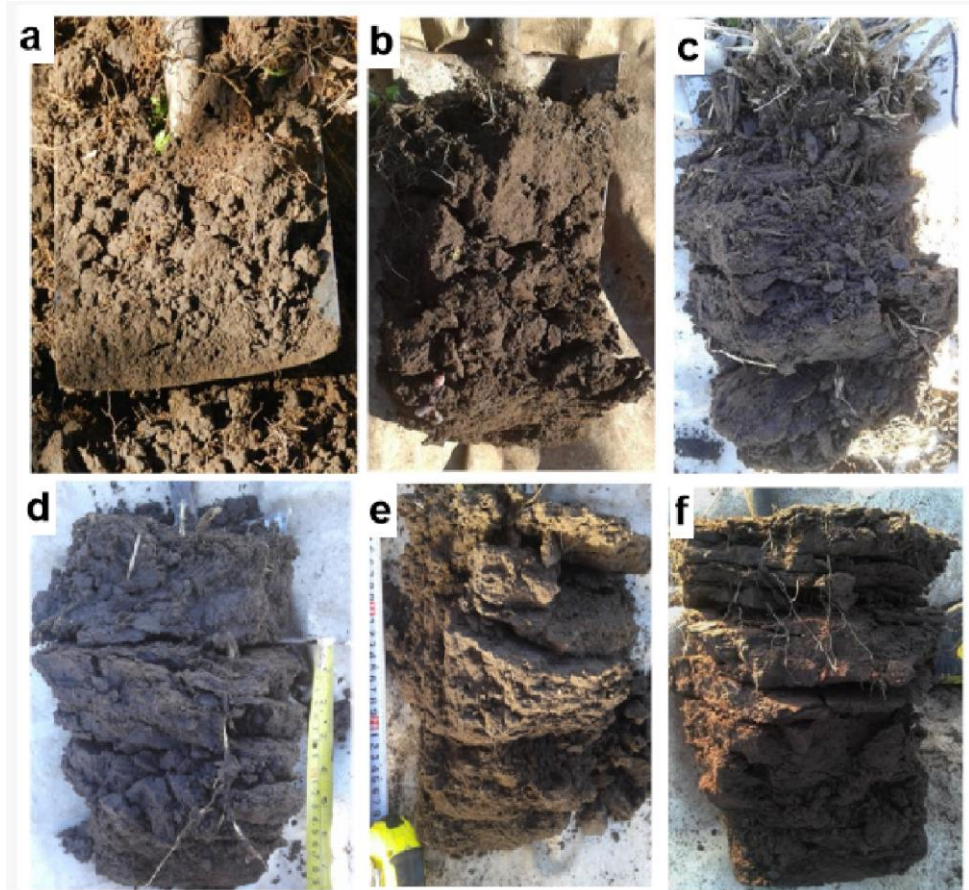


11
12 **Figura 2.5** Fragmentación en bloques de distinto tamaño a través del método de la prueba de
13 estallido modificada, ordenadas (a-f) de acuerdo con la presencia decreciente de bloques de menor
14 tamaño ($< 0,05$ m), y presencia creciente de bloques de mayor tamaño ($> 0,1$ m).



1
 2 **Figura 2.6** (A) Proporción de bloques diámetro menor a 0,05 m y (B) de bloques de diámetro
 3 superior a 0,1 m, luego de ruptura por prueba de estallido. (C) Espesor ponderado de estructuras
 4 laminares; para situaciones de monocultura de soja (SJ); rotaciones de baja intensidad (ROT BI);
 5 rotaciones de alta intensidad (ROT AI); pasturas (PA); y condiciones cuasi-prístinas (C-PR). Las
 6 barras indican los percentiles 10 y 90. Letras distintas indican diferencias significativas entre
 7 historias agrícolas ($P < 0,05$).

8 Se observaron también diferencias entre situaciones en la presencia de estructuras
 9 de tipo laminar. La Figura 2.7 ejemplifica la presencia de tipos estructurales laminares de
 10 distinto espesor en los primeros 0,2 m. Únicamente las situaciones cuasi-prístinas no
 11 presentaron un desarrollo apreciable de estos tipos estructurales (similar a Fig. 2.7 a). En
 12 general, los lotes de mayor intensidad y pasturas presentaron tipos laminares de menor
 13 espesor, y ubicados a una profundidad variable entre los 0,05-0,10 m (similar a imágenes
 14 b y c de la Figura 2.7); mientras que aquellos lotes con baja intensidad de cultivos y
 15 predominio de soja presentaron tipos estructurales laminares de mayor espesor, y en
 16 muchos casos desde la superficie (similar a imagen f de la Figura 2.7). Las secuencias de
 17 monocultura presentaron así un mayor espesor ponderado (frecuencia x espesor) ($P <$
 18 $0,05$) que las otras condiciones (Fig. 2.6 C).



1

2 **Figura 2.7** Presencia de estructuras laminares en los primeros 0,2 m, ordenadas (a-f) de acuerdo
 3 con su desarrollo creciente.

4 **2.3.4. Propiedades físicas del suelo**

5 Todas las secuencias productivas presentaron valores de densidad aparente
 6 superiores ($P < 0,0001$) a las situaciones cuasi-prístinas (27-17% mayor, superficial y
 7 subsuperficial respectivamente; Fig. 2.8 A y B). A su vez, en las distintas secuencias
 8 productivas se observaron valores de densidad aparente en el estrato subsuperficial
 9 superiores a los valores críticos sugeridos para suelos Argiudoles (Pilatti y de Orellana,
 10 2000; 2012), o aquellos valores de referencia estimados por funciones de pedo-
 11 transferencia (Saxton y Rawls, 2006) para suelos no densificados de esas características
 12 texturales y contenidos de materia orgánica (rango de valores umbrales $\sim 1.35-1.42 \text{ Mg}$
 13 m^{-3} ; Fig. 2.8 B).

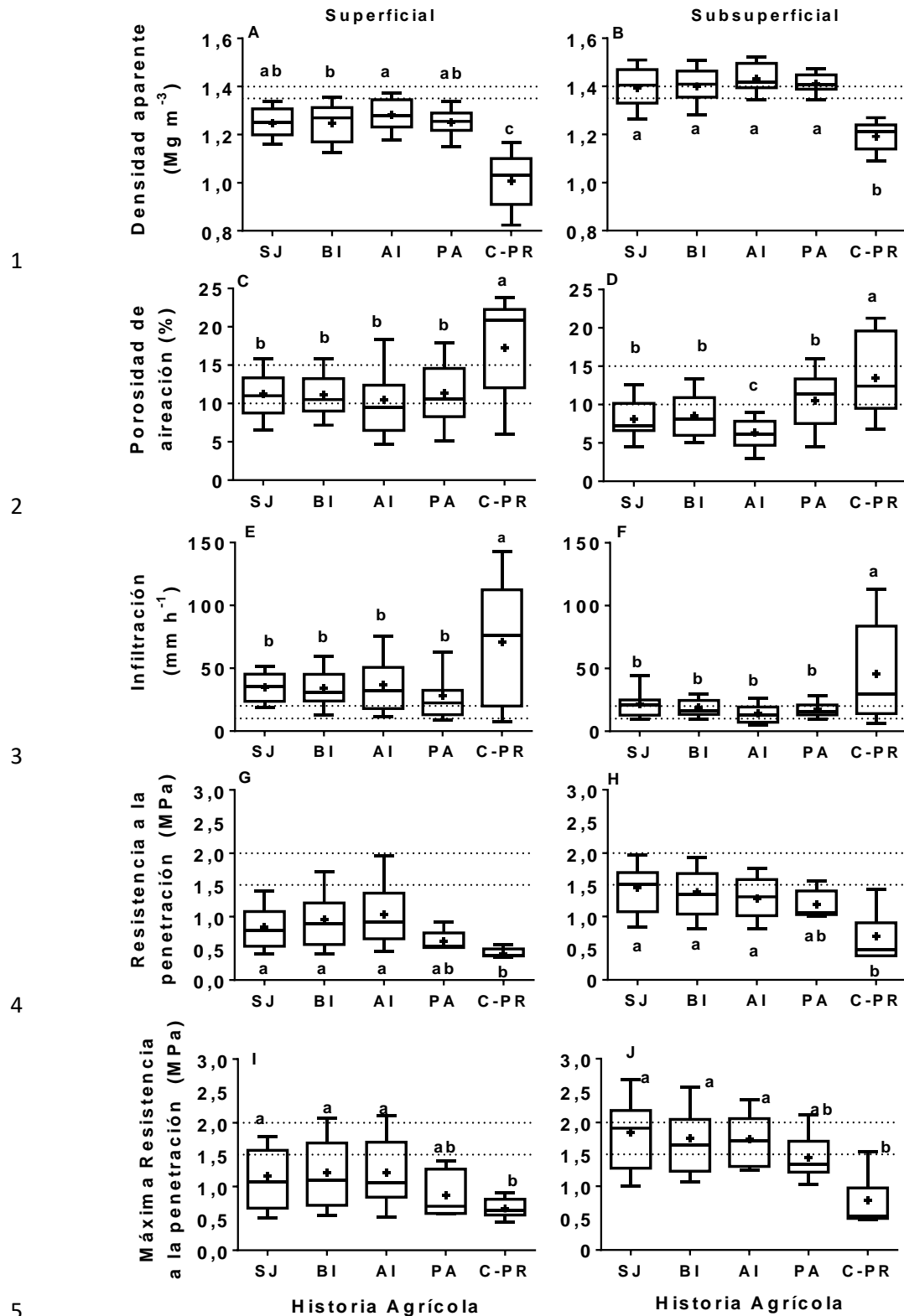
1 En las distintas secuencias, la porosidad de aireación del suelo resultó
2 significativamente inferior ($P < 0,0001$) a las condiciones cuasi-prístinas (en promedio 34-
3 41% menor, superficial y subsuperficial respectivamente; Fig. 2.8 C y D), y en general
4 inferior a los umbrales de 10-15% sugeridos para un óptimo funcionamiento del sistema
5 radical y otras funciones del suelo (Gupta y Allmaras, 1987; Taboada et al., 1998; Pilatti
6 y de Orellana, 2000; 2012). Esto fue especialmente marcado en el estrato subsuperficial.
7 A excepción de las secuencias con pasturas, cerca de un 75% de las muestras observadas
8 en las otras secuencias presentaron niveles de aireación menores al 10% en este estrato
9 (Fig. 2.8 D). La proporción de macro-poros resultó incluso menor a otras secuencias en
10 las rotaciones de alta intensidad, especialmente en el estrato subsuperficial.

11 La tasa de infiltración de agua en las distintas secuencias resultó
12 significativamente menor ($P < 0,0001$) a la observada en condiciones cuasi-prístinas (en
13 promedio 62-72% menor, superficial y subsuperficial respectivamente; Fig. 2.8 E y F).
14 No se observaron diferencias entre secuencias productivas en ninguno de los estratos
15 muestreados. Por lo general, las tasas de infiltración superficial y subsuperficial superaron
16 a los valores de referencia de infiltración básica (Pilatti y de Orellana, 2012), o a los de
17 conductividad hidráulica saturada de referencia estimados por funciones de pedo-
18 transferencia (Saxton y Rawls, 2006) para suelos con esas características de textura (~15-
19 20 mm.h⁻¹).

20 La resistencia a la penetración determinada a capacidad de campo, promedio de
21 cada estrato de 0,1 m, fue significativamente superior ($P < 0,0001$) en las secuencias
22 productivas a la observada en condiciones cuasi-prístinas (en promedio 72-87% mayor,
23 superficial y subsuperficial respectivamente; Fig. 2.8 G y H). Este indicador tuvo una
24 mayor variabilidad que la densidad aparente. Únicamente las pasturas presentaron valores
25 de resistencia que no difirieron estadísticamente de las condiciones prístinas, en especial

1 en el estrato superficial (Fig. 2.8 H). Las otras secuencias mostraron valores promedio
2 similares, y que en algunas muestras superaron a los límites críticos usualmente aceptados
3 como limitantes para el normal crecimiento de raíces (~1,5-2,0 MPa; Bengough et al.,
4 2011), en especial en el estrato subsuperficial.

5 Los valores máximos de resistencia a la penetración observados en cada estrato
6 de 0,10 m resultaron significativamente superiores ($P < 0,0001$) en las secuencias
7 productivas a los observados en condiciones cuasi-prístinas (Fig. 2.8 I y J). Las
8 diferencias entre situaciones productivas resultaron similares a las observadas en la
9 resistencia promedio: sólo las pasturas presentaron valores de resistencia máxima que no
10 difirieron estadísticamente de las condiciones prístinas. En el resto de las situaciones
11 productivas, los valores máximos de resistencia superaron en general el umbral de 1,5
12 MPa mencionado anteriormente. Más de un 25% de las muestras obtenidas en las
13 rotaciones puramente agrícolas superaron los 2 MPa en el estrato subsuperficial.

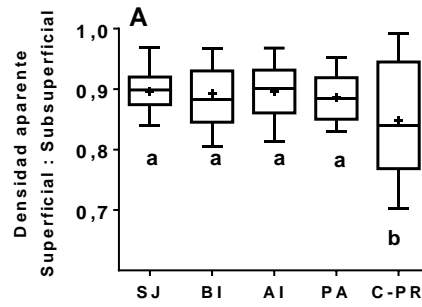


6 **Figura 2.8** Densidad aparente (A, B), porosidad de aireación (C,D), infiltración (E,F), resistencia
7 a la penetración promedio (G,H), y máxima (I,J); en el estrato superficial (0-0,1m; paneles
8 izquierda), y subsuperficial (0,1-0,2 m, paneles derecha), para situaciones de monocultura de soja
9 (SJ); rotaciones de baja intensidad (ROT BI); alta intensidad (ROT AI); pasturas (PA); y
10 condiciones cuasi-prístinas (C-PR). Las barras de las cajas indican los percentiles 10 y 90. Letras
11 distintas indican diferencias significativas entre historias agrícolas ($P < 0,05$). Las líneas punteadas
12 indican el rango de valores críticos para los distintos indicadores (Taboada et al., 1998; Saxton y
13 Rawls, 2006; Bengough et al., 2011; Pilatti y de Orellana, 2012).

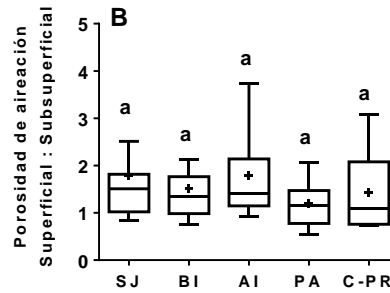
1 Se observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los valores observados en
2 el estrato superficial y subsuperficial en los distintos indicadores físicos. Sin embargo,
3 algunos indicadores mostraron una estratificación más marcada que otros: mientras que
4 la densidad aparente superficial resultó en promedio entre 10-15% menor que la
5 subsuperficial, los niveles de infiltración superficial resultaron en promedio entre 2 y 3
6 veces superiores a los observados en el estrato subsuperficial (Fig. 2.9). En líneas
7 generales, la estratificación no indicó diferencias entre historias agrícolas. Sólo se
8 observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) en cuanto a la estratificación de la densidad
9 aparente entre las condiciones cuasi-prístinas y el resto de las condiciones muestreadas
10 (Fig. 2.9 A), y en la estratificación de la infiltración (Fig. 2.9 C) entre rotaciones de alta
11 intensidad y el resto de las situaciones. Sin embargo, la mayor estratificación en las
12 rotaciones de alta intensidad no fue producto de mejoras en la infiltración superficial sino
13 de valores reducidos de infiltración subsuperficial.

14

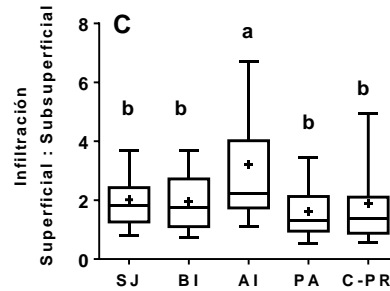
1



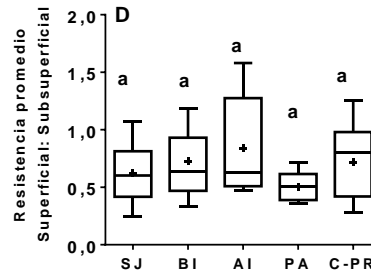
2



3

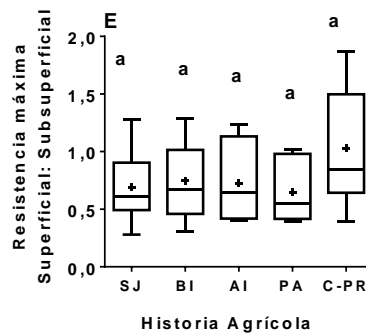


4



5

6 **Figura 2.9** Relación entre los valores observados en el estrato superficial y los valores
 7 observados en el estrato subsuperficial para la densidad aparente (A), porosidad de aireación (B),
 8 infiltración (C), resistencia a la penetración promedio (D), y máxima (E); en situaciones de
 9 monocultura de soja (SJ); rotaciones de baja intensidad (ROT BI); alta intensidad (ROT AI);
 10 pasturas (PA); y condiciones cuasi-prístinas (C-PR). Las barras de las cajas indican los percentiles
 11 10 y 90. Letras distintas indican diferencias significativas entre historias agrícolas ($P < 0,05$).



Historia Agrícola

1 Todos los indicadores físicos mostraron entonces diferencias significativas entre
2 las situaciones productivas y las condiciones cuasi-prístinas. Sin embargo, algunos
3 indicadores mostraron mayores diferencias relativas. Mientras que los niveles de carbono
4 orgánico total resultaron en promedio un 28% menores (tanto en el estrato superficial
5 como subsuperficial), el carbono orgánico particulado fue un 51% más bajo en las
6 secuencias productivas que en las condiciones cuasi-prístinas de referencia. La densidad
7 aparente fue un 27% y 17% mayor (superficial y subsuperficial respectivamente); la
8 porosidad de aireación fue un 34-41% menor (superficial y subsuperficial
9 respectivamente), y la infiltración fue un 62-72% menor (superficial y subsuperficial
10 respectivamente). La resistencia a la penetración fue el parámetro físico que mayores
11 diferencias presentó respecto a las condiciones cuasi-prístinas: las secuencias productivas
12 presentaron en promedio niveles de resistencia entre 72-87% superiores (superficial y
13 subsuperficial respectivamente).

14 **2.3.5. Relaciones entre indicadores físicos y la historia agrícola. Relaciones entre** 15 **indicadores.**

16 Una mayor intensidad en el tiempo de ocupación del suelo se tradujo en mayores
17 aportes de carbono de acuerdo a las estimaciones ($r=0,80$; $P<0,001$). Sin embargo, en
18 líneas generales, los distintos indicadores de estado físico de suelo estuvieron más
19 asociados al nivel de intensidad que a los aportes estimados de C (Cuadro 2.2).
20 Prácticamente todos los indicadores de suelo se correlacionaron significativamente con
21 la intensidad de ocupación del suelo. Sin embargo, al excluir las condiciones cuasi-
22 prístinas del análisis (resultados entre paréntesis, Cuadro 2.2), únicamente el COS
23 superficial, el COP y los indicadores referentes a los tipos estructurales (estructuras
24 laminares, distribución de bloques) se correlacionaron significativamente con la
25 intensidad de la rotación. Rotaciones más intensas presentaron mayores niveles de

1 carbono total y lábil superficial, menores espesores y frecuencia de estructuras laminares,
2 mayores proporciones de bloques de menor tamaño, y menos proporción de bloques
3 masivos. El COS superficial, el COP y el desarrollo de estructuras laminares se relacionó
4 también con los niveles de aportes de carbono de la rotación. Sin embargo, considerando
5 sólo las situaciones productivas, ni un mayor tiempo de ocupación del suelo ni mayores
6 aportes de carbono se relacionaron con la densidad aparente, resistencia a la penetración,
7 infiltración o porosidad de aireación.

8

1 **Cuadro 2.2.** Coeficientes de correlación entre el índice de intensificación de la rotación y los
 2 aportes de carbono (C), y los distintos indicadores físicos medidos en el estrato superficial (0-
 3 0,1m), subsuperficial (0,1-0,2m) o en el total de 0-0,2 m: carbono orgánico del suelo, carbono
 4 orgánico particulado, estructuras laminares, bloques >10 cm, bloques menores < 5 cm, densidad
 5 aparente, resistencia a la penetración, porosidad de aireación e infiltración básica. *, **, ***, y ns
 6 indican la significancia de la correlación (para P<0,0001; P<0,01; P<0,05 y P>0,05
 7 respectivamente). Entre paréntesis se indican los coeficientes de correlación y su significancia al
 8 excluir a las condiciones cuasi-prístinas del análisis.

Estrato	Indicador	Índice de intensificación	Aporte anual de C
Superficial (0-0,1 m)	C orgánico total del suelo	0,51*** (0,29**)	0,63*** (0,55 ***)
	C orgánico particulado	0,51*** (0,48***)	0,45***(0,46***)
	Densidad aparente	-0,27*** (0,05 ns)	-0,15 ns (0,16 ns)
	Resistencia a la penetración	-0,19 * (0,07ns)	-0,09 ns (0,15 ns)
	Porosidad de aireación	0,15 ns (-0,05 ns)	0,07 ns (-0,08 ns)
	Infiltración	0,2 * (-0,12 ns)	0,14 ns (-0,09 ns)
Subsuperficial (0,1-0,2 m)	C orgánico total del suelo	0,19* (-0,09 ns)	0,24* (0,01 ns)
	Densidad aparente	-0,21* (0,1 ns)	-0,16 ns (0,12 ns)
	Resistencia a la penetración	-0,35 *** (-0,12 ns)	-0,28 ** (-0,09 ns)
	Porosidad de aireación	0,3 *** (0,11 ns)	0,1 ns (-0,11 ns)
	Infiltración	0,19 * (-0,21 ns)	0,14 ns (-0,18 ns)
Estrato 0- 0,2m	Estructuras laminares	-0,59*** (-0,58 ***)	-0,6*** (-0,58 ***)
	Bloques >0,1m	-0,45*** (-0,28**)	-0,29** (-0,11 ns)
	Bloques <0,05 cm	0,43*** (0,27*)	0,26** (0,1 ns)

9

10 El Cuadro 2.3 resume las relaciones entre los distintos indicadores, analizando en
 11 conjunto la información de los distintos estratos. Mayores niveles de COS se relacionaron
 12 con mayores niveles de COP, tasas de infiltración más elevadas, una mayor porosidad de
 13 aireación, y menores niveles de densidad aparente y resistencia a la penetración. No se
 14 observaron relaciones significativas entre el COS y los tipos estructurales presentes,
 15 aunque mayores niveles de COP coincidieron con un menor desarrollo de estructuras
 16 laminares, y una mayor proporción de bloques de menor tamaño. La densificación del
 17 suelo afectó otras propiedades, y mayores niveles de densidad aparente se asociaron a

1 menores tasas de infiltración y menor porosidad de aireación, y a mayores niveles de
2 resistencia a la penetración. Una mayor densidad aparente se asoció a una mayor
3 proporción de bloques masivos, y menos bloques pequeños, aunque no se observaron
4 relaciones entre la densidad aparente y el desarrollo de estructuras laminares. En líneas
5 generales, las tendencias entre indicadores se mantuvieron al excluir las condiciones
6 cuasi-prístinas del análisis (resultados entre paréntesis Cuadro 2.3), en especial respecto
7 a la relación del COS, densidad aparente y otros atributos funcionales.

8

Cuadro 2.3. Matriz de correlaciones entre los distintos indicadores físicos (todos los estratos de medición): carbono orgánico total del suelo, carbono orgánico particulado, estructuras laminares, bloques >10cm, bloques menores < 5cm, densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad de aireación e infiltración básica. Los valores numéricos indican los coeficientes de correlación de Pearson, y *,**,***, y ns indican la significancia de la correlación (para P<0,0001; P<0,01; P<0,05 y P>0,05 respectivamente). Entre paréntesis se indican los coeficientes de correlación de Pearson y su significancia al excluir a las condiciones cuasi-prístinas del análisis.

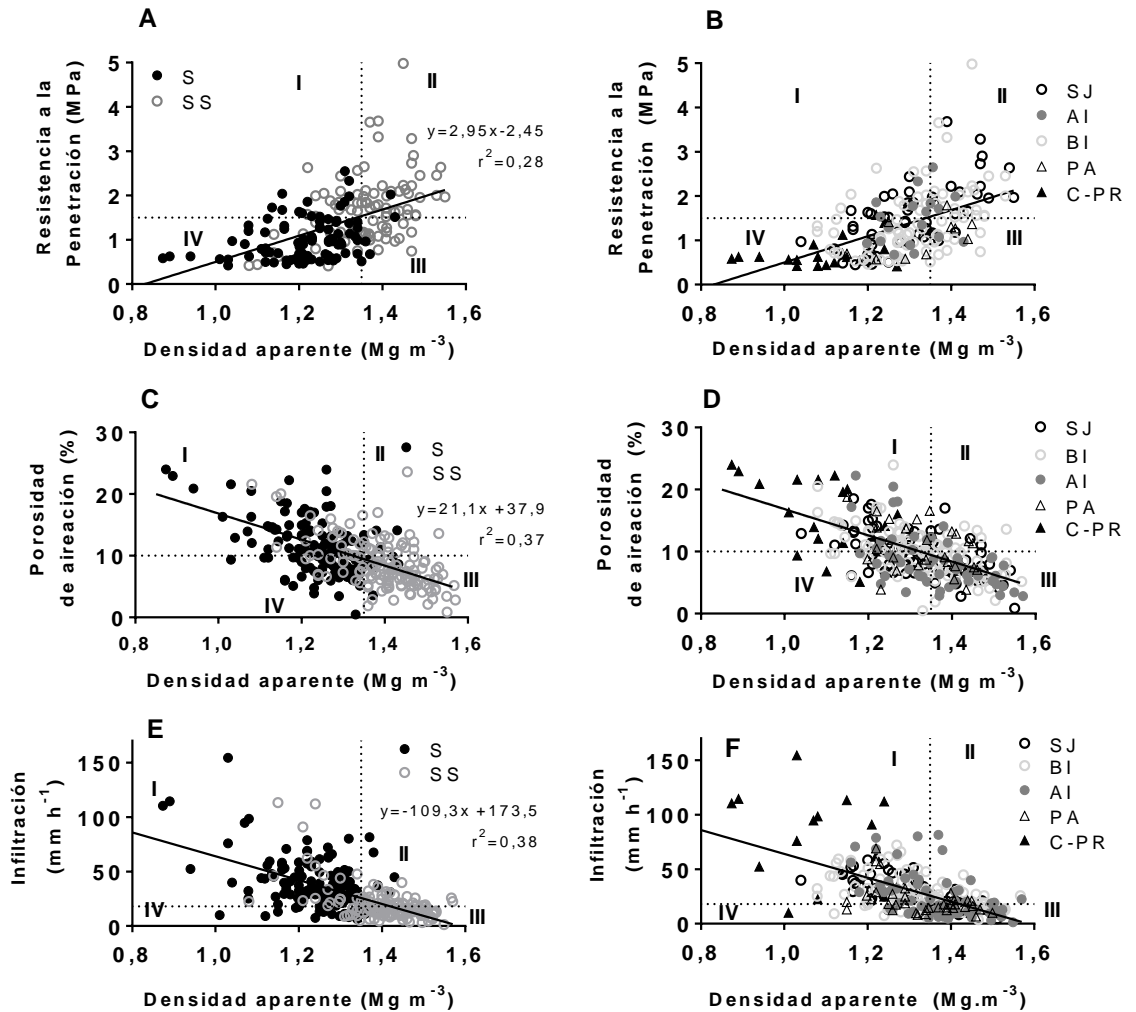
	Carbono orgánico total	Carbono orgánico particulado	E. laminares	Bloques > 10 cm	Bloques < 5cm	Densidad aparente	Resistencia a la penetración	Porosidad de aireación
Carbono orgánico particulado	0,93*** (0,83***)							
E. Laminares	-0,16 ns (-0,07 ns)	-0,81*** (-0,38 ns)						
Bloques > 10 cm	-0,03 ns (0,19 ns)	-0,51 ns (0,23 ns)	0,0049 ns (-0,02 ns)					
Bloques < 5cm	-0,04 ns (-0,29ns)	0,71* (-0,37 ns)	-0,03 ns (0,03 ns)	-0,83*** (-0,83 ***)				
Densidad aparente	-0,72 *** (-0,68***)	-0,61*** (-0,34*)	-0,0029 ns (-0,08 ns)	0,24*** (0,05)	-0,21 *** (-0,01 ns)			
Resistencia a la penetración	-0,38 *** (-0,5***)	-0,45 ns (0,53 ns)	0,09 ns (0,05 ns)	0,18* (0,04 ns)	-0,14* (0,01 ns)	0,51 *** (0,43***)		
Porosidad de aireación	0,37 *** (0,29***)	0,21 ns (0,07 ns)	-0,16 ns (-0,04 ns)	-0,29*** (-0,12 ns)	0,27 *** (0,1 ns)	-0,63 *** (-0,54***)	0,45 *** (0,31***)	
Infiltración	0,55 *** (-0,55***)	0,41** (0,27*)	-0,07 ns (0,06 ns)	-0,32*** (-0,01 ns)	0,3 *** (-0,12 ns)	-0,62 *** (-0,51***)	-0,35 *** (-0,25***)	-0,45 *** (-0,3***)

1 Sin embargo, no todos los sitios muestreados con niveles de densidad aparente
2 superiores al umbral de referencia de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ (Fig. 2.8; tomado de Pilatti y de
3 Orellana, 2012) presentaron valores considerados como limitantes de resistencia a la
4 penetración ($>1,5\text{-}2,0 \text{ MPa}$; Bengough et al., 2011), (Fig. 2.11 A y B). Del mismo modo,
5 se observaron valores de resistencia a la penetración considerados como críticos
6 correspondientes valores de densidad aparente muy por debajo de $1,35 \text{ Mg.m}^{-3}$
7 (Cuadrante I, Fig. 2.11 A y B). A niveles crecientes de densidad aparente se observaron
8 no sólo mayores niveles promedio de resistencia, sino también valores máximos más
9 elevados. De los registros con niveles de densidad aparente mayores a $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$;
10 (ubicados en Cuadrantes II y III de la Fig. 2.11 A y B), cerca de un 63% presentaron
11 niveles de resistencia a la penetración superiores $1,5 \text{ MPa}$ (Cuadrante II de la Fig. 2.11 A
12 y B). Estos registros con niveles de densidad aparente y de resistencia a la penetración
13 por encima de los umbrales de referencia representaron el 22% del total de las muestras.
14 Prácticamente todos estos registros correspondieron al estrato subsuperficial (Fig. 2.11
15 A), aunque se observaron en secuencias con distinto grado de intensificación (Fig. 2.11
16 B).

17 Tanto la porosidad de aireación promedio como la variabilidad y los máximos
18 observados en este parámetro se redujeron con niveles de densidad aparente crecientes
19 (Fig. 2.11 C y D). Cerca de un 77% de las muestras con niveles de densidad aparente por
20 encima del umbral de referencia (Fig. 2.10 C y D Cuadrantes II y III) presentaron valores
21 de porosidad de aireación inferiores al umbral crítico de referencia de 10% del volumen
22 de suelo (Fig. 2.11 C y D; cuadrante III). Alrededor de un 31% del total de muestras
23 presentaron valores de densidad por encima del umbral, y de porosidad de aireación por
24 debajo del nivel crítico de referencia. Al igual que en el caso de la resistencia a la
25 penetración, estas muestras se correspondieron principalmente con las determinaciones

1 del estrato subsuperficial. Aunque se observaron valores de porosidad menores a los
2 niveles críticos en distintas secuencias (a excepción de las condiciones cuasi-prístinas),
3 los registros con densidades mayores a $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ y porosidad de aireación inferior a
4 10% del volumen de suelo (cuadrante III, Fig. 2.11 D) correspondieron principalmente a
5 las rotaciones de alta intensidad.

6 Al igual que en el caso de porosidad de aireación, tanto la infiltración promedio
7 como la variabilidad y los máximos observados resultaron menores a niveles crecientes
8 de densidad aparente (Fig. 2.11 E y F). Cerca de un 60% de las muestras con densidad
9 aparente superior al umbral presentaron tasas de infiltración menores a los niveles de
10 referencia de 20 mm. h^{-1} (Fig. 2.11 E y F; cuadrante III). Las muestras con niveles de
11 densidad aparente por encima del umbral y de infiltración por debajo de los niveles de
12 referencia representaron alrededor del 25% del total de muestras. Esto se observó
13 principalmente en el estrato subsuperficial, y en las distintas secuencias exceptuando las
14 condiciones cuasi-prístinas. De este modo, con niveles de densidad aparente mayores a
15 $1,35 \text{ Mg.m}^{-3}$, alguna de las propiedades funcionales (referentes al movimiento de agua,
16 capacidad de aireación, o aptitud para el crecimiento de raíces) estuvo siempre fuera de
17 los rangos óptimos. Cerca de un 92% de las muestras con densidad aparente superior al
18 umbral, y alrededor de 32% del total de los registros, presentaron niveles de resistencia a
19 la penetración, porosidad de aireación y/o de infiltración más allá de los valores sugeridos
20 como críticos.



1
 2 **Figura 2.10** Relación entre la densidad aparente del suelo y: (A, B) la resistencia a la penetración;
 3 (C-D) la porosidad de aireación; y (E-F) la infiltración; de acuerdo a la profundidad de muestreo,
 4 en los paneles de la izquierda (S = estratos superficiales, SS = subsuperficiales); o de acuerdo a
 5 la historia agrícola en paneles de la derecha (SJ= monocultura de soja; ROT BI = rotaciones de
 6 baja intensidad; ROT AI = rotaciones de alta intensidad; PA = pasturas; y C-PR = condiciones
 7 cuasi-prístinas). Las líneas punteadas representan los umbrales críticos de referencia sugeridos
 8 para densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad de aireación e infiltración,
 9 descritos en el texto (Taboada et al., 1998; Saxton y Rawls, 2006; Bengough et al., 2011; Pilatti
 10 y de Orellana, 2012). Las líneas llenas indican la recta de ajuste por regresión lineal para todos
 11 los casos muestreados. Se indican las funciones y coeficientes de ajuste (r^2) de la relación lineal
 12 en cada caso. Se indican los cuadrantes I a IV para facilitar la interpretación de resultados.

13

14 **2.4. Discusión**

15 Los resultados mostraron que una mayor intensidad de las secuencias productivas
 16 aumentó los aportes de carbono al sistema. Rotaciones más intensas podrían haber
 17 limitado la oferta de agua para los cultivos estivales e implicar menores rendimientos y
 18 aportes de materia seca y carbono total al sistema, pero no fue el caso en estos ambientes.

1 Como observaran otros autores también en climas húmedos, esquemas más intensos
2 favorecen una mayor utilización de la oferta total de agua y radiación del ambiente
3 (Caviglia et al., 2004 a y b; Caviglia et al., 2013), y esto permite elevar la producción
4 total de biomasa, y aumentar los aportes de residuos al suelo (Novelli et al., 2017). Estos
5 mayores aportes de carbono en las secuencias más intensas no se tradujeron en
6 incrementos significativos de las concentraciones o en los niveles de carbono total,
7 aunque favorecieron la acumulación de carbono en los primeros cm (Fig. 2.3 B), respecto
8 de las condiciones de monocultura (Fig. 2.3C). Estos resultados no han reunido suficiente
9 evidencia para proceder a rechazar la primera hipótesis planteada.

10 La no remoción de los rastrojos, promueve una mayor estratificación del C
11 (Galantini et al., 2006; Álvarez, et al., 2016; Moraes Sá, 2014) y se ha sugerido que una
12 mayor estratificación de COS puede indicar una mayor calidad del suelo por manejo
13 (Franzluebbers, 2002). Los resultados muestran, al igual que en ensayos en Molisoles de
14 Entre Ríos (Novelli et al., 2011; 2013), que secuencias de cultivos más intensas en SD
15 favorecen una mayor acumulación superficial del C, y una mayor estratificación del COS.

16 Los resultados de este capítulo mostraron que a su vez las fracciones más lábiles
17 de carbono (representadas por el COP) son mayores en rotaciones más intensas con
18 mayores aportes de C anuales (Cuadro 2.2). Este carbono particulado, de rápida
19 descomposición, actúa como un núcleo para la formación de agregados de mayor tamaño
20 (Six et al., 2000; 2004), y mayores concentraciones de estas sustancias orgánicas lábiles
21 se han relacionado a mejores condiciones estructurales de los suelos (Shepherd et al.,
22 2001; Debosz et al., 2002). Esto podría estar explicando la menor proporción de tipos
23 estructurales desfavorables como los tipos laminares (Fig. 2.6 C; Cuadro 2.3) observada
24 en rotaciones de alta intensidad.

1 Los tipos estructurales laminares presentan una amplia difusión en suelos con
2 altos contenidos de limo en sistemas en SD (Álvarez et al, 2012; Lozano, 2014; Sasal,
3 2017 a), y su desarrollo se ha relacionado con la frecuencia de ciclos de humedecimiento
4 y secado (Sasal, 2012), con los niveles de intensificación, la frecuencia de soja y niveles
5 de aportes en las rotaciones predominantes en la región (Álvarez et al. 2014; Sasal et al.,
6 2017 b); y con la intensidad de tránsito (Pagliai et al., 2003; Horn et al. 2004; Álvarez et
7 al., 2014). Este capítulo muestra que el desarrollo de estructuras laminares no parece estar
8 relacionado al tránsito de maquinaria en estos suelos. Las situaciones tendientes a la
9 monocultura presentaron en promedio 1,04 operaciones de cosecha.año⁻¹; las rotaciones
10 de menor intensidad presentaron en promedio 1,29 operaciones de cosecha.año⁻¹, y las de
11 alta intensidad 1,7 operaciones de cosecha.año⁻¹ (incluyendo aquellas con cultivos de
12 cobertura o servicio). Así, rotaciones más intensas (CI = 0,6-0,7), con mayor frecuencia
13 de operaciones como las de siembra y cosecha que las tendientes a la monocultura,
14 presentaron menor frecuencia de aparición y espesor de tipos estructurales laminares.
15 Esto contrasta con los trabajos de Álvarez et al (2014), en los cuales se observó que una
16 mayor frecuencia de tránsito propicia la formación de estos tipos estructurales. Los
17 resultados de este capítulo coinciden, en cambio, con los resultados de ensayos de campo
18 y laboratorio informados por Sasal (2012), en los cuales la intensidad de la secuencia
19 parece tener mayor incidencia en el desarrollo o permanencia de este tipo de estructuras,
20 en relación a otros factores como la frecuencia de tránsito de maquinaria.

21 No se observaron diferencias entre secuencias puramente agrícolas de distinto
22 nivel de intensificación en cuanto a la proporción de bloques de mayor tamaño (<0,1 m)
23 y con características de tipo masivo determinados por la prueba de estallido. Únicamente
24 las pasturas presentaron una distribución de bloques pequeños (<0,05m) similar a los
25 observados en condiciones cuasi-prístinas, con mayores proporciones de tipos

1 estructurales granulares (referidos como α en Sasal et al., 2017). La mayor presencia de
2 estos tipos granulares generalmente se ha asociado a una evolución favorable en el estado
3 de la estructura del suelo, al presentar características físicas más favorables, incluyendo
4 menor densidad y cohesión interna y mayor porosidad estructural (Sasal, 2012; Sasal et
5 al., 2017). Si bien los aportes de carbono de las pasturas no resultaron claramente
6 superiores a los de rotaciones más intensas, una mayor proporción de estos aportes de C
7 en las pasturas (Poeplau, 2016) provendría del ciclado y las deposiciones desde las raíces
8 (Fig. 2.2 B), lo cual podría estar explicando las diferencias en el estado de la estructura
9 observadas en estas situaciones.

10 Así, elevados aportes de carbono subterráneo y actividad radical de manera
11 continua como los que se dan en rotaciones con pasturas perennes parecen propiciar la
12 aparición de tipos estructurales favorables en mayor medida que elevados aportes de
13 carbono por “pulsos” (en un determinado período puntual del año), como en las rotaciones
14 puramente agrícolas (ej. ROT AI). Este resultado se relaciona con el extensamente
15 estudiado rol clave de las raíces en la estructuración de los suelos. Las raíces y raicillas
16 forman una red o entramado que permite mantener físicamente unidos a terrones y
17 agregados (fenómeno de “*binding*” o “enredado”, Oades, 1984; Jastrow et al., 1998). Las
18 raíces también liberan una amplia gama de compuestos orgánicos: azúcares y
19 polisacáridos, los ácidos orgánicos y aminoácidos, los péptidos y proteínas, y mucílagos
20 (Bowen y Rovira, 1999; Jones et al. 2004; Gregory, 2006), que son capaces de unir
21 agregados y partículas de menor tamaño, favoreciendo la agregación y estabilidad
22 estructural (proceso de “pegado” o “*bonding*”, Oades, 1984; Gregory et al., 2013). Una
23 actividad radical continua como la que se produce en ciclos de pasturas perennes puede
24 promover además la agregación a través de la ocurrencia de ciclos de humedecimiento y
25 secado más frecuentes (Reid y Goss, 1982; Taboada et al., 2004), que favorecen la unión

1 de mucílagos y otros compuestos orgánicos con los componentes minerales del suelo
2 (Reid y Goss, 1982; Albalasmeh y Ghezzehei, 2014). Por último, las pasturas analizadas
3 incluyeron en todos los casos consociaciones de gramíneas y leguminosas. La
4 combinación de gramíneas y leguminosas creciendo en forma simultánea favorece la
5 agregación de los suelos (Jastrow, 1987). Mientras que las raíces fibrosas de las gramíneas
6 promueven altos niveles de macro-agregación a través del entramado (“*binding*”) que
7 generan, las raíces de las leguminosas pueden propiciar relaciones C:N más favorables en
8 el suelo, promover una mayor biomasa y diversidad microbiana, y en conjunto favorecer
9 una mayor agregación y niveles de carbono de los suelos (Chan y Heenan, 1996; Haynes
10 y Beare, 1997; Diaz-Zorita et al., 2002 a; McDaniel et al., 2014).

11 Sin embargo, contra lo predicho en la hipótesis planteada, una mayor intensidad
12 de cultivos tendientes al doble cultivo anual al año no necesariamente redujo los niveles
13 de densidad aparente superficial o subsuperficial, ni mejoró la capacidad de aireación e
14 infiltración del suelo, o los niveles de resistencia a la penetración respecto a rotaciones de
15 menor intensidad (1,3 cultivos.año⁻¹) o condiciones de monocultura. Más aún, incluso
16 algunos parámetros como la porosidad de aireación subsuperficial o la resistencia a la
17 penetración tendieron a ser más desfavorables en secuencias tendientes al doble cultivo
18 continuo. El tránsito de maquinaria se ha destacado como una de las causas principales
19 del deterioro físico de los suelos en SD de la región (Botta et al., 2006 b; 2010; Tolón-
20 Becerra et al., 2011), y la cosecha es particularmente una de las operaciones que mayor
21 densificación superficial y subsuperficial genera (Fernández et al., 2015). Como se
22 explicara al analizar las diferencias en los tipos estructurales presentes, las secuencias de
23 cultivos más intensas presentaron mayor número de cosechas a lo largo de la rotación
24 (promedio 1,7 operaciones de cosecha.año⁻¹), respecto de las rotaciones menos intensas
25 (1,29 operaciones de cosecha.año⁻¹) o tendientes a la monocultura (promedio 1,04

1 operaciones de cosecha.año⁻¹). Las operaciones de cosecha estival en rotaciones con
2 mayor proporción de cultivos de segunda suelen coincidir además con períodos de mayor
3 pluviometría y menor demanda ambiental en los ambientes analizados, y contenidos de
4 humedad edáfica predisponentes a una mayor densificación (Álvarez et al., 2012). Es
5 decir que, en este caso, las evidencias recogidas fueron suficientes para rechazar la
6 hipótesis.

7 Estos resultados podrían estar explicando cómo, a pesar de los mayores aportes de
8 C al suelo y cambios en algunos parámetros como el COS y COP superficial, las
9 secuencias más intensas no presentaron niveles de densidad, resistencia a la penetración,
10 infiltración o aireación más favorables que secuencias de menor intensidad. Cabe
11 preguntarse si la mayor producción de raíces esperada en los sistemas agrícolas más
12 intensos es incapaz o insuficiente para regenerar la compactación inducida por una mayor
13 frecuencia de tránsito, o si, por el contrario, este estrés de compactación termina afectando
14 a la producción de raíces, impidiendo que tenga lugar la recuperación esperada. Los
15 efectos de rotaciones agrícolas de alta intensidad tendientes al doble cultivo continuo
16 sobre el suelo, que hasta el momento habían sido escasamente documentados, ameritan
17 sin embargo mayores estudios y en mayores plazos de tiempo que los analizados.

18 La implementación de sistemas de tránsito controlado (Hamza y Anderson, 2005;
19 Antille et al., 2016; Chamen et al., 2015) o el ordenamiento y control de las operaciones
20 de cosecha (Botta et al., 2007; Botta et al., 2016) podrían ser una alternativa para
21 disminuir el impacto del tránsito de maquinaria sobre el suelo en sistemas de elevada
22 intensidad de cultivos. Se han observado así mejoras en las propiedades físicas del suelo
23 en sistemas en SD al restringir el tránsito a pistas o sectores específicos (Chamen et al.,
24 2015), restringir el ingreso de tolvas en las operaciones de cosecha (Botta et al., 2007) o
25 controlar el peso por eje y presión ejercida por los neumáticos en las operaciones de

1 cosecha (Botta et al., 2016). Combinar estas prácticas de control u ordenamiento del
2 tránsito con sistemas de alta intensidad de cultivos permitiría aprovechar los beneficios
3 de los mayores aportes de C y actividad de raíces de estos esquemas agrícolas,
4 minimizando el impacto negativo de la mayor intensidad de tránsito asociada a ellos sobre
5 las propiedades del suelo. Se requieren sin embargo mayores estudios que permitan
6 evaluar los efectos de la combinación de estas prácticas a largo plazo.

7 Al igual que el caso de los tipos estructurales observados, únicamente las pasturas
8 presentaron valores de algunos indicadores físicos similares los de las condiciones C-PR.
9 Estos efectos sobre las propiedades físicas suelen depender del aprovechamiento de la
10 pastura, y pueden ser favorables, neutros o incluso adversos respecto de otros usos de la
11 tierra dependiendo por ejemplo de la duración de pastoreo, carga animal, y condiciones
12 de humedad edáfica, entre otros factores (Franzluebbbers y Stuedemann, 2009; Quiroga et
13 al., 2009; Fernández et al., 2011; Zúñiga et al., 2015; Cecagno et al., 2016). La utilización
14 de pasturas para confección de reservas en los casos analizados, podría estar explicando
15 en parte las mejoras físicas observadas en relación a estudios que incluyeron pastoreo
16 directo.

17 Más aún, únicamente en los casos de pastura se observaron mejoras en algunos
18 parámetros físicos como la resistencia a la penetración superficial y subsuperficial, o en
19 la porosidad de aireación subsuperficial. Además de los efectos antes mencionados de
20 sistemas de raíces densos y fibrosos sobre la estructuración, las raíces pueden formar
21 grietas y nuevos poros, o aumentar el tamaño de poros ya existentes (Cresswell y
22 Kirkegaard, 1995; Abdollahi y Munkholm, 2014), y esto podría estar explicando parte de
23 las mejoras observadas en los niveles de resistencia. A pesar de esto, la inclusión de
24 pasturas no se tradujo en mejoras en la densidad aparente y la infiltración. Por un lado, es
25 posible que la metodología de muestreo de estos indicadores, realizada en el espacio entre

1 plantas no haya permitido detectar cambios significativos en estas propiedades, o que al
2 momento de muestreo las raíces hayan aún estado ocupando grietas y bioporos ya
3 generados, y eso puede haber evitado detectar cambios en el movimiento de agua. Para
4 detectar estos cambios posiblemente se requiera realizar las determinaciones luego del
5 ciclo de pasturas, una vez que se descomponga la biomasa radical generada. Es posible
6 también que para que se expresen en mayor magnitud los cambios sobre las distintas
7 propiedades del suelo, se requieran más de cuatro años de implantadas (Fernández et al.,
8 2011).

9 Las relaciones entre indicadores coincidieron con las observadas en otros estudios
10 (p.ej. Aparicio y Costa, 2007). La densificación de estos suelos puede generar
11 incrementos en los niveles de resistencia a la penetración promedio y en los picos o
12 máximos observados, disminución en la proporción de los poros de mayor tamaño, y a su
13 vez restringir el movimiento vertical de agua. Sin embargo, las relaciones entre la
14 densidad aparente e indicadores de funcionamiento del suelo como la porosidad de
15 aireación, infiltración de agua o resistencia a la penetración, representadas en Figura 2.10
16 resultaron ampliamente variables ($r^2 < 0,4$). Aún con valores de densidad aparente por
17 debajo de los valores considerados como umbrales de referencia (Saxton y Rawls, 2006;
18 Pilatti y Orellana 2012), se observaron valores fuera de los rangos críticos en otros
19 indicadores: niveles de porosidad de aireación inferiores al 10% (Gupta y Allmaras, 1987;
20 Taboada et al., 1998), o de resistencia a la penetración superiores a 1,5-2MPa (Bengough
21 et al., 2011).

22 Esto muestra que, como han observado otros autores en suelos de la región
23 pampeana (Taboada et al., 1998; Taboada y Micucci, 2006), la densidad aparente no
24 necesariamente refleja procesos de alteración de la estructura de los suelos. Esto se ha
25 atribuido a la mineralogía propia de los suelos como los estudiados, la cual, por haber

1 evolucionado a partir de una vegetación de pradera, presenta elevados contenidos de
2 silico-fitolitos de origen biológico, y por lo tanto baja densidad de partícula (Cosentino y
3 Pecorari, 2002), e incrementos poco marcados en la densidad aparente (Taboada y
4 Micucci, 2006). Aun así, es necesario destacar que los niveles de densidad aparente
5 observados en el presente estudio en muchos casos superaron a los valores de referencia
6 para suelos de estas características.

7 La resistencia a la penetración fue el indicador físico con mayores diferencias en
8 términos relativos entre las condiciones productivas y las condiciones cuasi-prístinas de
9 referencia. Más aún, los muestreos de resistencia a la penetración se realizaron en
10 condiciones de capacidad de campo, por lo que estos valores probablemente resulten
11 considerablemente más restrictivos a medida que los suelos se secan en el ciclo del cultivo
12 (Álvarez et al., 2012; Fernández et al., 2011; Valentine et al., 2012). Los máximos niveles
13 de resistencia a la penetración aparecieron preferentemente en la capa subsuperficial,
14 entre 0,1 y 0,2 m. Este tipo de patrones en la resistencia subsuperficial suele estar ligado
15 al impacto ejercido por una elevada frecuencia de tránsito de maquinaria de elevado peso
16 por eje (Botta et al., 2009; Botta et al., 2013), y suele ser característico de suelos en SD
17 (Sivarajan et al., 2018).

18 Independientemente de la intensidad de la secuencia y los aportes de carbono, los
19 valores de los distintos indicadores físicos parecen estar indicando procesos de
20 compactación (de acuerdo con la definición del Capítulo 1), ya que se observaron niveles
21 sub o supra-óptimos en los distintos indicadores relacionados al funcionamiento de la
22 estructura. Estos procesos pueden estar ligados al reordenamiento interno de las partículas
23 del suelo que generan incrementos en la cohesión y resistencia, a la disminución en el
24 volumen del espacio poroso, o una combinación de distintos mecanismos físicos (Cohron,
25 1971; Horn y Lebert, 1994), que se han asociado a los efectos del tránsito de maquinaria,

1 a los ciclos de humedecimiento-secado (y sus efectos sobre la disrupción, migración y
2 reacomodamiento de partículas y agregados), y/o a su efecto conjunto (Sasal, 2012;
3 Álvarez et al., 2014; Boizard et al., 2017; Botta et al., 2018). Independientemente del
4 origen, estas compactaciones parecen ser una problemática ampliamente extendida en los
5 suelos analizados. Alrededor de un 32% de todas las muestras, y hasta un 92% de las
6 muestras con niveles de densidad superior a los umbrales mostraron signos de
7 compactación, al verse afectada una o más de las propiedades funcionales más allá de los
8 valores sugeridos como niveles críticos. A su vez, la ubicación subsuperficial de las
9 compactaciones reviste además una mayor complejidad, dada la dificultad para su
10 corrección, como han sugerido otros estudios (Gameda et al., 1987; Hakansson y Reeder,
11 1994; Botta et al., 2013).

12 Los valores de referencia analizados permiten orientar sobre la presencia de
13 procesos de alteración de la estructura como la compactación del suelo, en especial
14 analizando en conjunto los distintos indicadores. Sin embargo, estos umbrales requieren
15 mayores estudios, ya que han sido desarrollados en condiciones edafo-climáticas
16 particulares y/o para cultivos específicos. Por ejemplo, mientras que los niveles de
17 resistencia a la penetración usualmente considerados como niveles críticos de 2 MPa
18 pueden generar una reducción en la tasa de elongación de las raíces de maíz cercana al
19 50% (Veene and Boone, 1990; Bengough et al., 2011), en cultivos más sensibles a la
20 compactación como el algodón o algunas leguminosas pueden generarse efectos de
21 similar magnitud a niveles de resistencia a la penetración inferiores a 1 MPa (Taylor y
22 Brar, 1991; Bengough et al., 2011). Existen algunas evidencias de que cultivos como la
23 soja pueden ser aún más sensibles (Rosolem y Takahashi, 1998). Pero, por otro lado, la
24 presencia de bioporos continuos característicos de la SD (Shipitalo y Protz, 1989;
25 Calonego y Rosolem, 2010) podría generar vías preferenciales de crecimiento para las

1 raíces, que reduzcan los efectos de la presencia de capas compactadas sobre los cultivos,
2 como se observara en otros estudios (Williams y Weill, 2004; Colombi et al., 2016, 2017).
3 Se requieren por lo tanto estudios específicos que permitan esclarecer los efectos de las
4 compactaciones como las observadas en este capítulo sobre el crecimiento y rendimiento
5 de los cultivos en SD.

6 **2.5. Conclusiones**

7 De acuerdo con el objetivo planteado, este estudio mostró que suelos Argiudoles
8 con elevado contenido de limo superficial como los de la subregión de la Pampa Ondulada
9 presentan signos de deterioro de la estructura en los primeros 0,2 m de suelo,
10 independientemente de su historia agrícola reciente en SD. Esto se evidencia a partir de
11 la presencia de tipos estructurales desfavorables, y compactaciones. Este estudio mostró
12 además que la compactación subsuperficial parece ser un proceso generalizado en suelos
13 de estas características, independientemente de la intensidad de la rotación y los niveles
14 de aportes de carbono, lo cual hasta el momento no se había documentado.

15 De acuerdo con la hipótesis planteada, esquemas de mayor intensidad y mayores
16 aportes de C al suelo mostraron mayores niveles de carbono total y lábil en los primeros
17 cm respecto de situaciones de menor intensidad de cultivos, y menor desarrollo de tipos
18 estructurales desfavorables como los tipos laminares. Sin embargo, y al contrario de lo
19 esperado, las rotaciones puramente agrícolas no mostraron entre sí diferencias en las
20 propiedades funcionales del suelo. Únicamente las situaciones con pasturas presentaron
21 condiciones más favorables con respecto a otras rotaciones, y más cercanas las observadas
22 en las condiciones cuasi-prístinas de referencia, en cuanto a la presencia de otros tipos
23 estructurales y parámetros como la resistencia a la penetración.

Capítulo 3

Compactación de suelos en siembra directa: crecimiento y funcionalidad del sistema radical de soja. Resultados de experimentos en columnas de suelo

1 **3. Compactación de suelos en siembra directa: crecimiento y funcionalidad del** 2 **sistema radical de soja. Resultados de experimentos en columnas de suelo**

3 **3.1. Introducción**

4 La compactación de suelos es un proceso que se encuentra ampliamente extendido
5 en distintos suelos y sistemas agrícolas del mundo (Batey, 2009; Nawaz et al., 2013;
6 Singh et al., 2015). Los resultados del Capítulo 2 mostraron que a pesar de las múltiples
7 ventajas de la SD sobre las propiedades físico-químicas de los suelos (Thomas et al.,
8 2007; Lal et al., 2007; Cavalieri et al., 2009; Soane et al., 2012), los Argiudoles con
9 elevado contenido de limo en superficie presentan signos de compactación superficial y
10 subsuperficial bajo rotaciones agrícolas de distinta intensidad.

11 La extracción de agua y nutrientes se encuentra estrechamente ligada a la
12 distribución y funcionamiento del sistema radical (Lynch y Brown, 2012) y, por lo tanto,
13 los efectos de la compactación de suelos sobre el crecimiento, distribución y actividad
14 del sistema radical resultan relevantes. Al aumentar la cohesión interna y resistencia del
15 suelo, la compactación genera efectos directos sobre las raíces, dado que aumenta la
16 fuerza por unidad de superficie o presión que debe ejercer una raíz para penetrar en él
17 (Horn y Lebert, 1994; Bengough et al., 2006). Esta presión experimentada o ejercida por
18 las raíces puede inferirse a través de la resistencia a la penetración del suelo (Bengough
19 y Mullins, 1990; Bengough et al., 2011). Además de la compactación, la resistencia a la
20 penetración es altamente dependiente del nivel de humedad del suelo. A medida que un
21 suelo se seca, la tensión generada por las películas de agua incrementa la cohesión entre
22 partículas, y la resistencia a la penetración del suelo aumenta (Whitmore y Whalley,

1 2009). Estos efectos se ven exacerbados aún más en suelos compactados (da Silva y Kay,
2 1994; Bengough et al., 2011).

3 En condiciones de elevada resistencia a la penetración, la presión intracelular
4 aumenta en las células ubicadas en la zona de elongación de las raíces en activo
5 crecimiento, y la expansión celular se ve limitada (Bengough et al., 2006). Este efecto,
6 sumado a las reducciones en la conductividad hidráulica y a una menor disponibilidad
7 de oxígeno por menores tasas de difusión gaseosa, limita la tasa de elongación de las
8 raíces que crecen en suelos compactados (Taylor y Brar, 1991; Bengough et al., 2006;
9 Lipiec et al., 2012). Al verse restringida la tasa de elongación radical, la biomasa y
10 densidad de raíces disminuyen en capas de suelo compactadas (Rosolem y Takahashi,
11 1998; Beutler et al., 2008; Bengough et al., 2011; Nosalewicz y Lipiec, 2014).

12 Además de los efectos sobre el crecimiento, se han observado también cambios
13 morfológicos en aquellas raíces directamente expuestas a impedancias mecánicas:
14 engrosamientos y aumentos en el diámetro, aplanamientos, compresiones de su anatomía
15 interna, alteraciones en los vasos xilemáticos, rupturas en las células epidérmicas, y
16 malformaciones a nivel de las células de los pelos radiculares (Bengough y Mullins,
17 1990; Iijima et al., 2003; White y Kierkegaard, 2010; Ramos et al., 2010; Lipiec et al.,
18 2012). Estas distintas alteraciones en el crecimiento y morfología de las raíces creciendo
19 en suelos compactados se han asociado en general a una menor absorción de agua
20 (Amato y Ritchie, 2002; Grzesiak, 2009; Imhoff et al., 2010; Nosalewicz y Lipiec, 2014).

21 Sin embargo, los efectos de la compactación del suelo sobre las raíces que no se
22 encuentran directamente expuestas, y que crecen más allá de las capas compactadas, no
23 están del todo comprendidos. Esto resulta particularmente relevante, dado que el espesor

1 de los estratos compactados por efecto antrópico suele representar un 10-20% o menos
2 de la profundidad total explorada por las raíces de los cultivos (Botta et al., 2006 a). Por
3 ejemplo, se ha observado un menor crecimiento de las raíces varios centímetros por
4 debajo de la compactación en maíz creciendo en “pisos de arado” de labranzas (Tardieu,
5 1994) o en condiciones de compactación artificial en arveja (*Pisum sativum*; Bengough
6 y Young, 1993). En la región pampeana (Cárcova et al., 2000) se encontró que la
7 degradación física superficial bajo sistemas con remoción de suelos puede disminuir la
8 abundancia de raíces de maíz a profundidades más allá del horizonte antrópico.

9 Por el contrario, los sistemas radicales de algunas especies pueden resultar muy
10 plásticos en respuesta a estreses abióticos, gracias a la compensación funcional entre sus
11 distintas clases de raíces (Rubio y Lynch, 2007). Incluso se ha observado que cultivos
12 como la cebada (Bingham y Bengough, 2003; Pfeifer et al., 2014) o el brócoli (*Brassica*
13 *olearacea var.italica*; Montagu et al., 2001) son capaces de compensar los efectos de las
14 capas compactadas, a través de un mayor crecimiento de raíces en los sectores no
15 afectados, y alcanzar similares niveles de absorción de agua y producción de biomasa
16 que plantas que crecen en suelos no compactados. La importante plasticidad observada
17 en soja en la parte aérea (Vega et al., 2001; Vega y Sadras., 2003; Andrade y Abbate,
18 2005), sugiere que podrían existir mecanismos compensatorios en el caso de las raíces
19 de soja. Sin embargo, no existen estudios específicos en este cultivo que hayan analizado
20 cómo la compactación de suelos puede afectar el crecimiento y funcionamiento del
21 sistema de raíces en su conjunto, ni que hayan estudiado el desarrollo de mecanismos
22 compensatorios a nivel radical frente a este tipo de estrés.

1 La magnitud de las respuestas compensatorias a través del crecimiento y/o
2 funcionalidad de las raíces en estratos profundos podrían estar, además, mediadas por las
3 características del subsuelo más allá de las capas compactadas (Nosalewicz y Lipiec,
4 2014). La presencia de horizontes subsuperficiales con alto contenido de arcilla puede
5 restringir considerablemente el crecimiento de raíces y la extracción de agua por los
6 cultivos (Dardanelli et al., 2003; White y Kirkegaard, 2010). Esto podría limitar la
7 capacidad compensatoria de las raíces subsuperficiales no expuestas directamente a las
8 capas compactadas. Al momento no existen estudios que hayan analizado cómo el tipo
9 de subsuelo puede modular la respuesta del sistema de raíces en su conjunto a las
10 compactaciones de origen antrópico, ni en soja ni en otros cultivos.

11 A su vez, los efectos de la compactación se han estudiado por lo general, sino
12 en todos los casos, en suelos artificialmente compactados o en “panes” de labranza, que
13 no necesariamente reflejan el estado de la estructura y la continuidad y distribución del
14 sistema de poros de los suelos compactados en siembra directa (Keller et al., 2017). Ante
15 la presencia de impedancias físicas, la red de canales y bioporos propios de la SD puede
16 ofrecer vías preferenciales para el crecimiento de las raíces hacia estratos más profundos
17 (Williams y Weill, 2004; Calonego y Rosolem, 2010), y esto podría compensar o aliviar
18 los efectos de la compactación en estratos superficiales. Por lo tanto, los efectos de la
19 compactación antrópica en suelos en SD todavía no están del todo esclarecidos, y para
20 esto es necesario implementar metodologías de estudio que contemplen las
21 particularidades de la estructura del suelo bajo este sistema de manejo.

22 Por último, existen también evidencias de que la extracción de agua no estaría
23 sólo limitada por un menor crecimiento o actividad de las raíces en suelos compactados.

1 En trigo y cebada, se ha observado un menor crecimiento aéreo, menor expansión foliar
2 y menor conductancia estomática en presencia de capas compactadas o elevadas
3 presiones sobre el sistema radical, aún con adecuadas provisiones de agua y nutrientes,
4 y sin haberse observado efectos importantes sobre la biomasa de raíces (Beemster y
5 Masle, 1996; Mullholland et al., 1996; Masle, 1998). El ácido abscísico (ABA) tendría
6 un rol importante en esta respuesta, pero su rol como mensajero aún está en discusión
7 (Tracy et al., 2013). Este tipo de “efectos directos” de la compactación, como los han
8 denominado Sadras et al. (2005), no han sido estudiados en soja.

9 De todo lo anteriormente expuesto surgen algunos interrogantes: a) ¿Puede la
10 compactación del horizonte antrópico en siembra directa influir sobre el sistema radical
11 del cultivo de soja en su conjunto, y no sólo en las capas afectadas? ; b) ¿Pueden verse
12 afectadas la absorción de agua y la producción de biomasa y grano? c) ¿Depende esto de
13 la distribución de raíces o pueden existir otros “efectos directos” que restrinjan la
14 absorción de agua o restrinjan directamente la producción de biomasa aérea,
15 independientemente del crecimiento del sistema de raíces?; d) ¿Qué mecanismos de
16 compensación a nivel de crecimiento o funcionamiento de raíces puede presentar el
17 cultivo de soja? y e) ¿Cómo afecta la textura del subsuelo a estos mecanismos?

18 Para dar respuesta a estos interrogantes, se condujeron experimentos en
19 invernáculo utilizando monolitos de suelo superficial sin disturbar extraídos de lotes de
20 producción en SD, superpuestos sobre columnas de suelo subsuperficial con diferentes
21 texturas, con los objetivos de: (a) evaluar el efecto de la compactación del horizonte
22 antrópico sobre la profundización, distribución, y biomasa de raíces, y patrones de
23 absorción de agua del cultivo soja; (b) analizar posibles mecanismos compensatorios a

1 nivel del sistema radical, de acuerdo a las características del subsuelo; y (c) analizar el
2 efecto de estas alteraciones sobre la producción de biomasa aérea y de grano. Las
3 hipótesis de trabajo fueron las siguientes:

4 (a) La compactación del horizonte superficial reduce la extracción de agua por
5 alteraciones en el crecimiento de raíces, no sólo del horizonte afectado sino también
6 en el resto del perfil de suelo subyacente. La menor extracción de agua a nivel
7 superficial y subsuperficial reduce el crecimiento aéreo de las plantas que crecen en
8 suelos compactados.

9 (b) Estos efectos serán mayores en suelos con limitaciones en profundidad, como
10 subsuelos arcillosos.

11 **3.2. Materiales y métodos**

12 **3.2.1. Obtención de monolitos del horizonte antrópico del suelo**

13 De acuerdo a los resultados de los muestreos en el Capítulo 2, se preseleccionaron
14 situaciones de producción reales para la obtención de monolitos de suelo sin disturbar.
15 Se eligieron diez pares de lotes de producción adyacentes, todos con más de 20 años en
16 siembra directa, y con una condición de compactación contrastante en los primeros 20
17 cm (C: compactado vs. NC: no compactado) entre lotes de un mismo par. Se
18 consideraron como condiciones compactadas (C) a aquellas que presentaron niveles de
19 resistencia a la penetración promedio por encima del umbral crítico de 1,5-2,0 MPa
20 (Bengough et al., 2011) en condiciones de capacidad de campo, niveles de porosidad de
21 aireación inferiores al umbral de $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ en volumen (Gupta y Allmaras, 1987;
22 Lapen et al., 2004) y niveles de densidad aparente superiores a $1,35 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Pilatti y de

1 Orellana, 2012), en las capas 0-10 cm ó 10-20 cm. Se consideraron como condiciones no
2 compactadas (NC) aquellas con valores de esos parámetros fuera de los rangos
3 considerados a priori como críticos. Posteriormente, se seleccionaron los cinco pares de
4 lotes con mayores contrastes en el estado de la estructura 0-20 cm, que coincidieron con
5 situaciones con diferente historia agrícola: monocultura de soja en los últimos 10 años
6 vs. rotaciones agrícolas con ciclos de cuatro años de pasturas. Los cinco pares de lotes
7 se ubicaron en la región de la Pampa ondulada, en las cercanías de las localidades de
8 Rojas (34°,12° S; 60,44° O), Salto (34,29° S; 60,24° O) e Inés Indart, (34,4° S; -60,55°
9 O).

10 En los pares seleccionados, se fijaron sitios de extracción en sectores
11 representativos, en posiciones de altimetría semejante. Todos los sitios de extracción se
12 ubicaron en suelos franco-limosos de la serie Rojas (Argiudol Típico, Limosa fina, mixta,
13 térmica INTA, 2018) y presentaron texturas similares (determinada por método de
14 Bouyoucos, 1962; media ± 1 desvío estándar; 231 ± 17 g.kg⁻¹ arcilla , P=0,69; y 556 ± 63
15 g.kg⁻¹ limo, P=0,42) y similares niveles de carbono orgánico total (Walkey-Black, Nelson
16 y Sommers, 1996; media ± 1 desvío estándar = 17.6 ± 1.3 g kg⁻¹; P=0,97) en 0-20 cm.

17 Se caracterizó el estado general de la estructura de los primeros 20 cm de suelo en
18 los sitios de extracción, a partir de determinaciones de 0-10 cm y 10-20 cm: resistencia
19 a la penetración a contenidos de humedad de $\theta=0,29$ cm³.cm⁻³ (h=10 Kpa; capacidad de
20 campo) y $\theta=0,20$ cm³.cm⁻³ (50% de agua útil; h=100 Kpa) en muestras sin disturbar (con
21 penetrómetro de cono 60°, 11.28 mm de diámetro nominal; Eijkelkamp, Giesbeek, Países
22 Bajos); densidad aparente por método del cilindro (Blake y Hartge, 1986); infiltración a
23 flujo constante con permeámetro de disco (Perroux y White, 1988); macro-porosidad en

1 muestras sin disturbar (estimada por diferencia en el contenido de humedad volumétrico
2 a potenciales mátricos de $h = 0$ Kpa y $h = -10$ Kpa; Kay, 1990); índice de estructura por
3 “drop-test” o prueba de estallido (Shepherd et al., 2009; Murphy et al., 2013)
4 cuantificando la proporción en peso de los bloques y terrones de suelo mayores a 5 cm
5 luego de su fragmentación mecánica (Peralta et al., 2018); y la frecuencia y espesor de
6 estructuras laminares (Álvarez et al., 2014), para determinar su espesor ponderado
7 (frecuencia x espesor medio), de manera similar a lo descrito en el Capítulo 2
8 (materiales y métodos)

9 En cada sitio de extracción, se extrajeron monolitos del horizonte A (0-20 cm) en
10 sitios representativos del estado estructural muestreado previamente. Las extracciones se
11 realizaron en Julio 2014 y Julio 2015, en contenidos de humedad superiores a capacidad
12 de campo, de modo de asegurar muestras sin disturbar, tallando suavemente el contorno
13 de cilindros de PVC de 16 cm de diámetro y 25 cm de alto (Camobreco et al., 1996;
14 Martins et al., 2013). Los cilindros se trasladaron a un invernáculo de paredes abiertas
15 (tipo “*rain shelter*”) en el Instituto de Suelos del INTA, CIRN, Bs. As. (34.60° S, 58.67°
16 W) para realizar dos experimentos durante las temporadas de crecimiento 2014-15 y
17 2015-16.

18 **3.2.2. Diseño experimental y tratamientos**

19 Con fines de poner a prueba la primera hipótesis, se estableció en 2014-15 un
20 experimento (exp. 1) con cuatro tratamientos en base a la combinación de 2 factores: la
21 condición de compactación superficial de los sitios de extracción de muestras (C:
22 compactado vs. NC: no compactado), y la humedad bajo la cual fueron manejados los
23 monolitos superficiales (HS: humedad superficial: H100% vs. H50%), (Fig. 3.1). Dado la

1 asociación negativa entre la humedad de suelo y la resistencia a la penetración descrita
2 anteriormente, los diferentes niveles de humedad superficial buscaron generar mayores
3 contrastes en la resistencia a la penetración asociada a la compactación (i.e. más seco,
4 más diferencias entre C y NC). Los monolitos se colocaron sobre contenedores de PVC
5 de 20 cm de ancho y 180 cm de alto, similares a los descritos en Kashiwagi et al. (2006),
6 Zhu et al. al. (2010) y Zhan et al. (2015), recubiertos internamente con bolsas plásticas de
7 200 μm . Un mes antes de la siembra los contenedores fueron rellenos con un sustrato
8 suelto de textura franco-arenosa (tamizado 1 cm; 582 g.kg^{-1} de arena, 306 g.kg^{-1} de limo
9 y 122 g.kg^{-1} de arcilla; Bouyoucus, 1962), realizando riegos periódicos pre-siembra para
10 asentar el material.

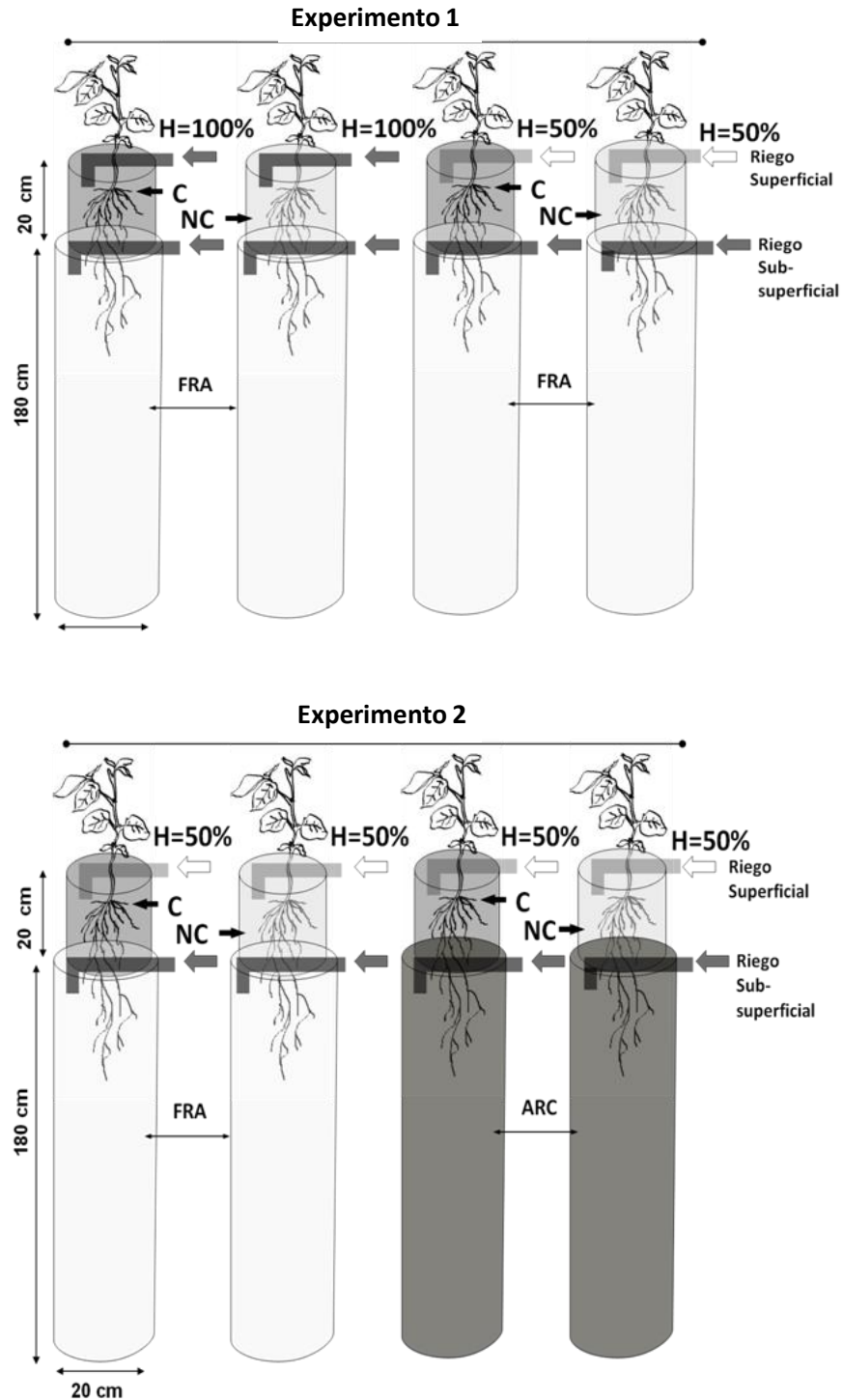
11 Los niveles de humedad superficiales y subsuperficiales se lograron a partir de la
12 aplicación de riegos con goteros con sistemas separados para el monolito superficial y el
13 subsuelo, controlando a través de sonda de humedad CS655-LC (tipo TDR, Campbell
14 Scientific, Logan, UT, USA). Los primeros 20 cm de suelo, se manejaron bajo dos rangos
15 de humedad (cercano a 100% de capacidad de campo: manteniendo un rango de 70% a
16 100% de agua útil; $\theta = 0,27-0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y cercano a 50% de agua útil: manteniendo un
17 rango de 40- 60% agua útil $\theta = 0,17-0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Los niveles de humedad del subsuelo
18 se manejaron de forma homogénea, llevando los contenidos hídricos de todo el subsuelo
19 a capacidad de campo ($\theta = 0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para este subsuelo franco-arenoso) en tres
20 momentos: a la siembra, en R3 y en R5 (Fehr y Caviness, 1977).

21 Con fines de probar la segunda hipótesis y a su vez corroborar los resultados del
22 año anterior, se estableció en 2015-16 otro experimento (Exp. 2) con cuatro tratamientos
23 que quedaron definidos por la combinación de dos factores con sus niveles: la condición

1 de compactación superficial de los sitios de extracción de muestras (C: compactado vs.
2 NC: no compactado), y el tipo de subsuelo entre los 20-200 cm (franco-arenoso o no
3 limitante: FRA vs. Arcilloso o limitante: ARC) en los contenedores de PVC (Fig.3.1).
4 Para esto se colocaron nuevos monolitos extraídos de los mismos puntos del año anterior,
5 sobre los contenedores rellenos con: el mismo sustrato franco arenoso sin limitaciones del
6 experimento 1; o con un sustrato arcilloso extraído del horizonte Bt2 de un suelo Argiudol
7 Vértico de la serie Hurlingham (335 g.kg⁻¹ de limo, 225 g.kg⁻¹ de arena, 440 g.kg⁻¹ de
8 arcilla).

9 Todos los tratamientos del experimento 2 se manejaron bajo un mismo nivel de
10 humedad edáfica, tanto superficial como subsuperficial. Los niveles de humedad
11 superficial de todos los tratamientos se mantuvieron entre 0,17-0,23 cm³ cm⁻³ (40-60% de
12 agua útil) durante el ciclo del cultivo, a través de riego por goteo. Los niveles de humedad
13 del subsuelo también se manejaron de forma homogénea entre tratamientos, llevando los
14 contenidos hídricos de todo el subsuelo a capacidad de campo según cada textura ($\theta =$
15 0,19 cm³ cm⁻³ en los franco-arenosos y $\theta = 0,46$ cm³ cm⁻³ en los arcillosos), en tres
16 momentos: a la siembra, en R3 y en R5.

17 Los monolitos y contenedores se dispusieron en ambos experimentos en un diseño
18 en bloques completos aleatorizados (DBCA), con cinco repeticiones. El criterio de
19 bloqueo estuvo basado en el sitio de extracción y en diferencias en insolación entre
20 sectores del invernáculo entre las 7:00 y 9:00 a.m., aproximadamente. En cada repetición
21 se dispusieron entonces monolitos provenientes de lotes adyacentes, y las repeticiones a
22 su vez se dispusieron en bloques de acuerdo con las características del invernáculo.



1

2 **Figura 3.1.** Esquemas de los exp. 1 (arriba) y 2 (abajo). Las plantas de soja fueron expuestas a
 3 condiciones superficiales Compactadas (C) o No Compactadas (NC), niveles de humedad
 4 superficial de 100% o 50% de agua útil (H100 VS. H50%), sobre subsuelos franco-arenosos (FRA
 5 o arcillosos (ARC).

6

1 3.2.3. Cultivo

2 En cada cilindro se sembraron 5 semillas de soja variedad DM 4212 STS, el día 18-
3 11-14 (exp. 1), y el 25-11-15 (exp. 2), y se ralearon hasta dejar dos plantas al estado V1.
4 Una vez que se observó la extrusión de las raíces a través del cilindro, se colocaron sobre
5 los contenedores de 180 cm. Previo a la siembra, las semillas se inocularon con
6 *Bradyrhizobium japonicum* (Biopack Nitrasec 2000; 10 ml.kg⁻¹ semilla) y se realizaron
7 dos aplicaciones de fertilizante líquido con una solución de 1,625 gr fertilizante disueltos
8 en 200 ml de agua por cilindro (N 5%, P 3,5% y K 4,8%); durante el ciclo se realizaron
9 cinco aplicaciones de fertilizante, cada una con una solución de 7,5 ml de fertilizante
10 líquido disueltos en 200 ml de agua por cilindro (P 5%, K 10%, S 3%; más trazas de Ca,
11 Mn, Mg, B, Fe, Co, Zn y Cu), de modo de asegurar condiciones de fertilidad química no
12 limitantes y homogéneas entre tratamientos. Se realizaron aplicaciones preventivas de
13 lambdacialotrina, dimetoato y carbendazim en R1, R3 y R5 para mantener al cultivo libre
14 de insectos, ácaros y hongos. Se registraron las condiciones temperatura y déficit de
15 presión del aire en el interior del invernáculo (WS-80, Luft, Shenzhen, China), y de
16 radiación solar incidente en exterior (CIRN INTA) corregidas con determinaciones de
17 radiación PAR en interior y exterior, con ceptómetro de 1m (Cavadevices, Buenos Aires,
18 Argentina).

19 3.2.4. Determinaciones

20 3.2.4.1. Tasas y patrones de extracción de agua, Índice de estrés hídrico (CWSI):

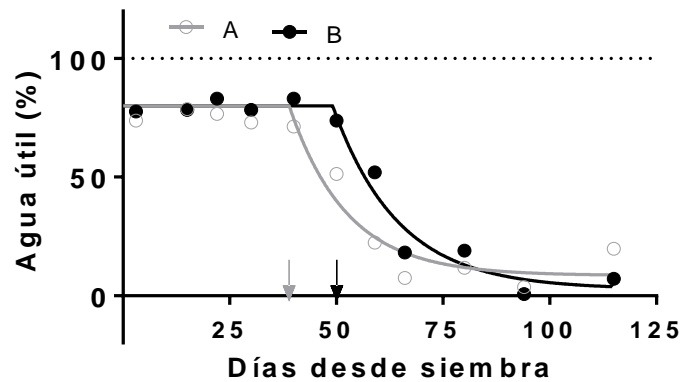
21

22 Se realizaron determinaciones secuenciales del contenido hídrico edáfico con la
23 sonda TDR cada 20 cm, cada 3-4 días. Se estimaron las tasas de absorción de agua (K) de
24 cada estrato, y la velocidad de movimiento del frente de extracción de agua o

1 profundización aparente siguiendo la metodología propuesta por Monteith (1986) y
 2 ajustada por Dardanelli et al. (2003; 2004). De acuerdo esta metodología, se asume que el
 3 contenido de agua de un determinado estrato de suelo comienza a disminuir en forma
 4 exponencial cuando es alcanzado por las raíces y no hay aportes frecuentes de agua. Así,
 5 el momento en el que las raíces alcanzan cada profundidad permite estimar velocidad de
 6 profundización en el perfil, y la tasa con la cual disminuyen los niveles de humedad
 7 permite estimar la tasa de extracción de agua de cada estrato. Para cada profundidad de
 8 suelo se ajustó entre períodos de riego una ecuación de tipo exponencial con *plateau*
 9 inicial, como la propuesta por Dardanelli et al. (2004), donde el contenido de agua de cada
 10 estrato varía según:

$$11 \quad (\Theta_d - \Theta_{LL}) \cdot (\Theta_{DUL} - \Theta_{LL})^{-1} = e^{-Kd} \quad [3.1]$$

12 donde Θ_d ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) es el contenido volumétrico de agua en un determinado día d ; Θ_{d-1}
 13 $- \Theta_{LL}$ es el contenido volumétrico de agua por encima del límite inferior (considerado
 14 como el valor de Θ_{PMP} de cada estrato, en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), en el día previo; Θ_{DUL} representa el
 15 límite superior de humedad (considerado como el valor de Θ_{CC} de cada estrato, en cm^3
 16 cm^{-3}); y K representa a la fracción de agua útil que puede absorber el cultivo en un día d ,
 17 cuando está limitado por la oferta de agua (ejemplo, Fig. 3.2). Para cada estrato, se
 18 determinó el tiempo desde la siembra en el cual la humedad volumétrica comienza a
 19 decrecer en forma exponencial (fin de *plateau*).



1

2 **Figura 3.2** Representación esquemática de la evolución del contenido de agua útil, ajustada según
 3 una función *plateau-decaimiento exponencial*, para dos tratamientos de ejemplo, A y B. Las
 4 flechas indican el inicio de extracción exponencial-fin del *plateau* para cada tratamiento, y las
 5 pendientes exponenciales representan la tasa de absorción K. La línea punteada indica el punto de
 6 capacidad de campo (AU = 100%).

7 Una vez determinados los momentos de inicio de extracción exponencial en cada
 8 estrato, se ajustaron modelos bi-lineales segmentados y modelos sigmoideos para
 9 caracterizar la velocidad del frente de extracción de agua o profundización aparente de
 10 raíces en el perfil, de manera similar a lo propuesto por Dardanelli et al. (2003; 2004) y
 11 Severina (2011). El modelo sigmoideo (logístico de 4 parámetros) puede resumirse como
 12 (ec. 3.2 y Fig. 3.3 A):

$$13 \quad Y = a + \frac{(p-a)}{1+10^{(m-t).b}} \quad [3.2]$$

14 donde “Y” es la profundidad de enraizamiento (en cm) en un tiempo “t” dado (en días
 15 desde siembra); “a” (en cm) es el valor de “Y” a la base del *plateau* inicial y representa
 16 la profundidad al inicio del tratamiento (y se considerará igual a 0 en este análisis); “p”
 17 es el valor máximo que alcanzarán las raíces (en cm), y representa la profundidad máxima
 18 de enraizamiento; “m” es un parámetro que representa el tiempo (en días) en el cual se
 19 alcanza la mitad de la profundidad máxima ; y finalmente “b” es un coeficiente

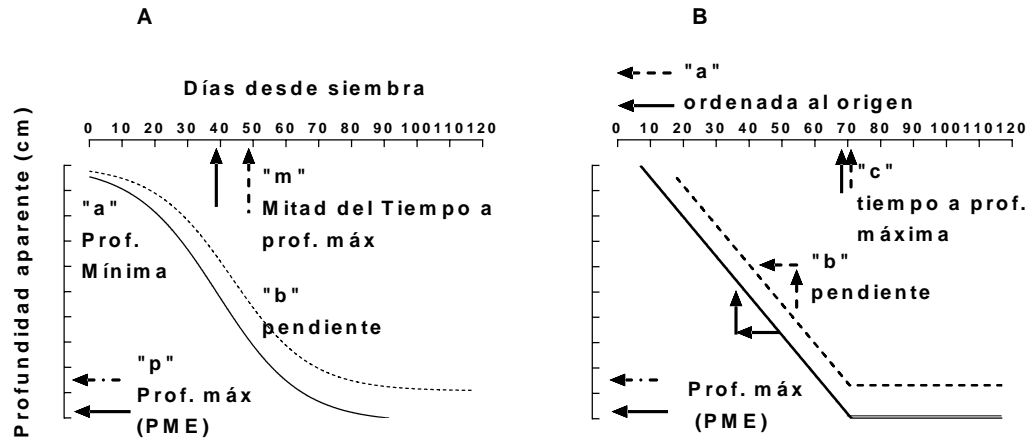
1 adimensional entre 0 y 1 que representa el tipo de pendiente de la curva. Un coeficiente
 2 igual a 1 representa una curva sigmoidea estándar, un coeficiente menor a 1 indica una
 3 curva menos pronunciada (con menor velocidad profundización aparente) y un coeficiente
 4 mayor a 1 una curva más pronunciada (mayor velocidad). La primera derivada de la
 5 función permite la estimación de la tasa de profundización (en cm.día^{-1}) en un determinado
 6 punto de la curva.

7 El modelo bi-lineal o lineal segmentado se determinó a partir del mejor ajuste de
 8 dos rectas que se intersectan en el tiempo en el que las raíces alcanzan la máxima
 9 profundidad de enraizamiento. Luego de la fase *lag* o fase inicial, la pendiente de la recta
 10 representa la velocidad del frente de absorción o profundización aparente promedio (en
 11 cm.día^{-1}), hasta que se alcanza la profundidad máxima de enraizamiento (PME, en cm).
 12 Este modelo puede expresarse como (ec. 3.3 y 3.4; Fig. 3.3 B):

$$13 \quad Y = a + b \cdot t ; \text{ cuando } a/b < t < c \quad [3.3]$$

$$14 \quad Y = \text{PME} = b \cdot c - a ; \text{ cuando } t > c \quad [3.4]$$

15 donde “*Y*” es la profundidad de enraizamiento (en cm) en un tiempo “*t*” dado (días
 16 desde siembra); “*a*” (en cm) es el valor de “*Y*” cuando “*t*” equivale a cero (ordenada al
 17 origen); “*b*” es la pendiente de la recta que representa la velocidad de profundización
 18 aparente promedio del período de activo crecimiento (en cm.día^{-1}); “*a/b*” representa el
 19 período temprano en el ciclo del cultivo con lento crecimiento inicial de las raíces (fase
 20 lag, en días); y “*c*” representa el tiempo (en días) en el cual se alcanza la profundidad
 21 máxima de enraizamiento o PME (en cm).



1
2 **Figura 3.3** Representación esquemática de los parámetros de los modelos sigmoideos (A) y bi-
3 lineales (B) para la profundidad aparente de raíces en el tiempo para dos tratamientos de ejemplo
4 (líneas punteadas y líneas llenas). Se indica en letras minúsculas cada parámetro del modelo (ver
5 ecuaciones 3.2 a 3.4).

6 Se determinó a lo largo del ciclo la temperatura media de los folíolos no sombreados
7 del tercio superior de la planta, de acuerdo con Gardner et al. (1992), con un termómetro
8 digital infrarrojo (DT-812, Shenzhen Machinery Industry Co, Ltd, Shenzhen, China). Las
9 determinaciones se realizaron en forma semanal, entre 1:00 y 2:00 PM. Se estimó el índice
10 de estrés hídrico del cultivo o “*crop water stress index*” (CWSI; adimensional; Idso, 1982;
11 Nielsen, 1990; Cárcova et al., 1998) como:

12

$$\text{CWSI} = \frac{[(Th-Ta)_m - (Th-Ta)_{li}]}{[(Th-Ta)_{ls} - (Th-Ta)_{li}]} \quad [3.5]$$

13 donde $(Th - Ta)_m$ representa la diferencia de temperatura de los folíolos (Th) muestreados
14 y la temperatura ambiente (Ta) al momento de la medición (m); $(Th - Ta)_{li}$ (en °C)
15 representa la diferencia de temperatura de los folíolos y la temperatura ambiente en
16 condiciones irrigadas o de adecuado contenido hídrico (li, límite inferior); y $(Th - Ta)_{ls}$
17 (en °C) representa la diferencia de temperatura de los folíolos y la temperatura ambiente
18 en las condiciones de mayor estrés hídrico posible (ls, límite superior). Este ls se estimó

1 en base a la temperatura de acuerdo a Idso et al. (1981). El li se determinó a través de la
2 ecuación general propuesta por Nielsen (1990) para el cultivo de soja.

3 *3.2.4.2. Determinaciones en raíces y parte aérea:*

4 En R7, se extrajo la totalidad del material de los contenedores y se separaron las
5 raíces del suelo, cada 20 cm de suelo por elutriación (Smucker et al., 1982) y dispersión
6 química (Bohm, 1979), y tamices sucesivos de 566, 336 y 250 μm . Las raíces se
7 almacenaron de acuerdo con la metodología propuesta por Rosolem et al. (2002) y se
8 escanearon y analizaron utilizando el software WinRHIZO Pro (Regent Instruments,
9 Quebec, Canadá).

10 Se determinó la densidad de longitud (DLR, longitud. volumen de suelo⁻¹) y la
11 superficie de raíces (cm² de raíz) cada 0,2 m, y su distribución en los diferentes diámetros
12 de raíz (en categorías de 0,5 mm). Las muestras de raíces se llevaron posteriormente a
13 estufa a 65°C por 72 horas y pesaron, para determinar la biomasa de raíces, la longitud
14 específica (longitud.peso⁻¹), y la superficie específica (longitud.peso⁻¹). A su vez, se
15 estableció y cosechó una repetición adicional para cada tratamiento de los sustratos franco
16 arenosos, de modo de extraer y analizar el sistema de raíces intacto de los contenedores
17 de acuerdo al protocolo propuesto por Pennsylvania State University Root Lab (descrito
18 en Zhan et al., 2015). Se tomaron imágenes a color del sistema de raíces sobre fondo azul
19 con una cámara digital (Nikon D40) y se transformaron a imágenes binarias usando el
20 software Image-J (Schneider et al., 2012).

21 Se cosechó la biomasa aérea de todos los tratamientos a R7, luego se llevó el
22 material a estufa a 65°C por 72 horas, se registró el peso seco vegetativo y de granos, y se
23 determinó el índice de cosecha (IC) como la relación entre el peso seco de granos y el

1 peso de la biomasa aérea total; la relación raíz : tallo como la relación entre el peso seco
2 total de raíz y el peso seco de la biomasa aérea total; y la relación raíz:grano como la
3 relación entre el peso seco total de raíz y el peso seco de grano.

4 **3.2.5. Análisis estadístico**

5 Para comparar el estado físico superficial de los sitios de extracción, se realizaron
6 pruebas t-apareadas entre lotes adyacentes. Para analizar los efectos de los factores y sus
7 interacciones en los experimentos, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) para
8 diseños multifactoriales con DBCA. En los casos en los que se analizaron variables a
9 distintas profundidades, se incluyeron la “profundidad” de suelo y sus interacciones como
10 factores anidados. En los casos en los que se realizaron determinaciones en distintas fechas
11 o estadios fenológicos, se realizó un ANOVA para diseños multifactoriales y medidas
12 repetidas en el tiempo, considerando la “fecha” como factor. Si se detectaron efectos de
13 interacción entre la profundidad o fecha y algún otro factor, se realizaron además
14 ANOVAs (dos vías) en cada profundidad o fecha para analizar los efectos de los factores
15 principales asociados a los tratamientos. Se realizaron pruebas de comparaciones
16 múltiples de Fisher para determinar la diferencia mínima significativa (DMS) entre
17 tratamientos ($P < 0,05$). Se utilizó el programa Infostat (Di Rienzo, 2011) para realizar los
18 ANOVA y matrices de correlaciones, y el software GraphPad Prism (versión 6.01) para
19 el ajuste de curvas y análisis de diferencias entre modelos.

1 3.3. Resultados

2 3.3.1. Condiciones de crecimiento: suelo y clima

3 Las muestras del horizonte antrópico de los lotes de monocultura de soja (i.e. los
 4 tratamientos compactados, C) presentaron mayores niveles de resistencia mecánica
 5 (superiores a 1,5 MPa a capacidad de campo; y superiores a 2 MPa a 50% de agua útil),
 6 mayores niveles de densidad aparente (0-0,1 m), y una mayor proporción y espesor de
 7 tipos estructurales laminares y masivos que los lotes rotados (i.e. tratamientos no
 8 compactados, NC), (Cuadro 3.1). Los niveles de infiltración de agua y macro-porosidad
 9 resultaron más variables y no se observaron diferencias estadísticamente significativas.

10 **Cuadro 3.1** Resistencia a la penetración a capacidad de campo ($\theta_{CC=-10\text{ kPa}}$) y a 50% de agua útil
 11 ($\theta_{50\% = -100\text{ kPa}}$); densidad aparente; infiltración de agua; macro-porosidad; y espesor ponderado de
 12 estructuras laminares; y estructura por prueba de estallido (proporción de bloques <5cm), para
 13 suelos compactados y no compactados de los sitios de extracción. Se indica la media \pm 1 error
 14 estándar, y los asteriscos marcan diferencias significativas entre compactados y no compactados
 15 dentro de cada profundidad muestreada (* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$).

16

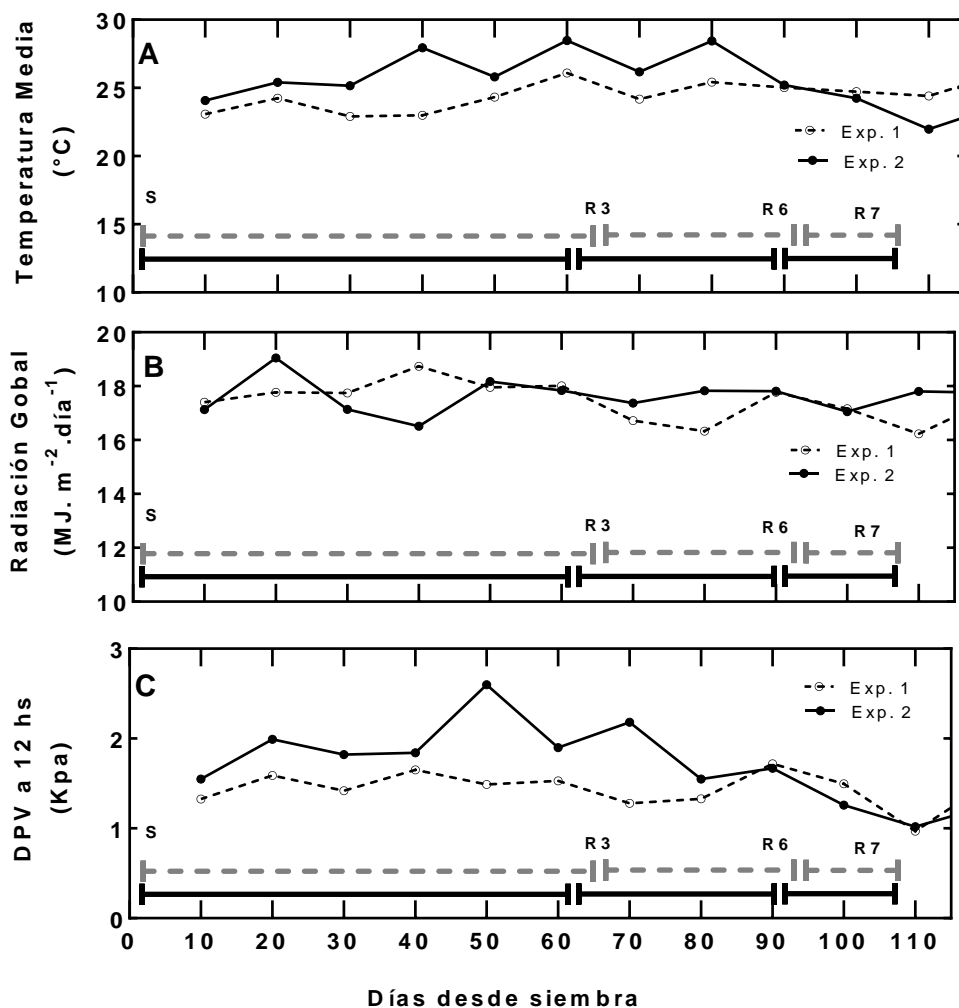
Parámetro	Profundidad (m)	Condición física		Valor P
		No compactado	Compactado	
Resistencia a la penetración a $\theta_{CC=-10\text{ kPa}}$ (MPa)	0,0-0,1	0,52 \pm 0,02	0,97 \pm 0,19	ns
	0,1-0,2	1,10 \pm 0,15	1,75 \pm 0,05	*
Resistencia a la penetración a $\theta_{50\% = -100\text{ kPa}}$ (MPa)	0,0-0,1	1,09 \pm 0,01	1,36 \pm 0,04	**
	0,1-0,2	1,68 \pm 0,11	2,21 \pm 0,08	*
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	0,0-0,1	1,25 \pm 0,02	1,33 \pm 0,03	*
	0,1-0,2	1,35 \pm 0,02	1,37 \pm 0,03	ns
Infiltración (mm h ⁻¹)	0,0-0,1	45,06 \pm 1,58	36,56 \pm 4,51	ns
	0,1-0,2	21,95 \pm 1,31	18,55 \pm 0,74	ns
Macroporosidad (cm ³ cm ⁻³)	0,0-0,1	0,15 \pm 0,01	0,14 \pm 0,01	ns
	0,1-0,2	0,11 \pm 0,01	0,08 \pm 0,02	ns
Estructuras laminares (cm)	0,0-0,2	0,65 \pm 0,26	8,02 \pm 1,30	**
Estructura por estallido (%)	0,0-0,2	59,97 \pm 3,66	40,47 \pm 3,23	*

17

18 Durante el experimento 1 (año 2014-2015), las plantas exploraron condiciones

19 de menor temperatura ambiente y menor déficit de presión de vapor (DPV) que en el

1 segundo experimento (año 2015-16), (Fig. 3.4), en especial durante el periodo vegetativo
 2 e inicios del periodo crítico para la definición del número de granos (R3-R6). A pesar
 3 que los regímenes de humedad de riego fueron los mismos en ambos experimentos, las
 4 plantas presentaron mayor temperatura foliar y mayores niveles de estrés hídrico en el
 5 experimento del segundo año (Fig. 3.5). El contraste entre años resultó más evidente en
 6 los estadios vegetativos.



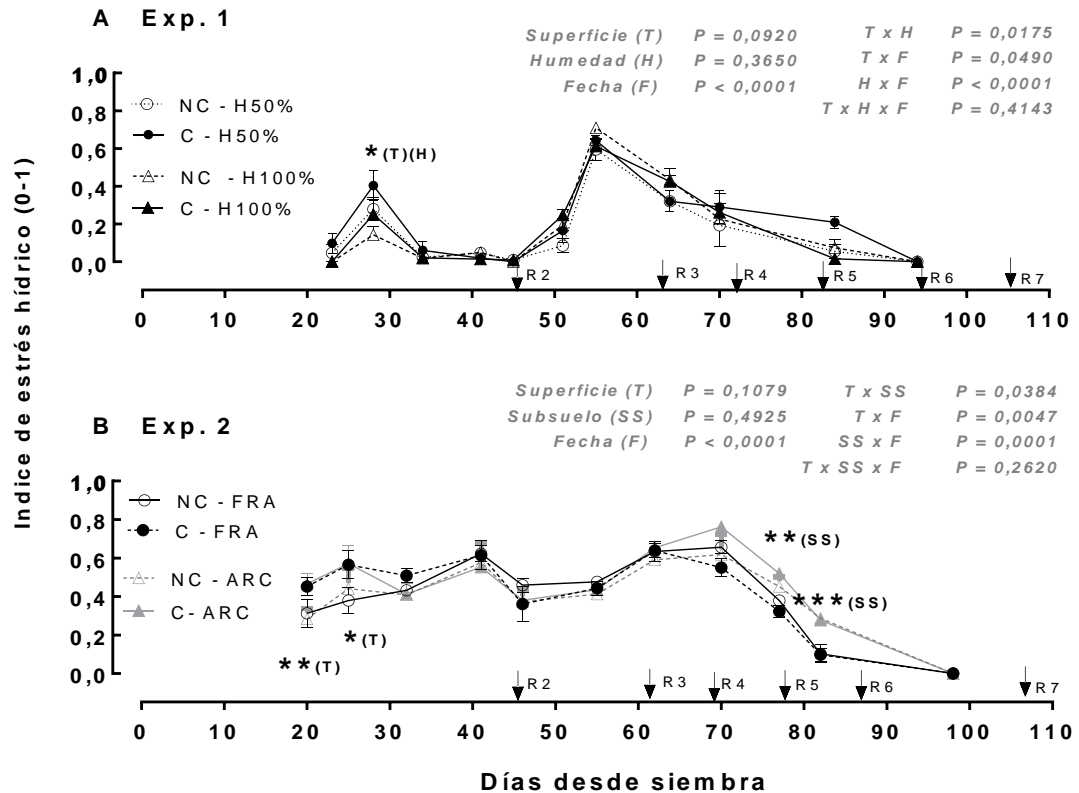
7
 8 **Figura 3.4** Valores promedio decádicos para: (A) Temperatura media diaria registrada dentro del
 9 invernáculo, (B) Radiación solar incidente diaria, y (C) déficit de presión de vapor (DPV) a las
 10 12 hs; a partir de la siembra, para los experimentos 1 (2014-15) y 2 (2015-16). Se indican las

1 etapas fenológicas de siembra (S), fructificación (R3), llenado de granos (R6) e inicio de madurez
2 fisiológica (R7)

3
4 En el experimento 1, el índice de estrés hídrico promedio a lo largo del ciclo fue
5 0,17, aunque varió entre fechas de medición ($P<0,0001$): mientras que en el período
6 vegetativo fue en promedio 0,09, en las etapas reproductivas fue cercano a 0,23; con
7 máximos cercanos a 0,6 previo al inicio del período de fijación de vainas (R3). Como se
8 observaron efectos significativos de la condición de compactación y del nivel de
9 humedad superficial con la fecha de medición, los efectos de cada factor y su interacción
10 se evaluaron dentro de cada período. En los primeros 30 días desde siembra (Fig. 3.5 A,
11 asterisco), las plantas creciendo sobre suelos compactados y con niveles de humedad del
12 50% presentaron mayores niveles de estrés hídrico que aquellas creciendo en suelos con
13 mejor condición física o mayor nivel de humedad superficial ($P<0,05$), sin efectos de
14 interacción entre estos factores. Posteriormente en el ciclo, no se observaron efectos de
15 los factores.

16 En el experimento 2 el índice de estrés hídrico promedio en el ciclo fue 0,46, y si
17 bien se modificó significativamente entre fechas ($P<0,0001$), fue menos variable a lo
18 largo del ciclo que en el experimento del año anterior. En el experimento del segundo
19 año, la compactación del suelo promovió un mayor estrés durante los estadios
20 vegetativos tempranos: las plantas creciendo en suelos compactados mostraron mayor
21 temperatura foliar y por ende mayores niveles de estrés ($P<0,05$) durante los primeros
22 25 días desde la siembra que aquellas creciendo en suelos NC (Fig. 3.5 B).
23 Posteriormente, no se observaron diferencias asociadas al estado físico superficial. Las
24 características del subsuelo ejercieron una mayor influencia durante las etapas
25 reproductivas, en especial hacia fines del período crítico: las plantas creciendo sobre

- 1 subsuelos arcillosos mostraron mayores niveles de estrés hídrico que aquellas en
 2 subsuelos franco-arenosos alrededor de R5 ($P < 0,001$), y entre R5-R6 ($P < 0,001$).



3
 4 **Figura 3.5** Índice de estrés hídrico (± 1 E.E.) a lo largo del ciclo en el experimento 1 (A) y en el
 5 experimento 2 (B), de acuerdo a la condición de compactación superficial (C: compactado o NC:
 6 no compactado), la humedad superficial (H100% vs. H50%) y las características del subsuelo
 7 (FRA: franco-arenoso, o ARC: arcilloso). Se muestra el valor P de los efectos de la condición de
 8 compactación superficial (T), Humedad superficial (H), tipo de subsuelo (SS), fecha (F) y sus
 9 interacciones. Los asteriscos indican efectos significativos de los factores (* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$;
 10 *** $P < 0,001$) dentro de cada fecha. Las flechas indican los eventos fenológicos de R2 a R7.

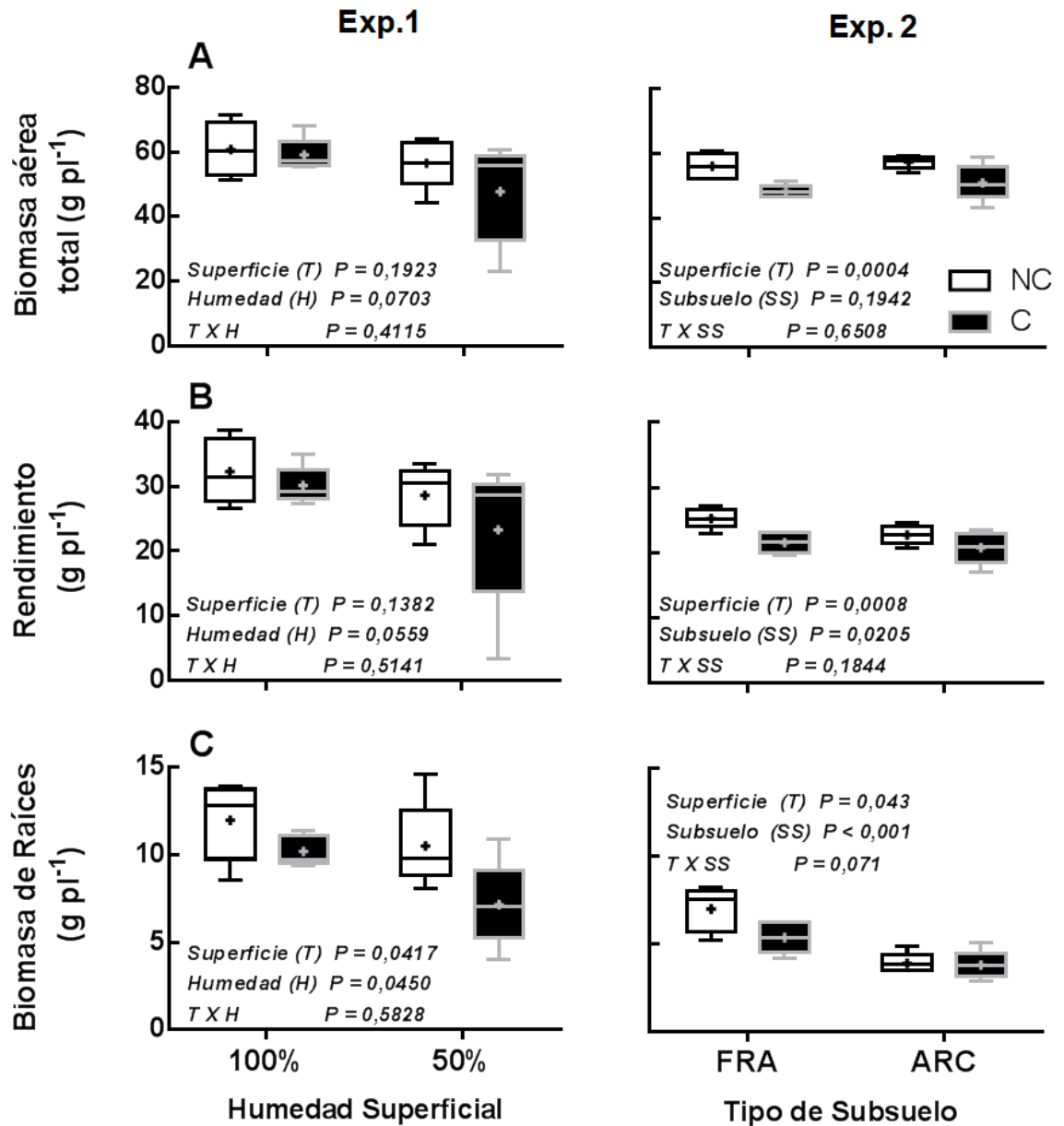
11 3.3.2. Crecimiento y partición

12 La compactación superficial no afectó significativamente ni la biomasa aérea
 13 total ($P=0,19$), ni la producción de grano ($P=0,13$) en el experimento 1 (Fig. 3.6 A y B).
 14 No obstante, la compactación redujo significativamente la biomasa radical en un 21%
 15 ($P < 0,05$; Fig. 3.6 C). No se observaron efectos significativos del nivel de humedad
 16 superficial sobre el rendimiento ($P=0,06$) o la biomasa aérea ($P=0,07$), pero las plantas

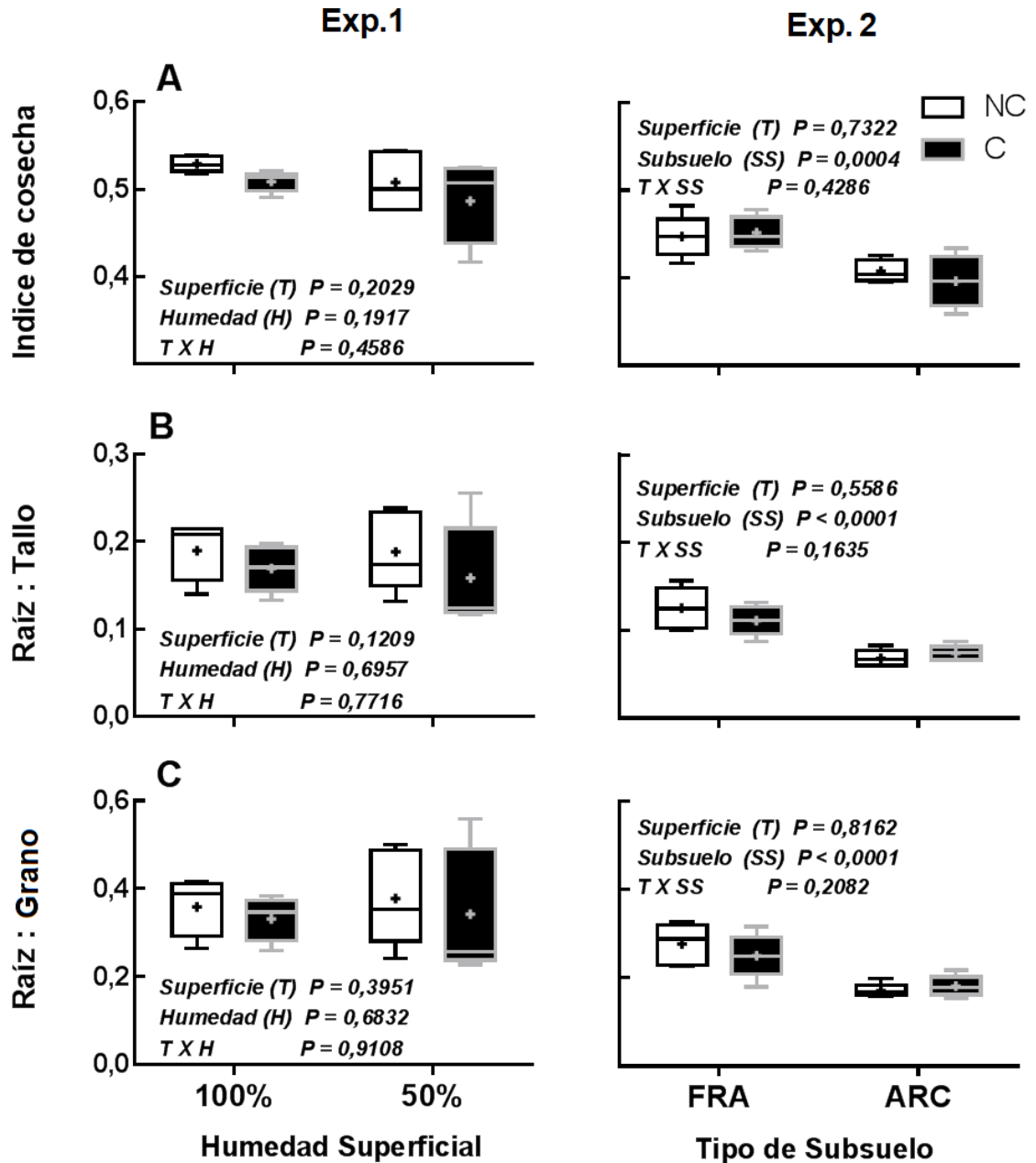
1 creciendo en 50% de humedad superficial presentaron una biomasa radical un 20%
2 menor respecto de aquellas creciendo en 100% de humedad ($P < 0,05$). No se observaron
3 efectos de interacción entre la condición física del suelo y el nivel de humedad superficial
4 sobre ninguno de los parámetros de crecimiento. Si bien la prueba de Levene sobre los
5 residuales absolutos indicó homogeneidad general de varianzas en los distintos
6 parámetros ($P > 0,5$), las plantas creciendo sobre suelos compactados con 50% de
7 humedad superficial presentaron una mayor variabilidad que aquellas sobre suelos NC.
8 Se observaron especialmente registros más bajos de biomasa de grano, total y de raíz en
9 las plantas creciendo en suelos compactados y 50% de humedad (Fig. 3.6 A, B y C). No
10 se evidenciaron efectos significativos de los tratamientos sobre la partición de biomasa
11 en este experimento (índice de cosecha, la relación raíz: tallo, o en la relación raíz: grano;
12 Fig. 3.7 A-C).

13 En el experimento 2, la compactación redujo en promedio la biomasa aérea un
14 12% ($P < 0,001$; Fig. 3.6 A), el rendimiento en 11 % ($P < 0,001$, Fig. 3.6 B), y la biomasa
15 de raíz en 16% ($P < 0,05$; Fig. 3.6 C), mientras que no se observaron efectos significativos
16 en el índice de cosecha, en la relación raíz : tallo o raíz :grano (Fig. 3.7 A-C). El tipo de
17 subsuelo no afectó la biomasa aérea total, pero los subsuelos arcillosos redujeron
18 significativamente la biomasa de raíces (-37%; $P < 0,0001$, Fig. 3.6 C) y el rendimiento (-
19 7%; $P < 0,05$) comparado con los subsuelos franco-arenosos, independientemente de la
20 condición física superficial. Los subsuelos arcillosos redujeron también
21 significativamente el índice de cosecha, la relación raíz : tallo y raíz : grano (Fig. 3.7 A-
22 C). No se observaron efectos de interacción entre el tipo de subsuelo y la compactación
23 superficial sobre la biomasa aérea o subterránea, pero la magnitud de la diferencia entre

- 1 plantas creciendo en suelos compactados y no compactados en los distintos parámetros
- 2 de crecimiento tendió a ser mayor en suelos franco arenosos que en arcillosos.



3
 4 **Figura 3.6** (A) Biomasa aérea total; (B) rendimiento en grano; y (C) biomasa de raíz, en plantas
 5 de soja, según la humedad superficial (50 vs. 100%) y la condición de compactación superficial
 6 (C: compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 1 (paneles izquierda); o según la
 7 condición de compactación y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs. ARC: arcillosos) en
 8 el experimento 2 (paneles derecha). Se indica el valor P de los efectos de los factores: condición
 9 de compactación superficial (T), humedad superficial (H), tipo de subsuelo (SS) y su interacción.
 10 Los extremos de las cajas indican los percentiles P10 y P90, y la cruz la media de los tratamientos.



1
 2 **Figura 3.7** (A) Índice de cosecha; (B) relación raíz: tallo; y (C) relación raíz: grano en plantas
 3 de soja, según la humedad superficial (50 vs. 100%) y la condición de compactación superficial
 4 (C: compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 1 (paneles columna izquierda); o
 5 según la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs.
 6 ARC: arcillosos) en el experimento 2 (paneles columna derecha). Todas las variables en el eje
 7 de ordenadas son adimensionales. Referencias igual a Figura 3.6.
 8

1 **3.3.3. Características y distribución del sistema radical**

2 En el experimento 1, la compactación de 0-20 cm redujo la longitud y superficie
3 de raíces, independientemente del nivel de humedad superficial. En promedio, las plantas
4 creciendo en suelos compactados presentaron una longitud de raíces por planta 24%
5 menor ($P=0,0134$) y una superficie de raíces por planta 27% menor ($P=0,0154$) que las
6 plantas creciendo en suelos no compactados. Menores niveles de humedad superficial
7 redujeron significativamente la longitud ($P=0,0055$) y superficie de raíces ($P=0,0164$).
8 En cambio, la longitud y la superficie específicas de raíces no fueron afectadas por los
9 tratamientos (Cuadro 3.2). No se observaron efectos de interacción entre la humedad y
10 la compactación del suelo en ningún parámetro.

11 En el experimento 2, la compactación redujo en un 36% ($P<0,0001$) la longitud
12 total de raíces, en un 37% la superficie total de raíces ($P=0,0002$), en un 26% la longitud
13 específica ($P<0,0001$), y en un 27% la superficie específica ($P=0,0006$). El tipo de
14 subsuelo afectó significativamente ($P<0,0001$) los distintos atributos del sistema radical:
15 los subsuelos arcillosos redujeron la longitud total de raíces en un 59%, la superficie de
16 raíces en un 63%, y la longitud y superficie específicas en un 34 y 40%, respectivamente.

17 Las diferencias absolutas entre las plantas creciendo en suelos compactados y no
18 compactados en cuanto a las características de las raíces (longitud total, superficie total
19 y longitud específica) fueron mayores en las plantas creciendo en subsuelos franco-
20 arenosos que en subsuelos arcillosos, por lo que se observaron efectos de interacción
21 significativos entre el nivel de compactación superficial y el tipo subsuelo (Cuadro 3.2).

22
23
24

1 **Cuadro 3.2** Longitud total, superficie total, longitud específica y superficie específica de raíces,
 2 a nivel de planta entera, en soja creciendo en suelos con en condiciones compactadas (C) o no
 3 compactadas (NC), sobre suelos con 100% o 50% de humedad superficial (H), o sobre subsuelos
 4 franco-arenosos (FRA) o arcillosos (ARC), en los experimentos 1 y 2. Se indica el valor P de los
 5 efectos de los factores: condición de compactación superficial (T), humedad superficial (H), tipo
 6 de subsuelo (SS) y su interacción; y la diferencia mínima significativa por prueba de Fischer
 7 entre tratamientos (DMS; $P < 0,05$).
 8

		Parámetro					
Subsuelo	H	Superficie	Longitud de Raíz (cm.pl ⁻¹)	Superficie de Raíz (cm ² .pl ⁻¹)	Longitud específica de Raíz (cm.g ⁻¹)	Superficie específica de Raíz (cm ² .g ⁻¹)	
Experimento 1	FRA	100%	NC	24088 ± 2414	2635 ± 253	2091 ± 189	228 ± 19
			C	21588 ± 2473	2022 ± 176	2201 ± 296	203 ± 13
		50%	NC	20722 ± 1440	2030 ± 215	2110 ± 179	203 ± 11
			C	12664 ± 2128	1379 ± 245	1768 ± 254	200 ± 30
	<i>Efectos</i>		<i>Superficie (T)</i>	<i>P=0,0134</i>	<i>P=0,0154</i>	<i>P=0,4261</i>	<i>P=0,1809</i>
			<i>Humedad (H)</i>	<i>P=0,0055</i>	<i>P=0,0164</i>	<i>P=0,1677</i>	<i>P=0,1701</i>
			<i>T X H</i>	<i>P=0,1531</i>	<i>P=0,9328</i>	<i>P=0,1340</i>	<i>P=0,7546</i>
			<i>DMS= 5614</i>	<i>DMS=690</i>	<i>DMS=433</i>	<i>DMS=45</i>	
Experimento 2	FRA	50%	NC	17100 ± 562	1988 ± 131	2496 ± 163	289 ± 23
			C	11405 ± 1051	1250 ± 163	2123 ± 92	229 ± 13
	ARC		NC	7388 ± 484	727 ± 41	1917 ± 145	187 ± 7
			C	4151 ± 494	454 ± 58	1096 ± 92	119 ± 9
	<i>Efectos</i>		<i>Superficie (T)</i>	<i>P < 0,0001</i>	<i>P = 0,0002</i>	<i>P < 0,0001</i>	<i>P = 0,0006</i>
			<i>Subsuelo (SS)</i>	<i>P < 0,0001</i>	<i>P < 0,0001</i>	<i>P < 0,0001</i>	<i>P < 0,0001</i>
			<i>T X SS</i>	<i>P = 0,0200</i>	<i>P = 0,0308</i>	<i>P = 0,0366</i>	<i>P = 0,7740</i>
			<i>DMS= 1415</i>	<i>DMS=292</i>	<i>DMS=293</i>	<i>DMS=42</i>	

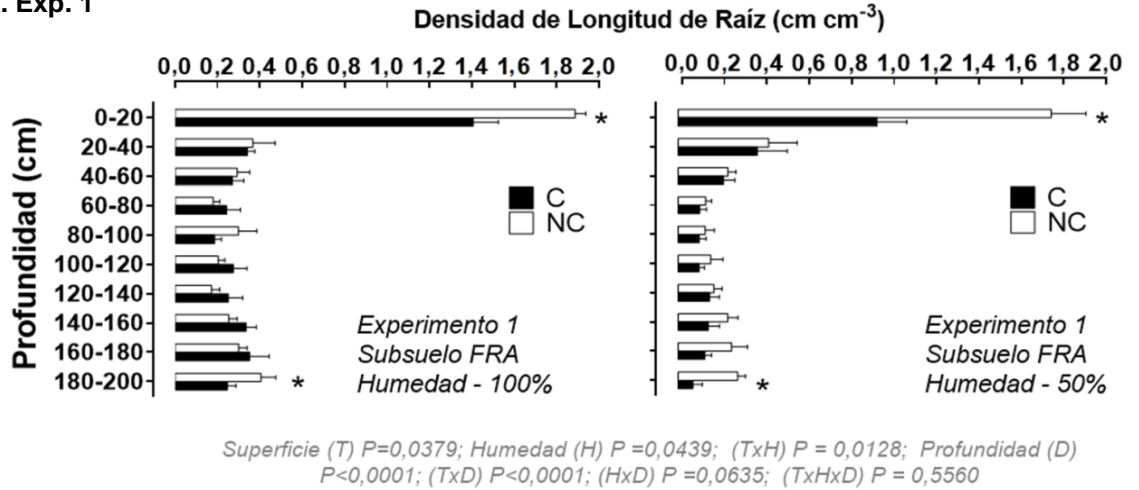
9
 10 El perfil de distribución de raíces (Fig. 3.8 A y B) muestra que las diferencias
 11 asociadas a la compactación se generaron principalmente en los primeros 20 cm. En esta
 12 capa, donde se concentró la mayor proporción de raíces, la compactación superficial
 13 afectó el crecimiento de raíces independientemente de los niveles de contenido hídrico
 14 inicial. Los tratamientos no compactados produjeron en promedio 43% más longitud de
 15 raíces que los tratamientos compactados, respectivamente, en este primer horizonte
 16 ($P < 0,05$; Fig. 3.8 A). A su vez, se observaron diferencias significativas asociadas a la

1 compactación de 0-20 cm en las raíces del subsuelo. Las plantas que crecieron en suelos
2 compactados presentaron una menor proliferación de raíces ($P<0,05$) en los estratos más
3 profundos (180-200 cm; Figs. 3.8 y 3.9). El contenido hídrico superficial afectó la
4 longitud de raíces en prácticamente todos los estratos ($P<0,05$), pero no se observaron
5 efectos de interacción entre la compactación y el contenido hídrico.

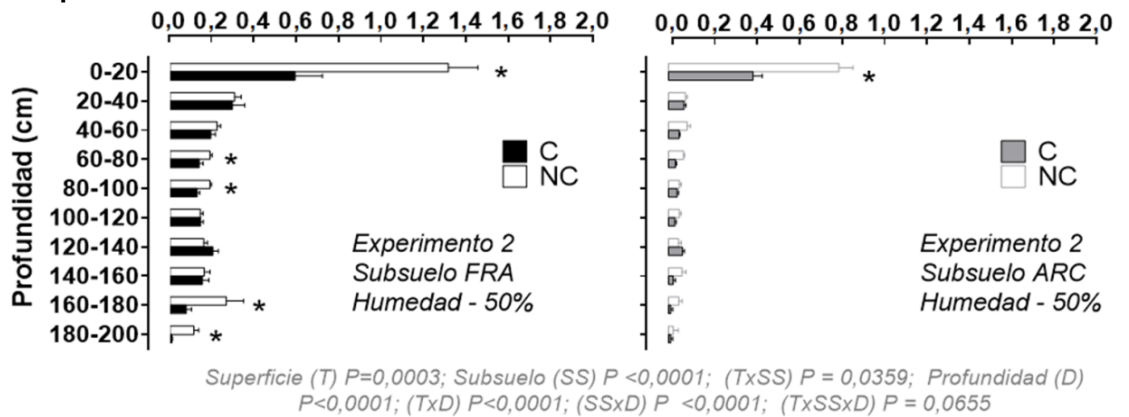
6 En el experimento 2, la compactación superficial redujo significativamente la
7 densidad de longitud de raíces en el estrato 0-20 cm, tanto en suelos franco-arenosos
8 como arcillosos (-53% en promedio, Fig. 3.8 B). En cambio, en los estratos
9 subsuperficiales, el tipo de subsuelo reguló el efecto de la compactación sobre el
10 crecimiento radical. En los subsuelos franco-arenosos la compactación redujo
11 significativamente ($P<0,05$) la longitud de raíces en distintas profundidades: 60-80, 80-
12 100, 160-180 y 180-200 cm (Fig. 3.9). Por el contrario, los elevados contenidos de arcilla
13 limitaron la proliferación de raíces en las distintas profundidades del subsuelo, sin
14 manifestarse diferencias significativas entre C y NC.

15

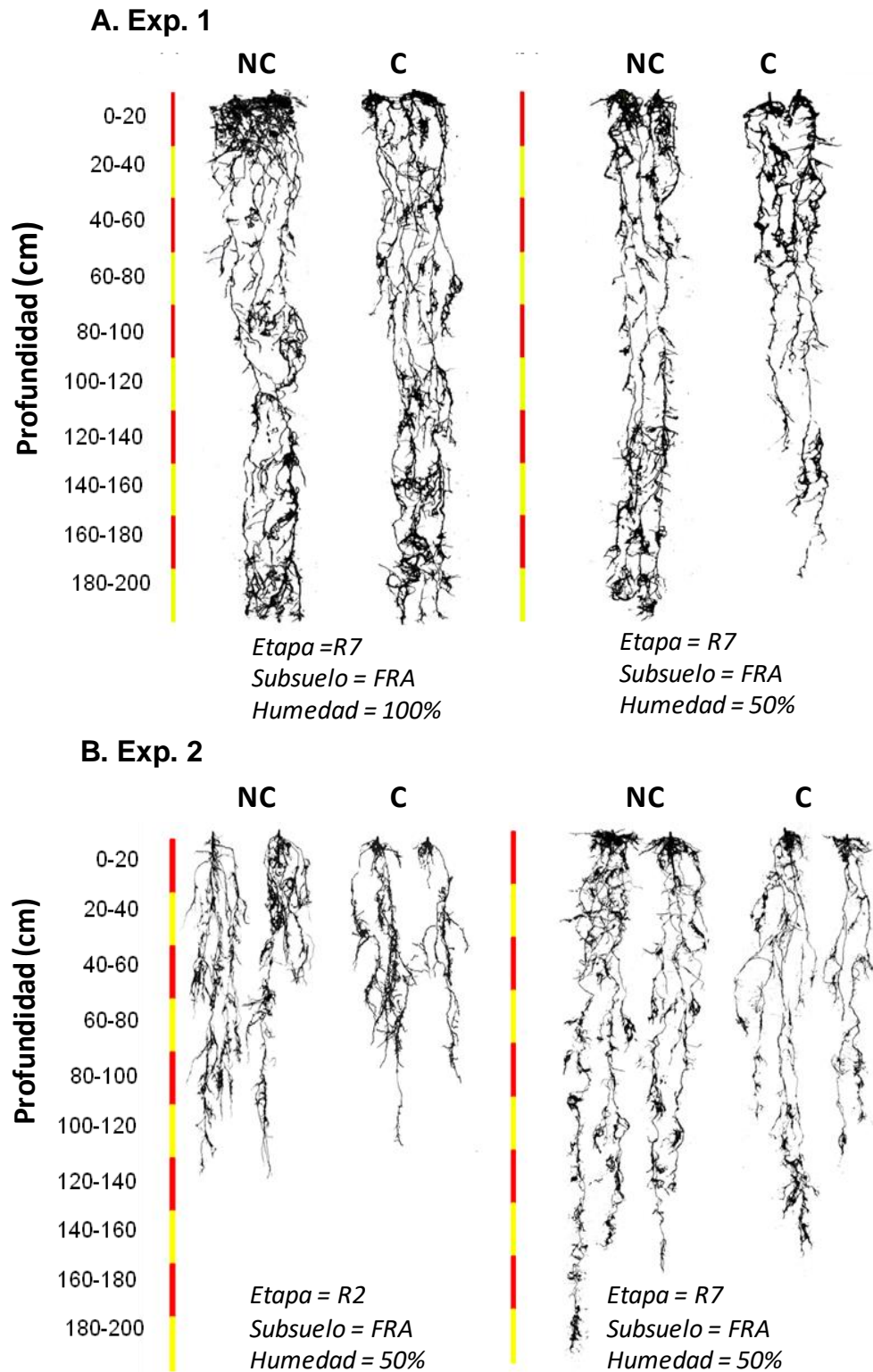
A. Exp. 1



B. Exp. 2



1
2 **Figura 3.8** Distribución de la Densidad de Longitud de Raíces en R7 para plantas de soja, según
3 la condición de compactación superficial (C: compactado vs. NC: no compactado) y la humedad
4 superficial (50 vs. 100%) en el experimento 1 (A, arriba); o según la condición de compactación
5 superficial (C vs. NC) y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs. ARC: arcillosos) en el
6 experimento 2 (B, abajo). Se muestra el valor P de los efectos de la condición de compactación
7 superficial (T), Humedad superficial (H), tipo de subsuelo (SS), profundidad (D) y sus
8 interacciones. Los asteriscos indican diferencias significativas entre C y NC dentro de cada
9 profundidad (* P<0,05) cuando se observaron efectos significativos de interacción entre la
10 condición de compactación superficial y algún otro factor. Las barras muestran el error estándar.



1
2 **Figura 3.9** Imágenes digitales del sistema de raíces de soja creciendo en suelos compactados (C)
3 y no compactados (NC) superficialmente, provenientes de cosechas sin disturbar del experimento
4 1 (A) o del experimento 2 (B). Se muestran sólo las cosechas sobre subsuelos franco-arenosos
5 (FRA).

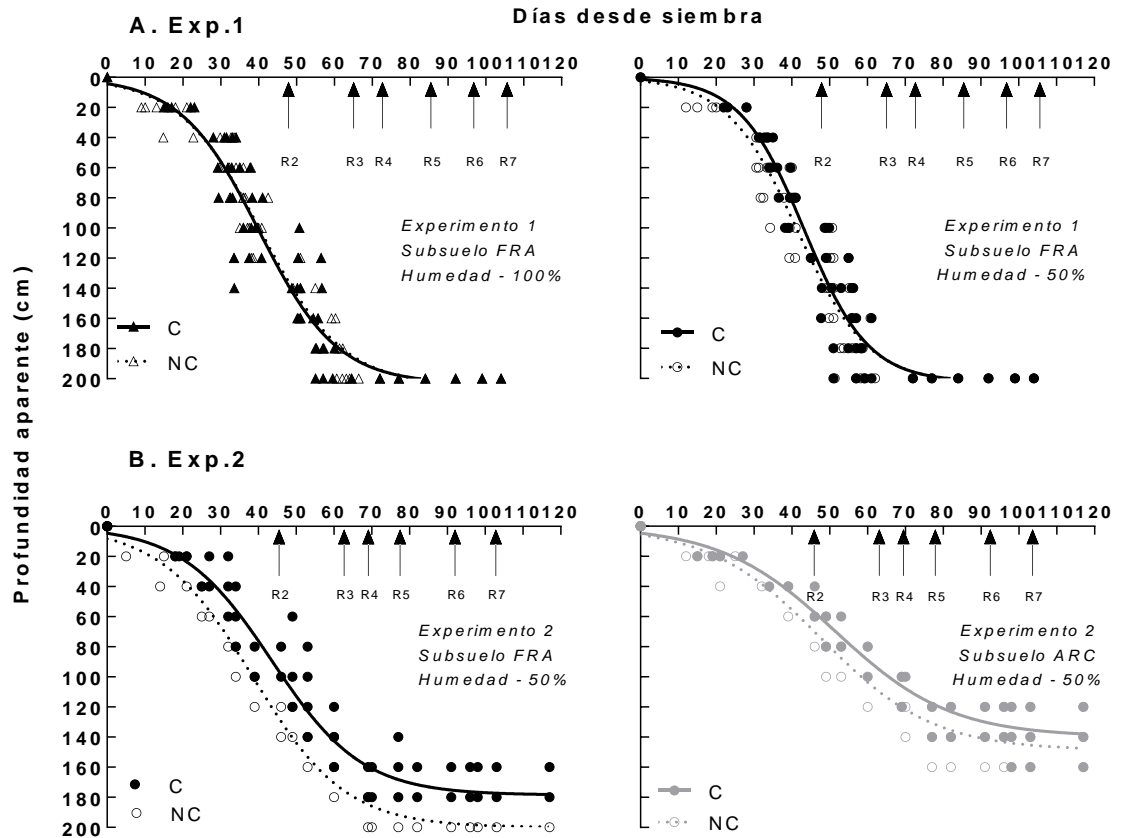
1 **3.3.4. Profundización aparente de raíces**

2 Tanto en el experimento 1 como en el experimento 2 se observaron diferencias entre
3 tratamientos en cuanto a la dinámica de profundización de raíces. En el experimento 1,
4 la compactación y el contenido hídrico superficial del suelo afectaron significativamente
5 ($P < 0,05$) la tasa de crecimiento inicial de raíces, sin interacción entre ambos factores.
6 Los tratamientos compactados tardaron cinco días más que los no compactados en
7 atravesar los 20 cm del horizonte superficial. Los tratamientos con menor contenido
8 hídrico (H-50%) tardaron a su vez cinco días más que los tratamientos menos restrictivos
9 en humedad superficial (H-100%).

10 El análisis mediante modelos sigmoideos ($r^2 > 0,93$) mostró diferencias
11 significativas asociadas a los tratamientos en este experimento ($P = 0,0016$; Fig. 3.10 A).
12 Con 100% de humedad, una vez atravesados los primeros 20 cm, no se observaron
13 diferencias entre plantas creciendo en suelos compactados o no compactados en la
14 dinámica de profundización a lo largo el ciclo. Con 50% de humedad, la compactación
15 mantuvo el retraso inicial en la profundización de raíces durante las etapas vegetativas.
16 Sin embargo, para el inicio de las etapas reproductivas, la profundidad aparente de raíces
17 resultó similar entre C y NC, a partir de una mayor tasa de profundización en C
18 (parámetro “b”; $P < 0,05$; Cuadro 3.3). En R4, las plantas de los distintos tratamientos
19 alcanzaron una profundidad máxima de 200 cm. El análisis por modelos bilineales
20 mostró una tendencia similar ($r^2 > 0,92$; $P < 0,0001$ entre tratamientos). Mediante este
21 modelo se pudo estimar que el retraso inicial en la profundización de raíces en plantas
22 creciendo en suelos compactados en condiciones de menor humedad, fue compensado

1 posteriormente en el ciclo a partir de mayores tasas de profundización (4,81 vs 4,18
2 cm.día⁻¹ en C y NC respectivamente, P<0,05; Cuadro 3.3).

3 Al igual que en el experimento 1, en el experimento 2 la compactación
4 superficial retrasó (P<0,01) la profundización inicial de raíces, y en promedio los
5 tratamientos de C tardaron 7 días más que los tratamientos NC en atravesar el estrato 0-
6 20 cm. Una vez atravesados los primeros 20 cm, la dinámica de profundización se vio
7 afectada tanto por el estado físico del horizonte superficial como por las características
8 texturales del subsuelo. El análisis mediante modelos sigmoideos ($r^2>0,92$) o lineales
9 ($r^2>0,89$, Cuadro 3.3) evidenció diferencias significativas entre tratamientos en la
10 dinámica de profundización (P<0,0001), siendo las diferencias entre C y NC mayores en
11 subsuelos franco-arenosos (Fig. 3.10 B). En estos subsuelos, la compactación generó un
12 retraso en la profundización en las etapas tempranas que se mantuvo a lo largo del ciclo:
13 para R2, las plantas en NC alcanzaron una profundidad de raíces 40 cm mayor a las de
14 plantas en C y la máxima profundidad alcanzada a R5 fue diferente (~180 vs 200 cm en
15 C y NC, respectivamente; parámetro “p”, Cuadro 3.3). En cambio, los subsuelos
16 arcillosos restringieron notablemente la profundización; luego de atravesar los primeros
17 20 cm las tasas de profundización resultaron similares (P>0,05) entre C y NC, y no se
18 observaron diferencias significativas en la máxima profundidad alcanzada (~144 cm en
19 promedio; parámetro “p”, Cuadro 3.3).



1

2 **Figura 3.10** Evolución de la profundidad aparente de profundización de raíces para plantas de
 3 soja según la humedad superficial (50 vs. 100%) y la condición de compactación superficial (C:
 4 compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 1 (A, arriba); o según la condición de
 5 compactación superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs. ARC: arcillosos) en el
 6 experimento 2 (B, abajo). Las curvas muestran los ajustes por modelos sigmoideos y las flechas
 7 los eventos fenológicos reproductivos (R2 a R7).

Cuadro 3.3 Valores estimados para los parámetros del modelo sigmoideo de profundización aparente de raíces $y = a + \frac{(p-a)}{1+10^{(m-t).b}}$, y del modelo bilineal $y = a + b.t$ según la humedad superficial (H50 vs. H100%) y la condición de compactación superficial (C: compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 1; o según la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs. ARC: arcillosos) en el experimento 2. Se indica el error estándar de la estimación. Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas en la estimación entre contrastes de C y NC (*, **, para $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$, y ns = no significativa).

		Modelo Sigmoideo Parámetros					Modelo bilineal Parámetros			
		Humedad superficial	Compactación	“p” (Prof. Máxima)	“m” (Días a p/2)	“b” (Tasa)	“b” (Tasa)	“a” (Ordenada al origen)		
Subsuelo				cm	días	0-1	cm.día ⁻¹	“días”		
Experimento 1	FRA	H-100%	C		203±3,4	45,9±0,8	0,04±0,002	4,01±0,19	-79,2±8,6	ns
			NC	ns	204±3,8	45,3±0,7	0,04±0,003	3,69±0,12	-61,3±5,8	ns
	H-50%	C		200±3,4	41,4±0,7	0,06±0,003	4,87±0,22	-106±9,2	*	
		NC	ns	201± 3,3	43,3±0,6	0,04±0,003	4,18±0,23	-69±9,6	*	
Experimento 2	FRA	H-50%	C	*	178±3,1	43,5±0,9	0,03±0,002	3,18±0,7	-46,3±6,7	*
			NC	*	200± 0,5	38,5±0,5	0,03±0,001	3,11±0,6	-21,6±3,2	*
	ARC	H-50%	C	ns	140± 3,6	51,5±1,5	0,02±0,002	1,79±0,11	-21,1±5,9	*
			NC	*	148± 4,1	47,7±1,7	0,02±0,003	1,89±0,12	-14,8±6,9	*

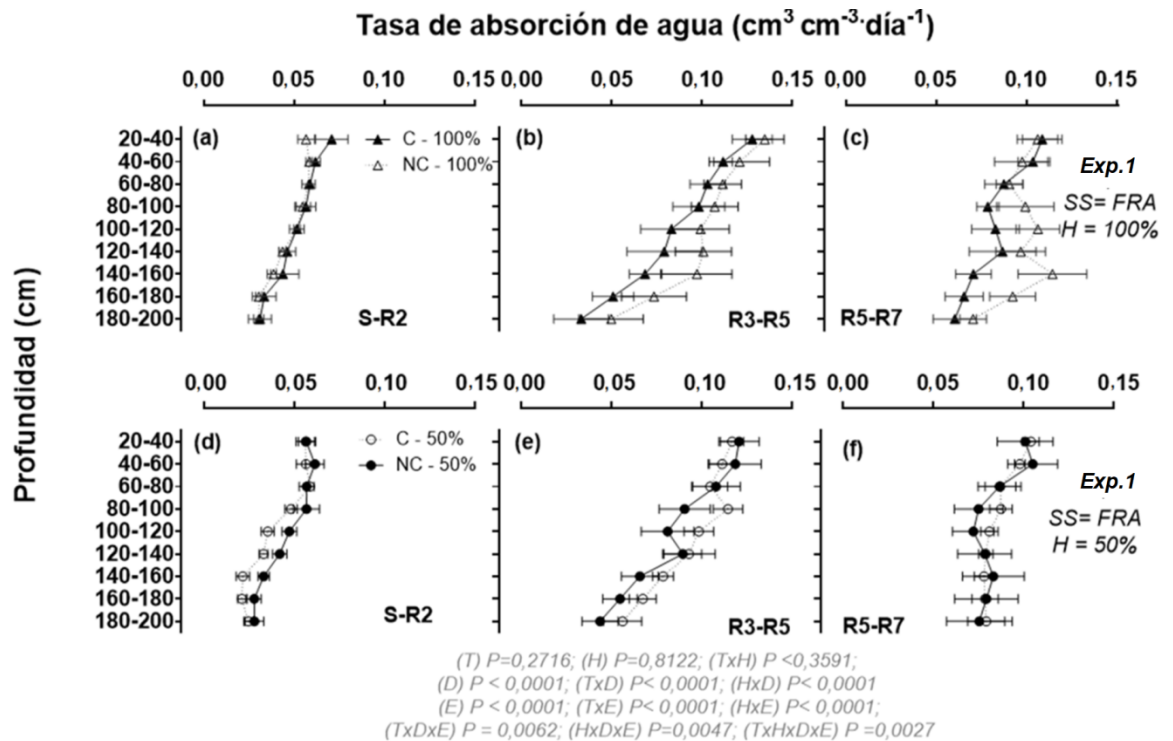
1 **3.3.5. Patrones de extracción de agua y consumo total de agua**

2 Las tasas de extracción de agua variaron significativamente entre estadios
3 fenológicos a lo largo del ciclo ($P < 0,0001$) en ambos experimentos. En el experimento
4 1, en todos los estratos y tratamientos, durante el período vegetativo hasta floración se
5 registraron tasas de absorción en general menores al 5% diario del contenido de agua útil
6 del suelo (Fig. 3.11 a, d). Durante el período crítico R3-R5 (fructificación-inicio de
7 llenado de granos), las tasas de extracción promedio de los distintos estratos y
8 tratamientos alcanzaron valores cercanos al 9% diario del contenido de agua útil del
9 suelo (Fig. 3.11 b, e), con tasas máximas en los estratos superiores. Durante el período
10 de llenado de granos (R5-R7), las tasas de extracción promedio de los distintos
11 tratamientos y estratos fueron similares a las del período R3-R5 (~8% diario del
12 contenido de agua útil del suelo): mientras que se incrementaron las tasas de extracción
13 de las capas más profundas a valores superiores al 5% (+140 cm), se redujeron las tasas
14 de los horizontes a valores inferiores al 10% (Fig. c, f).

15 En este experimento 1, la compactación superficial no afectó significativamente
16 las tasas de extracción de agua de las raíces del subsuelo, pero las plantas creciendo con
17 100% de humedad superficial presentaron mayores tasas de extracción entre 120 y 160
18 cm entre siembra y R2 ($P < 0,05$). Se observaron así sólo efectos significativos de los
19 niveles de humedad superficial sobre el consumo total de agua (Cuadro 3.4), explicados
20 principalmente a partir de las diferencias en la velocidad de extracción y en el consumo
21 de agua hasta R3.

22

23



1

2 **Figura 3.11** Tasas de absorción de agua [cm^3 agua (cm^3 agua útil del suelo) $^{-1}$ día $^{-1} \pm 1$ error
3 estándar] a diferentes profundidades, durante siembra-floración (a y d: S-R2), fijación de vainas-
4 llenado de granos (b y e: R3-R5), y llenado de grano-madurez (c y f: R5-R7); según la humedad
5 superficial (50% en paneles superiores; 100% en paneles inferiores) y la condición de
6 compactación superficial (C: compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 1. Se
7 muestra el valor P de los efectos de humedad superficial (H), la condición de compactación
8 superficial (T), profundidad (D), etapa fenológica (E), y sus interacciones. Los asteriscos indican
9 diferencias entre C y NC dentro de cada profundidad y etapa (* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$).

10

1 **Cuadro 3.4** Consumo de agua en las etapas de siembra-fijación de vainas (S-R3), fijación de
 2 vainas-llenado (R3-R5), y llenado de grano a madurez (R5-R7), para plantas de soja de acuerdo
 3 a la humedad superficial (H 50 vs. 100%) y la condición de compactación superficial (C:
 4 compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 1. Se indican los efectos de los factores
 5 humedad (H), condición de compactación superficial (T) y sus interacciones (ns = efectos no
 6 significativos, $\alpha= 0,05$), según el experimento; y la diferencia mínima significativa (DMS,
 7 $P<0,05$).
 8

Experimento 1					
Humedad (H)	Comp. (T)	Consumo de agua (mm)			
		S-R3	R3-R5	R5-R7	S-R7
100%	NC	313	101	141	556
	C	296	93	136	526
50%	NC	264	101	131	497
	C	258	95	124	478
<i>Efectos</i>	<i>H</i>	<0,0001	ns	ns	<0,0001
	<i>T</i>	ns	ns	ns	ns
	<i>H x T</i>	0,0924	ns	ns	ns
	<i>DMS</i>	15	11	19	42

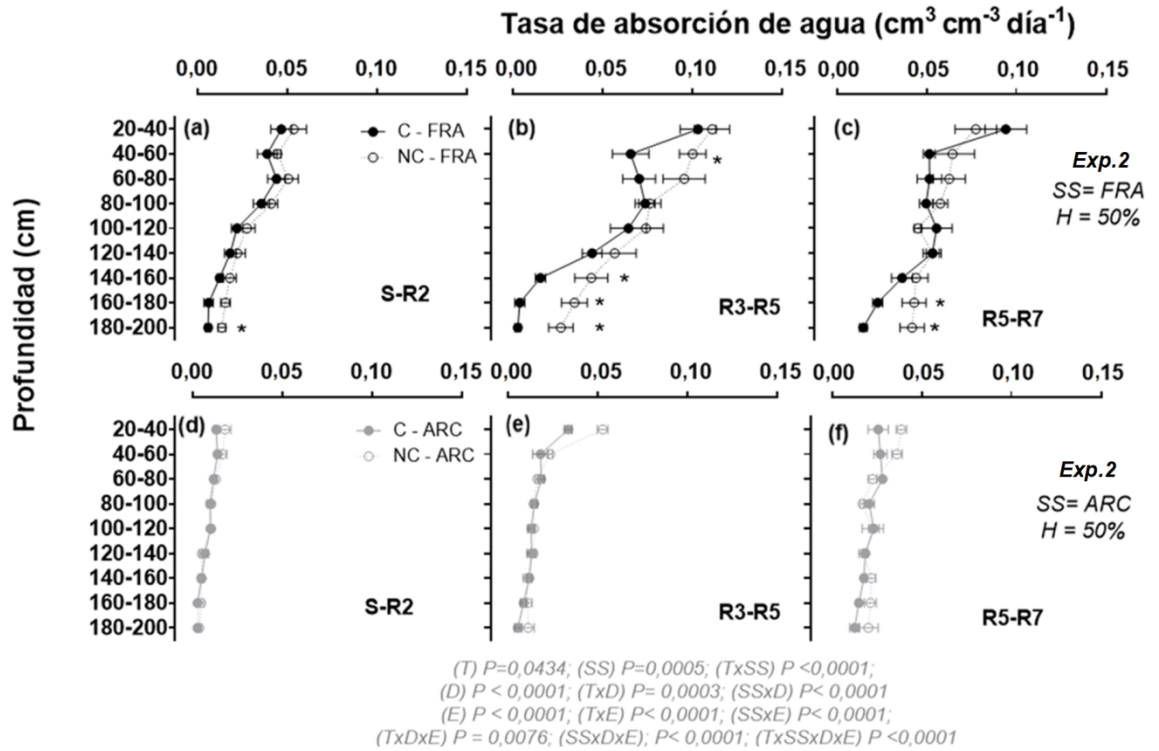
9

10 La variación en las tasas de extracción promedio de los distintos tratamientos
 11 entre estadios fenológicos en el experimento 2, mostró un comportamiento similar a lo
 12 observado en el experimento 1 (Fig. 3.12): las tasas de extracción resultaron menores en
 13 el período vegetativo, prácticamente se duplicaron hacia el período R3-R5, y se
 14 mantuvieron en niveles similares en R5-R7. Las diferencias entre tratamientos resultaron
 15 más claras en el experimento 2. Tanto las características del subsuelo como el estado
 16 físico superficial afectaron significativamente las tasas de extracción. En promedio, las
 17 plantas que crecieron en suelos compactados presentaron menores tasas de extracción
 18 ($P=0,04$) que aquellas en NC. En subsuelos franco arenosos, las tasas de extracción
 19 observadas en NC resultaron mayores ($P<0,05$) que las de C; a profundidades de 180 cm

1 entre siembra-R2 (Fig. 3.12: a); a profundidades mayores a 140 cm entre R3-R5 (Fig.
2 3.12: b), y a profundidades mayores a 160 cm entre R5-R7 (Fig. 3.12: c). Los subsuelos
3 arcillosos limitaron la extracción de agua más allá de los primeros 20 cm respecto de los
4 subsuelos franco arenosos a lo largo de todo el ciclo ($P=0,0005$), y no se observaron
5 diferencias entre C y NC bajo estas condiciones (Fig. 3.12: d-e).

6 Así, en el experimento 2 se observaron efectos significativos tanto del subsuelo
7 como de la historia agrícola sobre el consumo total de agua en el ciclo (Cuadro 3.5). Los
8 subsuelos arcillosos restringieron el consumo de agua especialmente a partir de R3,
9 cuando se incrementó la demanda de agua del cultivo, y en promedio se extrajeron 48
10 mm menos en el ciclo que en subsuelos franco arenosos. A su vez, los tratamientos C
11 presentaron niveles de consumo un 10% menores que los NC, y estas diferencias se
12 acrecentaron en subsuelos FRA.
13

1



2

3 **Figura 3.12** Tasas de absorción de agua [cm^3 agua (cm^3 agua útil del suelo) $^{-1}$ día $^{-1}$ \pm 1 error
4 estándar] a diferentes profundidades, durante siembra-floración (a y d: S-R2), fijación de vainas-
5 llenado de granos (b y e: R3-R5), y llenado de grano-madurez (c y f: R5-R7); según la condición
6 de compactación superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos en paneles superiores;
7 vs. ARC: arcillosos, en paneles inferiores) en el experimento 2. Se muestra el valor P de los
8 efectos de la condición de compactación superficial (T), tipo de subsuelo (SS); profundidad (D),
9 etapa fenológica (E), y sus interacciones. Los asteriscos indican diferencias entre C y NC dentro
10 de cada profundidad y etapa (* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$).

11

1 **Cuadro 3.5** Consumo de agua en las etapas de siembra-fijación de vainas (S-R3), fijación de
 2 vainas-llenado (R3-R5), y llenado de grano a madurez (R5-R7), para plantas de soja de acuerdo
 3 a la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs. ARC:
 4 arcillosos) en el experimento 2. Se indican los efectos de los factores: condición de compactación
 5 superficial (T) y subsuelo (SS), y sus interacciones (ns = efectos no significativos, $\alpha= 0,05$) y la
 6 diferencia mínima significativa (DMS, $P<0,05$).

7

Experimento 2					
Subsuelo (SS)	Comp. (T)	Consumo de agua (mm)			
		S-R3	R3-R5	R5-R7	S-R7
FRA	NC	219	108	189	517
	C	213	90	161	465
ARC	NC	264	79	144	488
	C	217	68	139	426
<i>Efectos</i>	<i>SS</i>	ns	<0,001	<0,0001	<0,05
	<i>T</i>	ns	<0,05	<0,01	<0,05
	<i>SS x T</i>	ns	ns	<0,05	ns
	<i>DMS</i>	32	17	15	59

8

9 En ambos experimentos se observaron diferencias en la capacidad para absorber
 10 agua por unidad de raíz (i.e. absorción específica). En promedio, las plantas que
 11 crecieron en suelos compactados tuvieron mayores tasas de absorción específicas que
 12 aquellas en suelos no compactados (0,30 vs 0,23 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{día}^{-1}$ en el experimento 1,
 13 $P=0,0084$; y 0,30 vs 0,22 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{día}^{-1}$ en el experimento 2; para C y NC
 14 respectivamente; $P=0,0391$). Del mismo modo, las plantas sobre suelos arcillosos
 15 tuvieron una mayor absorción específica que aquellas en suelos franco arenosos (0,33 vs
 16 0,21 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{día}^{-1}$ para arcillosos y franco-arenosos y respectivamente; $P=0,02$), (Fig.
 17 3.13 A).

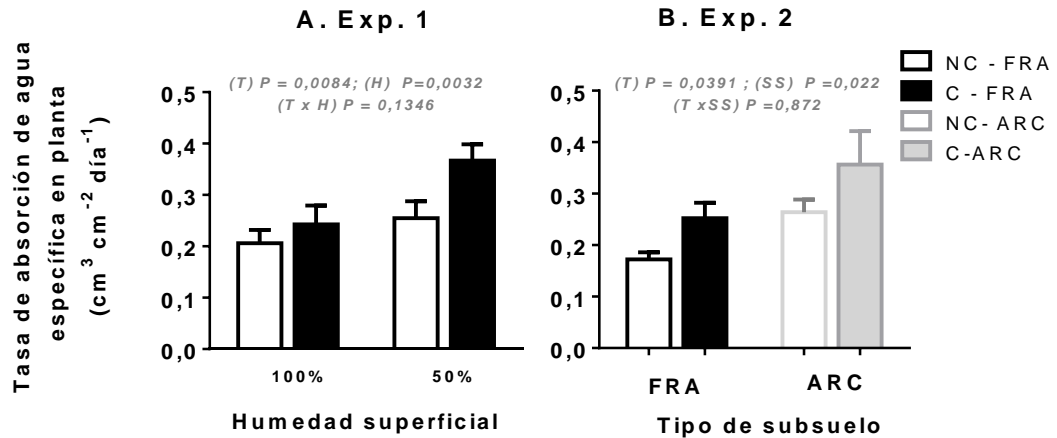
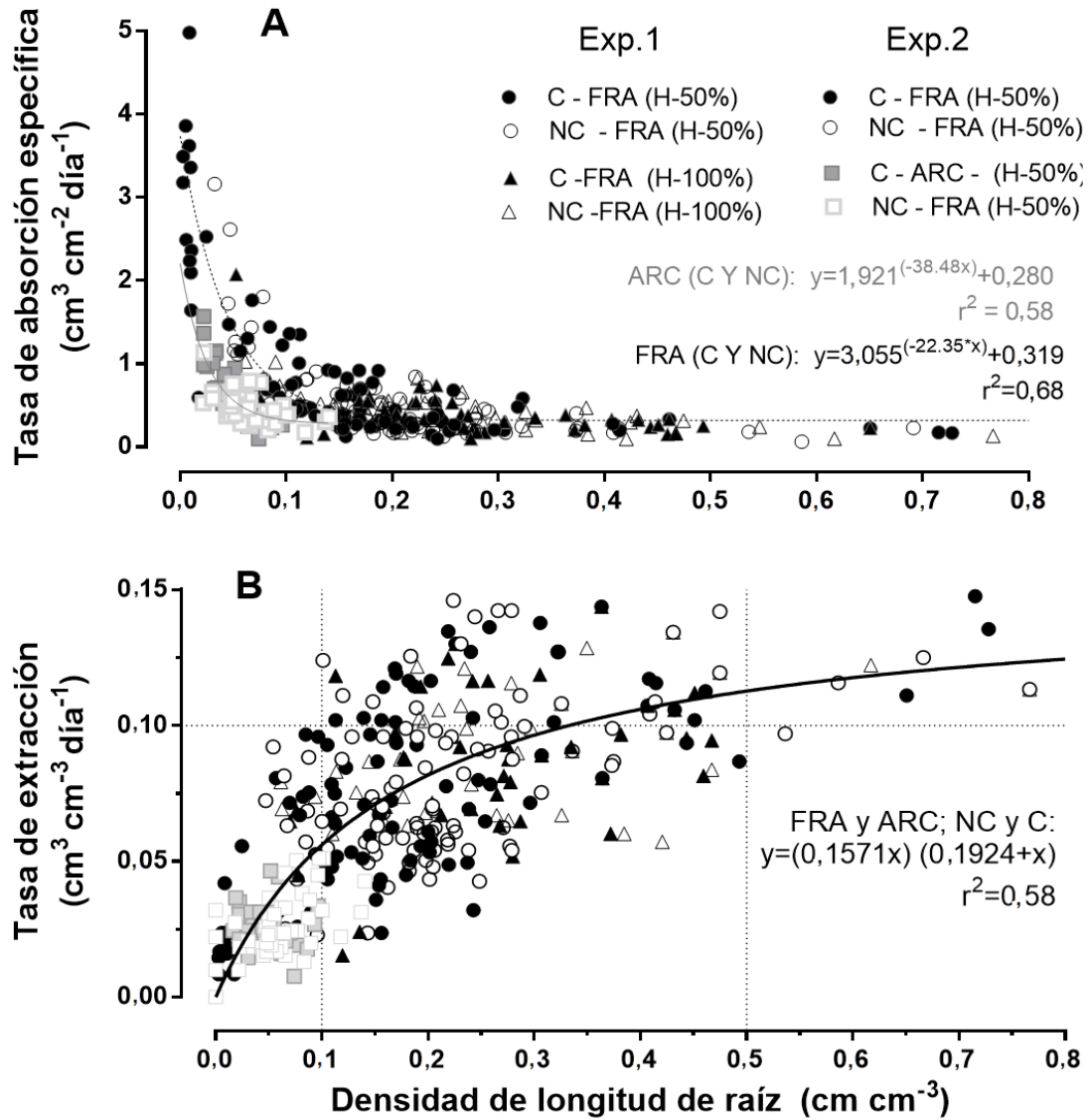


Figura 3.13 Tasas de absorción específica promedio de planta [cm³ agua (cm² raíz)⁻¹ día⁻¹], según la humedad superficial y la condición de compactación superficial en el experimento 1 (A); o según la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo en el experimento 2 (B). Las barras indican el error estándar. Se muestra el valor P de los efectos de humedad superficial (H), la condición de compactación (T), tipo de subsuelo (SS) y sus interacciones.

Considerando ambos experimentos, la tasa de absorción específica de agua se correlacionó ($P < 0,0001$) negativamente con la densidad de longitud de raíz (Fig. 3.14 A), es decir, en estratos con menor proliferación de raíces, las plantas absorbieron más agua por unidad de raíz, tanto en suelos franco arenosos ($r^2 = 0,67$) como arcillosos ($r^2 = 0,58$). Sin embargo, la tasa de extracción total de agua de cada capa del suelo estuvo positivamente relacionada ($P < 0,0001$) con la densidad de raíces presente (Fig. 3.14 B). A pesar de la mayor absorción de agua por unidad de raíz con menos raíces presentes, la longitud de raíces presente en cada estrato limitó entonces la tasa total de absorción de agua en el suelo. Por ejemplo, las máximas tasas de extracción de agua observadas a densidades de longitud de raíz menores a $0,05 \text{ cm raíz} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ suelo}$ no superaron los $0,075 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$; y recién se observaron tasas de extracción mayores a $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$ con densidades de raíz mayores a $0,1 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$. Las máximas tasas de extracción observadas ($\sim 0,15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$) se registraron a densidades de longitud de raíz de $0,2 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ o mayores.

1



2
 3 **Figura 3.14 (A):** Relación entre la tasa específica de absorción de agua [$\text{cm}^3 \text{ agua} (\text{cm}^2 \text{ raíz})^{-1}$
 4 día^{-1}] en el período de llenado de granos y la densidad de longitud de raíces [$(\text{cm raíz} (\text{cm}^3 \text{ suelo})^{-1})$]
 5 $^{-1}$], observadas en diferentes estratos de 20 cm, bajo dos condiciones de compactación superficial
 6 y dos niveles humedad superficial; o dos tipos de subsuelos de los experimentos 1 y 2. Las curvas
 7 representan el ajuste de la función exponencial decreciente para subsuelos arcillosos (gris) o
 8 franco-arenosos (punteada negra) considerando ambos experimentos. **(B):** Relación entre la tasa
 9 de extracción de agua del suelo [$\text{cm}^3 \text{ agua} (\text{cm}^3 \text{ agua útil})^{-1} \text{ día}^{-1}$] en el período de llenado de
 10 granos y la densidad de longitud de raíces [$(\text{cm raíz} (\text{cm}^3 \text{ suelo})^{-1})$], para los mismos tratamientos
 11 de A. La línea llena representa el ajuste de la función hiperbólica para todos los puntos (todos los
 12 tratamientos y experimentos); y las líneas punteadas representan la tasa de extracción óptima de
 13 agua de $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ propuesta por Dardanelli et al. (2004); y los umbrales de densidad de
 14 longitud radical propuestos por Passioura (1983). Ver discusión.
 15

1 Por último, al analizar la información de ambos experimentos, los rendimientos
2 mostraron una correlación positiva y significativa con la densidad de longitud total de
3 raíces ($r = 0,76$; $P < 0,0001$), el consumo total de agua en el ciclo ($r = 0,68$; $P < 0,0001$) y
4 con el consumo subsuperficial de agua ($r = 0,60$; $P < 0,0001$). No se observaron en
5 ninguno de los dos experimentos diferencias entre tratamientos en la eficiencia de
6 conversión del agua consumida a grano ($1,8 - 1,9 \text{ g.kg}^{-1}$, en exp. 1 y 2 respectivamente).

7 **3.4. Discusión**

8 Las propiedades físicas de los suelos seleccionados para este estudio resultaron
9 con características similares a las observadas en otros Argiudoles de la región pampeana
10 bajo SD (Álvarez et al., 2009a; 2014; Fernández et al. 2011) y en el Capítulo 2. La
11 resistencia a la penetración fue el indicador que mejor reflejó las diferencias en el estado
12 físico de los suelos en los primeros 20 cm de los sitios de extracción de los monolitos. Se
13 observaron diferencias en la densidad aparente en los primeros 10 cm entre C y NC que
14 evidenciaron el proceso de compactación del suelo en los sitios de extracción C, aunque
15 las diferencias entre tratamientos resultaron relativamente menos marcadas que en el caso
16 de la resistencia, y no resultaron significativas entre 10-20 cm. Las diferencias en estado
17 de compactación entre C y NC no se evidenciaron claramente a través de la porosidad de
18 aireación. Otros autores ya han destacado que a pesar de que los suelos de la región
19 pampeana son susceptibles a la compactación superficial y subsuperficial, difícilmente
20 este proceso se vea expresado en cambios marcados en la densidad aparente o la porosidad
21 de aireación o la distribución del tamaño de poros (Taboada et al., 1998; Micucci y
22 Taboada, 2006). Estos estudios han atribuido estos resultados a la mineralogía propia de
23 los suelos de ambientes como los de la región pampeana, que por haber evolucionado a

1 partir de una vegetación de pradera, presentan elevados contenidos de silico-fitolitos de
2 origen biológico, y por lo tanto baja densidad de partícula (Cosentino y Pecorari, 2002),
3 pero que a su vez presentan naturalmente una baja macro-porosidad (Micucci y Taboada,
4 2006; Taboada et al. 2008). Esto genera que aun cuando los niveles de densidad aparente
5 difícilmente superan valores de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, los niveles de macro-porosidad pueden
6 resultar inferiores a $0,1-0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, incluso en suelos bajo vegetación nativa, por lo que
7 no son esperables cambios apreciables en la macro-porosidad atribuibles al manejo
8 agronómico (Micucci y Taboada, 2006; Taboada et al. 2008).

9 En cambio, la resistencia a la penetración de los tratamientos compactados (1,75
10 MPa en CC; 2,21 MPa en 50% de agua útil) superó el rango de 1,5-2,0 Mpa, considerado
11 por distintos autores como un umbral crítico para el crecimiento y elongación de raíces
12 (p.ej. Bengough et al., 2011; Valentine et al., 2012). Estos valores, y otros aún superiores,
13 han sido observados en el Capítulo 2 y en otros estudios en suelos en siembra directa de
14 la región (Díaz-Zorita et al., 2002a; Álvarez et al., 2006; Fernández et al., 2011). Sin
15 embargo, a pesar de estos elevados valores, en todos los casos las raíces de soja de los
16 experimentos de este capítulo atravesaron los primeros 20 cm. En los suelos compactados
17 se observó también un mayor desarrollo de tipos estructurales laminares con respecto a
18 los sitios no compactados (Cuadro 3.1). Sin embargo, esto tampoco representó un
19 impedimento para que las raíces atravesaran los primeros 20 cm, a pesar de la orientación
20 predominante en forma horizontal en estos tipos estructurales (Lozano et al., 2014). Al
21 momento de la extracción de muestras a campo, los tratamientos presentaron una
22 abundante porosidad visible generada por raíces de cultivos antecesores y actividad de
23 lombrices y artrópodos, aún en los casos compactados como muestra la Figura 3.15. Como

1 se ha observado en estudios con macro-poros artificialmente generados (Colombi et al.,
2 2016; 2017), estas “vías preferenciales” permiten a las plantas acceder a los recursos de
3 horizontes inferiores, y aliviar los efectos de las impedancias mecánicas o de la elevada
4 presencia de tipos estructurales laminares con poros de orientación predominantemente
5 horizontal.

6 Los valores umbrales de resistencia a la penetración informados por la literatura
7 han sido generalmente obtenidos a partir de muestras compactadas artificialmente (p.ej.
8 Veen y Boone, 1990), que no necesariamente reflejan la estructura de suelos compactados
9 en condiciones de producción, en especial bajo siembra directa. Los estudios de Keller et
10 al. (2017) a través de imágenes por tomografía computada en muestras sin disturbar
11 muestran la complejidad y continuidad del sistema de poros del suelo, aún en suelos
12 compactados por tránsito. En este sentido, la extracción de monolitos sin disturbar del
13 presente estudio permitió preservar las condiciones de la estructura y continuidad del
14 sistema poroso del horizonte antrópico tanto en los suelos compactados como no
15 compactados (Fig. 3.15). Este tipo de metodología con muestras de suelos en columnas,
16 que se ha utilizado normalmente en estudios de flujos de solutos y contaminantes
17 (Camobreco et al., 1996; Martins et al., 2013) pero no en estudios de compactación, es
18 una metodología promisoría para analizar los efectos del estado de la estructura de los
19 suelos en SD sobre los sistemas radicales de los cultivos, y complementar estudios de
20 campo.



1

2 **Figura 3.15** Macro-poros y canales al momento de la extracción de monolitos en los sitios compactados en
 3 el experimento 1 (arriba) y en el experimento 2 (abajo). Las flechas indican la presencia de bioporos en la
 4 sección inferior de los monolitos de lotes compactados. Suelos Argiudoles Típicos, serie Rojas, Bs.As.
 5 Todos con más de 20 años en siembra directa.
 6

7 El estado de compactación superficial del suelo condicionó los niveles de
 8 biomasa, superficie y la longitud total alcanzada por las raíces de soja en los dos
 9 experimentos en el estrato 0-20 cm. La presencia de capas compactadas puede haber

1 disminuido la tasa de elongación, biomasa y longitud de raíces posiblemente debido al
2 aumento de la presión intracelular y a una menor disponibilidad de agua por reducciones
3 en la conductividad hidráulica (en suelos más secos; Bengough et al., 2006) o a una menor
4 disponibilidad de oxígeno por reducciones en las tasas de difusión gaseosa (en suelos más
5 húmedos; Lipiec y Hatano; 2003), como ya se ha observado en otros estudios en soja y
6 otras especies (Bushamuka y Zobel, 1998; Rosolem y Takahashi, 1998; Bengough et al.,
7 2011). El presente estudio (con reducciones en el crecimiento de raíces observadas a partir
8 de 1,75 MPa) muestra que el cultivo de soja puede ser aún más sensible que otras especies,
9 con umbrales de resistencia a la penetración restrictivos para el crecimiento radical
10 inferiores a los de cultivos como maní (*Arachis hypogaea*; umbral de 1,91-2,0 MPa;
11 Dexter, 1987; Bengough et al., 2011), arveja (*Pisum sativum*; umbral de 2,03 MPa;
12 Dexter, 1987), o maíz (*Zea mays*; umbral de 2,0 MPa; Veen y Boone, 1990; Bengough et
13 al., 2011). Otras especies con raíces pivotantes como el algodón (*Gossypium hirsutum*)
14 pueden presentar disminuciones en el crecimiento de raíces a valores de 0,72-1,0 MPa
15 (Dexter, 1987; Taylor y Brar, 1991; Bengough et al., 2011), por lo que futuros estudios
16 podrían analizar si el crecimiento de las raíces de soja puede verse limitado a niveles de
17 resistencia aún más bajos que los utilizados en esta tesis. Algunos estudios han demostrado
18 que puede haber incluso diferencias entre cultivares de especies como maíz o soja en la
19 capacidad para penetrar capas compactadas (Bushamuka y Zobel, 1998). Futuros estudios
20 que incluyan distintos cultivares permitirán esclarecer aún más la respuesta del
21 crecimiento de raíces de soja a la presencia de compactaciones.

22 Los estudios sobre compactación se han centrado principalmente en sus efectos
23 sobre las raíces directamente expuestas. La respuesta del resto del sistema radical a la

1 compactación ha sido mucho menos estudiada, y los resultados son contradictorios.
2 Algunos autores han observado una capacidad de crecimiento compensatoria de las raíces
3 en capas no afectadas. Esto fue hallado en girasol (*Helianthus annuus*; Mirleau-Thebaud
4 et al., 2016), cebada (*Hordeum vulgare*; Bingham y Bengough, 2003; Pfeifer et al. 2014),
5 y brócoli (*Brassica oleracea var. italica*; Montagu et al., 2001). En el presente estudio, no
6 se observó un crecimiento compensatorio de las raíces de los estratos de suelo no
7 compactados, en ningún tratamiento, y las plantas que crecieron en condiciones
8 compactadas de 0-20 cm presentaron menos biomasa, superficie y longitud total de raíces
9 en ambos experimentos (Cuadro 3.2). Incluso se observaron efectos negativos de la
10 compactación superficial sobre las raíces más profundas de las plantas que crecieron sobre
11 subsuelos franco arenosos (Fig. 3.8-3.9).

12 Algunos autores han informado cambios en la arquitectura y crecimiento radical de
13 estratos inferiores no compactados, en respuesta al efecto indirecto de capas compactadas
14 en horizontes superiores en plantas de maíz, denominándolo “efecto sombreado”, (Taylor
15 y Brar, 1991; Tardieu, 1994; Taboada y Álvarez, 2008). De acuerdo con estos estudios,
16 algún tipo de señal mecánica o química originada en las raíces expuestas generaría un
17 menor crecimiento en el resto del sistema radical. Sin embargo, este tampoco parecería
18 ser el caso de los resultados de este estudio, ya que no se observó una disminución de la
19 longitud o biomasa radical en todos los estratos subyacentes a las capas compactadas
20 como ha ocurrido en los casos que han informado un efecto “sombreado”. En esos
21 estudios, las raíces ubicadas en las profundidades inmediatamente inferiores a los estratos
22 compactados resultaron especialmente afectadas. En esta tesis en cambio, de aquellas
23 raíces no expuestas directamente a la compactación (+ 20 cm), únicamente las de los

1 estratos más profundos (+160 cm) presentaron menor biomasa o longitud. Los resultados
2 de este capítulo sugieren que el retraso en el crecimiento de raíces producto de la
3 compactación superficial (como muestra la Fig.3.10), posiblemente ocasionó que no se
4 haya generado una suficiente biomasa y densidad de raíces a mayor profundidad para
5 cuando la biomasa reproductiva comenzó a ser un destino prioritario de asimilados y cesó
6 el crecimiento radical (entre R4 y R5).

7 Los efectos de la compactación del suelo sobre la dinámica de profundización de
8 raíces variaron en los distintos experimentos. En las condiciones de mayor demanda
9 hídrica ambiental y mayor estrés (experimento 2), los tratamientos compactados
10 mantuvieron el retraso inicial, redujeron las tasas de profundización, y limitaron la
11 profundidad máxima alcanzada. En otras palabras, el mejor estado físico de la superficie
12 del suelo mostró su efecto positivo en el año climáticamente peor. Un mayor volumen de
13 suelo explorado puede implicar una mayor disponibilidad de recursos y representar una
14 ventaja, en especial durante el período crítico. Sin embargo, el efecto que pueda tener esta
15 mayor profundización y un acceso anticipado a los recursos del subsuelo sobre el
16 rendimiento en condiciones de producción, dependerá de las condiciones edafo-climáticas
17 exploradas por el cultivo (Vadez, 2014). En este sentido, el uso de modelos de simulación
18 (p.ej. CROPGRO, Boote et al., 1998; o APSIM, McCown et al., 1996) puede resultar una
19 herramienta útil para identificar posibles ventajas o desventajas de una mayor velocidad
20 de profundización y exploración radical, de acuerdo con las características ambientales.

21 A diferencia de los suelos franco arenosos, los suelos con elevados contenidos
22 de arcilla del experimento 2 limitaron tanto la tasa de profundización como la profundidad
23 máxima alcanzada, y la proliferación de raíces en el subsuelo, independientemente del

1 nivel de compactación y los efectos de la compactación sobre el crecimiento y distribución
2 de raíces en el subsuelo no fueron evidentes (Fig. 3.8). En suelos de textura fina, la
3 porosidad de aireación tiende a ser menor que en otros suelos, y pueden alcanzarse niveles
4 subóptimos para la difusión de oxígeno (Mc Kenzie y Mc Bratney, 2001; Wilson et al.,
5 2013). En estas condiciones, el crecimiento de raíces puede verse severamente limitado y
6 restringido a grietas y fisuras entre agregados, como observaron White y Kirkegaard
7 (2010) en trigo o Dardanelli et al. (2003). Este tipo de crecimiento agrupado (muchas
8 veces denominado “*root clumping*”, en inglés) fue observado también en el presente
9 estudio. La porosidad de aireación en los subsuelos arcillosos de nuestros estudios resultó
10 significativamente más baja que la de los suelos franco arenosos ($0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ vs. $0,26$
11 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), y estuvo incluso por debajo del valor de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ mencionado por distintos
12 autores como umbral para un normal crecimiento de las raíces (Gupta y Almaras, 1987;
13 Lapen et al., 2004; Bengough et al., 2006; Valentine et al., 2012). Bajo estas condiciones
14 los niveles subóptimos de porosidad de aireación de los subsuelos arcillosos resultaron
15 una limitante generalizada enmascarando, aun si se hubieran producido, los efectos de la
16 compactación superficial.

17 Uno de los principales hallazgos de este estudio es que, aunque no se evidenció
18 crecimiento compensatorio de raíces no expuestas, las plantas que crecieron en suelos
19 compactados presentaron una mayor capacidad de absorción de agua por unidad de raíz;
20 estos efectos fueron más pronunciados en suelos franco arenosos. Este mecanismo
21 permitió mantener tasas similares de absorción de agua entre tratamientos compactados y
22 no compactados del año 1, a pesar de la menor densidad de longitud radical en las plantas
23 de suelos compactados. Existen evidencias de este tipo de mecanismos compensatorios en

1 la capacidad de absorción de agua o nutrientes frente a reducciones en la densidad de
2 raíces en arroz (*Oryza sativa*; Hasegawa et al., 1982), poroto (*Phaseolus vulgaris*; Guo et
3 al., 2007) y trigo (Nosalewicz y Lipiec, 2014). Este tipo de respuesta también es común
4 en estudios en riego deficitario o irrigación parcial localizada: algunos sectores del sistema
5 radical de algunos cultivos y frutales, que mediante un incremento compensatorio en la
6 absorción logran mantener elevadas tasas transpiratorias (Chai et al., 2016; Dara et al.,
7 2015; Leib et al., 2006).

8 El alcance de este mecanismo compensatorio a nivel de absorción de agua parece
9 sin embargo tener ciertas limitaciones. Las plantas que crecieron en subsuelos arcillosos
10 presentaron menos raíces y, en promedio, una mayor absorción específica de agua (Fig.
11 3.3. Sin embargo, al analizar la absorción específica a una misma densidad de longitud de
12 raíz (Fig. 3.14 A), resulta evidente que los subsuelos arcillosos restringieron la capacidad
13 de extracción de agua por unidad de raíz. La reducida macro-porosidad y limitada
14 conductividad hidráulica característica de los suelos arcillosos (Saxton y Rawls, 2006)
15 pueden restringir el flujo de agua hacia la superficie de las raíces. Esto, sumado al tipo de
16 crecimiento “agrupado” limitado a grietas y fisuras, podría estar actuando como un límite
17 a la absorción de agua.

18 Por otro lado, se observaron tasas de extracción de agua subóptimas cuando la
19 cantidad de raíces se redujo en forma más marcada, como en el experimento 2. En
20 aproximaciones teóricas basadas en estudios sobre sorgo (*Sorghum bicolor*) y trigo
21 (Passioura, 1983) se ha sugerido que valores de densidad de longitud de raíces menores a
22 $0,5 \text{ cm cm}^{-3}$ pueden limitar la absorción de agua, lo cual también fue adaptado para girasol
23 (*Helianthus annuus*, Sadras, 1989). Las leguminosas pueden tener mayor absorción por

1 unidad de longitud de raíz que otras especies, asociado a vasos meta-xilemáticos mayores
2 y una conductividad hidráulica más elevada (Gregory, 1988; Kashiwagi et al., 2006;
3 Vadez, 2014). Otro hallazgo de esta tesis fue la observación de que las raíces de soja
4 pueden mantener tasas de absorción óptimas ($\geq 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ día}^{-1}$, como sugiere
5 Dardanelli et al. 2003; 2004) a densidades de longitud de raíz menores a los umbrales
6 mencionados incluso para legumbres de invierno como el poroto (*Phaseolus vulgaris*), la
7 arveja (*Pisum sativum*) o el lupino (*Lupinus albus*), (0,3-0,4 cm cm^{-3} ; Gregory, 1988).
8 Esta capacidad de mantener altas tasas de extracción de agua a bajas densidades de raíces
9 puede explicar la variabilidad de resultados generalmente encontrada a campo en cuanto
10 a los efectos de la compactación sobre el rendimiento del cultivo. Sin embargo, a pesar de
11 posibles mecanismos compensatorios por unidad de raíz, y a esta elevada capacidad de
12 extracción de agua, cuando la densidad de longitud de raíces disminuyó en forma marcada,
13 (i.e. por debajo de 0,08-0,1 cm cm^{-3}) las tasas de extracción de agua se encontraron por
14 debajo de los niveles óptimos (Figura 3.14 B).

15 El efecto del estado superficial del suelo sobre la biomasa aérea y rendimiento varió
16 con el experimento. En el experimento 1, en los cuales el cultivo experimentó menores
17 condiciones de estrés, en especial en las primeras etapas, no se advirtieron diferencias
18 significativas entre tratamientos. De todos modos, dado el número de réplicas utilizado
19 (cinco), no es posible concluir acerca de la ausencia de efectos de los factores sobre estos
20 parámetros. Por la variabilidad observada en el experimento 1, para poder confirmar la
21 ausencia de diferencias en biomasa y grano con un mayor poder estadístico (p.ej. con una
22 potencia de 80% o superior) bajo las condiciones evaluadas, sería necesario contar con
23 13-15 réplicas por tratamiento. No obstante, la biomasa y producción de granos de cada

1 planta individual presentó una mayor variabilidad en los tratamientos de mayor restricción
2 de humedad superficial (50% de AU) y estado superficial más desfavorable (C) en este
3 primer experimento que es necesario considerar. En condiciones de campo, una mayor
4 variabilidad de crecimiento individual en especial en etapas tempranas, puede generar
5 jerarquías entre plantas en la línea de siembra, que pueden afectar la producción de granos
6 a nivel de cultivo (Vega y Sadras, 2003). La capacidad para compensar los posibles efectos
7 de la desuniformidad o jerarquías entre plantas puede verse condicionada por la capacidad
8 individual de generar nudos o sitios potenciales para la fijación de vainas (Egli, 1993), lo
9 cual depende a su vez de la elección del grupo de madurez, hábito de crecimiento de la
10 variedad, y fecha de siembra, entre otros factores.

11 Los efectos de la compactación superficial sobre el crecimiento aéreo y radical en su
12 conjunto resultaron mayores en el experimento 2, en el segundo año, de mayor
13 temperatura, DPV, demanda y estrés hídricos en las etapas iniciales (Fig. 3.4 y 3.5), aún
14 con los mismos niveles de humedad edáfica en 0-20 cm. Las condiciones ambientales de
15 demanda pueden regular la expansión foliar, el intercambio de gases y la conductancia
16 estomática, y afectar los umbrales de humedad edáfica a los cuales pueden generarse
17 procesos de estrés hídrico en las plantas (Sadras y Milroy, 1996). Los resultados del
18 presente estudio indican que las condiciones atmosféricas podrían también estar
19 desempeñando un rol importante en la regulación de los efectos de la compactación sobre
20 el crecimiento de soja, que habitualmente no es contemplado en los estudios sobre los
21 efectos de la compactación de suelos. Los mecanismos de compensación de un menor
22 crecimiento de raíces mediante un incremento en la tasa de absorción de agua podrían ser
23 efectivos en mantener un óptimo crecimiento dentro de ciertos rangos de demanda

1 atmosférica, superados los cuales comenzarían a operar las respuestas de las plantas a
2 condiciones de estrés. De la misma manera, puede especularse que para condiciones
3 diferentes a las de los experimentos de este capítulo, en los cuales los contenidos de agua
4 en el subsuelo fueron siempre elevados, una menor oferta de agua en los estratos
5 profundos podría limitar la magnitud del efecto compensatorio a nivel de extracción de
6 agua y hacer más evidentes los efectos de la compactación superficial.

7 La magnitud de los efectos de la compactación sobre la producción de biomasa y
8 grano (hasta 16 %) difirió de los resultados de otros estudios en soja (entre 19-38% en
9 Beutler et al. 2007; Siczek and Lipiec 2011; Botta et al. 2016). Cabe señalar que dichos
10 trabajos se basaron en compactaciones generadas artificialmente, con niveles de
11 resistencia mecánica superficial o subsuperficial de hasta 5.0 MPa (Beutler et al. 2007) ó
12 3.0 MPa (Botta et al. 2016), o niveles de densidad aparente 1,55- 1,6 g cm⁻³ (Siczek y
13 Lipiec, 2011). Estos valores resultan muy superiores a los observados en nuestros sitios
14 de extracción y a los observados generalmente lotes de la región pampeana (Capítulo 2;
15 Álvarez et al. 2009 b).

16 En resumen, la compactación puede restringir la absorción de agua a partir de
17 reducciones en la cantidad de raíces del subsuelo, en ausencia de otras limitantes
18 subsuperficiales. Algunos autores han mencionado otros posibles mecanismos como
19 responsables de un consumo limitado de agua en suelos compactados. A partir de estudios
20 en plántulas de cebada y trigo, se ha sugerido que alguna señal hormonal
21 (presumiblemente el ácido abscísico) originada en las raíces expuestas a la compactación
22 y translocada a órganos aéreos, generaría la reducción en la expansión foliar, conductancia
23 estomática o absorción de agua (Mulholland et al., 1996; Hussain et al., 1999; Tracy, et

1 al., 2015), aún sin verse limitado el crecimiento de las raíces. Si este fuera el caso en el
2 presente estudio, la compactación debería haber provocado una mayor temperatura de
3 foliar y un mayor índice de estrés hídrico a lo largo de todo el ciclo de cultivo. Las plantas
4 que crecieron en suelos compactados presentaron mayor temperatura foliar y estrés
5 hídrico durante los primeros 30 días (Figura 3.4), como se observara en los estudios en
6 plántulas antes mencionados. Pero, más adelante en el ciclo, cuando las raíces
7 sobrepasaron la capa superficial, la compactación no pareció impulsar procesos de cierre
8 estomático que hubieran incrementado la temperatura foliar (Fig. 3.4). No se observaron
9 efectos de la compactación sobre la eficiencia de conversión de agua a biomasa o grano
10 que pudieran estar indicando la presencia de otros efectos directos, no mediados por la
11 disponibilidad o extracción de agua (Sadras et al., 2005). Por lo tanto, considerando todo
12 el ciclo del cultivo, los efectos de la compactación en soja parecen estar ligados solamente
13 a reducciones en la captura de agua por las plantas, y esto a su vez parece estar más
14 relacionado a la profundización y distribución de raíces que a efectos directos sobre los
15 órganos aéreos.

16 Hasta el momento no existían estudios integrales sobre cómo la compactación
17 del horizonte antrópico del suelo en siembra directa pudiera influir sobre la dinámica de
18 profundización, proliferación y actividad de raíces del cultivo de soja en su conjunto, en
19 distintas etapas más allá de las capas afectadas, ni sobre cuáles mecanismos
20 compensatorios a nivel radical podrían atenuar estos efectos. Este capítulo permitió
21 avanzar en el conocimiento referente a estos aspectos.

1 **3.5. Conclusiones**

2 Este estudio mostró que la compactación de suelos en siembra directa puede
3 afectar el crecimiento de las raíces y la extracción de agua en el cultivo de soja, no sólo
4 en las capas afectadas sino también en estratos subsuperficiales en subsuelos no
5 limitantes. La compactación superficial redujo el crecimiento de las raíces
6 subsuperficiales no expuestas, y esto redujo la extracción de agua en estratos no
7 expuestos directamente a las impedancias. Las raíces subsuperficiales no lograron
8 compensar completamente los efectos de la compactación superficial. Esto permite
9 aceptar la primera hipótesis propuesta. Sin embargo, se observaron mecanismos
10 compensatorios en las raíces no expuestas, a nivel de tasas de absorción específica de
11 agua, que pueden limitar estos efectos y ameritan mayores estudios, en especial en
12 situaciones de campo. En cambio, los resultados rechazaron lo propuesto por la segunda
13 hipótesis, ya que no se observaron efectos asociados a la compactación superficial en el
14 crecimiento de raíces y extracción de agua de las raíces subsuperficiales que crecieron
15 en subsuelos arcillosos (subsuelos limitantes). Los subsuelos con elevado contenido de
16 arcilla limitaron el crecimiento de raíces y extracción de agua a nivel subsuperficial
17 independientemente del nivel de compactación de los primeros 20 cm.

18

Capítulo 4

Compactación de suelos en siembra directa: distribución y actividad de nódulos de soja. Resultados de experimentos en columnas de suelo

1 **4. Compactación de suelos en siembra directa: distribución y actividad de nódulos**
2 **de soja. Resultados de experimentos en columnas de suelo**

3

4 **4.1. Introducción**

5 El incremento de la productividad de los cultivos ha estado históricamente asociado
6 a una combinación de adelantos genéticos y mayor disponibilidad de recursos. La
7 disponibilidad de agua y nitrógeno es la principal limitante de los rendimientos de
8 distintos sistemas productivos (Sinclair y Rufty, 2012). Esta limitación es ejercida a través
9 de la disponibilidad de cada uno de estos recursos o de su interacción puesto que la
10 disponibilidad de un determinado recurso puede alterar la eficiencia con la que otro
11 recurso es utilizado (Stockle y Kemanian, 2009). La relación entre las eficiencias de
12 utilización de un recurso y otro puede resultar positiva o negativa, dependiendo de las
13 fuentes de variabilidad ambientales, genéticas, y escalas de estudio (Sadras y Rodríguez,
14 2010). Existen evidencias de que el crecimiento de los cultivos puede estar asociado al
15 grado de co-limitación de dos o más recursos, y pueden darse compensaciones o “*trade-*
16 *offs*” (i.e. asociaciones negativas) entre las eficiencias de uso de algunos recursos como
17 el nitrógeno y la radiación (Hirose y Bazzaz, 1998; Sadras, 2004; Sadras, 2005; Sadras y
18 Rodríguez, 2010). Se ha demostrado que la compactación de los suelos en sistemas de
19 labranza afecta la extracción agua e interceptación de radiación en trigo (Sadras et al., 2005;
20 Andersen et al., 2013) y maíz (*Zea mays*, Cárcova et al., 2000).

21 El Capítulo 3 de esta tesis mostró que la compactación superficial puede alterar la
22 normal extracción de agua del cultivo de soja. La compactación en suelos en SD podría

1 estar afectando también la provisión de nitrógeno en este cultivo. Como toda leguminosa,
2 la soja aprovecha no solo el nitrógeno (N) disponible en la solución del suelo sino también
3 el proveniente de la fijación biológica (FBN) y, por lo tanto, es posible que, como
4 resultado de los efectos la compactación del suelo, se produzcan efectos sobre esta
5 segunda vía.

6 En el caso de la soja se ha estimado que, en promedio, alrededor del 50-60% del N
7 total acumulado en la estación de crecimiento puede estar asociado al proceso de FBN
8 (Salvagiotti et al., 2008; Di Ciocco, et al., 2011; Collino et al., 2015), y en algunos casos
9 hasta 70-85% del N total (Alves et al., 2003). El aporte de la FBN depende de múltiples
10 factores ambientales y genéticos, y presenta una importante variabilidad (Salvagiotti et
11 al., 2008). La FBN es especialmente sensible al nivel de humedad del suelo (King y
12 Purcell, 2005; Bellaloui et al., 2013; Devi y Sinclair, 2013), aunque también puede ser
13 afectada por otros factores edáficos como la concentración de sales (Zahran, 1999;
14 Manchanda y Garg, 2008), acidez (Silva y Sodek, 1997; Lin et al., 2012),
15 concentraciones de nitratos (Gan et al., 2004; Salvagiotti et al., 2008) y otros nutrientes
16 (Divito y Sadras, 2014), la presencia de metales pesados (Balestrasse et al., 2001) o
17 herbicidas (Zawoznik y Tomaro, 2005), y la disponibilidad de oxígeno (Maekawa et al.,
18 2011; Justino y Sodek, 2013).

19 La FBN resulta de varios procesos íntimamente relacionados entre sí y con el
20 estado nutricional de la planta y su crecimiento. Todos ellos pueden ser modificados por
21 el ambiente (Libault, 2014). El número de nódulos es el resultado de procesos de
22 infección a nivel de los pelos radicales y de su diferenciación y supervivencia; estos
23 procesos son regulados por señales que actúan tanto localmente, a nivel de la raíz y del

1 nódulo, como de manera sistémica, involucrando el resto de la planta (Mortier et al.,
2 2012). El crecimiento posterior de los nódulos y su actividad como fijadores de
3 nitrógeno, están fuertemente vinculados con la producción de fotoasimilados (Vance,
4 2008). A su vez, estos procesos presentan alta variabilidad genotípica y ambiental, en
5 respuesta a factores que actúan localmente (como la presencia de nitratos o metales
6 pesados en el suelo) o sistémicos, asociados al estado ontogénico y nutricional de la
7 planta (Larrainzar et al., 2014). Existen evidencias de disminuciones en el número y/o
8 masa de nódulos, y actividad de la enzima nitrogenasa asociada a la FBN ante
9 incrementos en los niveles de densidad aparente de los suelos o frente a la presencia de
10 capas compactadas en estudios con compactaciones artificiales (Siczec y Lipiec, 2011),
11 pero se desconoce si estos efectos responden a un efecto sistémico, asociado a la
12 reducción en el crecimiento de las plantas o si existe únicamente un efecto localizado
13 directo sobre los nódulos que se desarrollan en la región compactada. Este aspecto es
14 importante, ya que la estructura del suelo suele tener una distribución espacial
15 heterogénea. El funcionamiento del sistema radical en estas condiciones todavía no está
16 bien comprendido (Bengough et al., 2006 y 2011) y la información referente a los efectos
17 sobre la nodulación es aún más escasa. Se desconoce, por ejemplo, si la presencia de
18 impedancias mecánicas en el estrato superficial del suelo podría verse compensada a
19 partir de la cantidad o actividad de nódulos de regiones no afectadas del sistema radical.

20 Tanto en alfalfa (Racca et al., 2001; Arolfo y Basigalup, 2012) como en soja
21 (Grubinger, et al., 1982; Brown y Scott 1984; Hoogenboom et al., 1987; Gray et al.,
22 2013) existen evidencias de la presencia y actividad de nódulos en horizontes más
23 profundos que el superficial. El Capítulo 3 mostró que pueden desarrollarse mecanismos

1 compensatorios a nivel de extracción de agua por unidad de tejido en las raíces
2 subsuperficiales, pero se desconoce si este tipo de respuestas podrían desarrollarse a nivel
3 de los nódulos de estratos subsuperficiales. A su vez, así como la mayor cantidad y
4 continuidad de macro-poros y canales del suelo en siembra directa (Shipitalo y Protz,
5 1989; Calonego y Rosolem, 2010) facilitan el crecimiento de raíces por estas vías, podría
6 ocurrir algo similar con los nódulos de estas raíces, y así compensar efectos negativos de
7 posibles compactaciones, aún en los estratos con impedancias físicas. Por último, la
8 textura del suelo puede influir sobre la cantidad y masa de nódulos (Buttery et al., 1998),
9 por lo que cualquier efecto de la compactación sobre la distribución de los nódulos podría
10 verse regulado también por las características texturales del subsuelo, pero no existen
11 trabajos que hayan analizado estas respuestas, en especial a nivel subsuperficial.

12 Frente a la evidencia disponible, y a la vista de los resultados de los capítulos
13 anteriores de esta tesis, surge que es esperable que la compactación del horizonte
14 superficial del suelo en siembra directa reduzca la nodulación y actividad de los nódulos
15 en los horizontes compactados. Es preciso plantear algunos interrogantes sobre los
16 posibles efectos de la compactación superficial sobre los nódulos de las raíces que crecen
17 en capas más profundas. En particular, si los nódulos subsuperficiales son igualmente
18 afectados que los nódulos superficiales por la compactación, o si pueden compensar en
19 cantidad, masa, o actividad los efectos de la compactación en estratos superficiales. Es
20 relevante también determinar si estos efectos, en especial a nivel subsuperficial, están
21 mediados o no por la naturaleza del subsuelo.

22 Para dar respuesta a estos interrogantes, se condujeron tres ensayos en invernáculo
23 utilizando monolitos de suelo superficial sin disturbar extraídos de lotes de producción en

1 SD, superpuestos sobre columnas de suelo, con los objetivos de: (a) evaluar el efecto del
2 de la compactación superficial y características del subsuelo sobre la distribución vertical
3 del sistema de nódulos de soja (b) analizar el efecto de la compactación superficial sobre
4 la actividad de los nódulos superficiales y subsuperficiales. Las hipótesis de trabajo fueron
5 las siguientes:

6 (a) la compactación del horizonte superficial reduce la nodulación no sólo del horizonte
7 afectado sino también en el resto del perfil de suelo;

8 (b) los efectos de la compactación sobre la nodulación serán más pronunciados en
9 suelos con limitaciones texturales en profundidad;

10 (c) la compactación superficial reduce la actividad de los nódulos de las raíces
11 directamente afectadas, pero no de los nódulos de las raíces subsuperficiales.

12 **4.2. Materiales y métodos**

13 **4.2.1. Experimentos**

14 De modo de poner a prueba la primera y segunda hipótesis, se utilizaron los
15 tratamientos y unidades experimentales de los experimentos 1 (2014-15) y 2 (2015-16)
16 descritos en el Capítulo 3 (sección 3.2.1 Materiales y Métodos). En el estadio R7 se
17 extrajo la totalidad del material de los contenedores y se separaron las raíces, cada 20 cm
18 de suelo por elutriación (Smucker et al., 1982), y pasaje por tamices sucesivos de 566,
19 336 y 250 μm (ver detalles 3.2.1 Materiales y Métodos del Capítulo 3). Se separaron los
20 nódulos visibles de las raíces y se almacenaron acuerdo a lo propuesto por Johnson y
21 Hume (1973). Se contaron y pesaron los nódulos, y dispusieron en una bandeja de agua
22 destilada y se escanearon. Las imágenes digitales se analizaron utilizando el software

1 Image-J 1.x (Schneider et al., 2012) para determinar su diámetro individual. Se llevaron
2 los nódulos a estufa a 65°C por 72 hs y se pesaron en seco. En el estadio R7 se cosechó
3 la biomasa aérea de todos los tratamientos en ambos ensayos, se llevó el material
4 completo a estufa (65°C, 72 hs) y se registró el peso seco total. Se separaron, secaron y
5 pesaron los granos de cada tratamiento.

6 Para poner a prueba la tercera hipótesis, referida a si la compactación afecta la
7 funcionalidad de los nódulos, se estableció un experimento adicional (experimento 3), con
8 dos tratamientos en un DBCA, definidos por la condición de compactación (C vs. NC) de
9 los sitios de extracción de muestras. Al igual que en los experimentos 1 y 2, el criterio de
10 bloqueo estuvo basado en el sitio de extracción y en diferencias en insolación entre
11 sectores del invernáculo entre las 7:00 y 9:00 a.m., aproximadamente. Se dispusieron
12 cinco repeticiones por tratamiento. Los monolitos se colocaron sobre contenedores de
13 PVC de 2 metros de alto y 20 cm de diámetro, rellenos con un mismo tipo de subsuelo
14 (franco-arenoso, de las características descritas en los experimentos 1 y 2 del Capítulo 3;
15 sección 3.2.1 Materiales y Métodos), y un mismo manejo de humedad superficial (H-
16 50%) y subsuperficial (capacidad de campo a siembra, R3 y R5).

17 En los estadios R2, R5, y R7 se extrajo la totalidad del material de los contenedores
18 y se separaron, almacenaron y analizaron los nódulos de manera análoga a los
19 experimentos 1 y 2. Para analizar la actividad de los nódulos, se determinó el contenido
20 de leghemoglobina en R2 y R5, asumiendo que la concentración de esta hemoproteína
21 asocia a una mayor actividad de la enzima nitrogenasa y a una mayor efectividad de los
22 nódulos para el proceso de FBN (La Rue y Child, 1979; Balestrasse et al., 2004). Para esto
23 se siguió el método fluorométrico propuesto por La Rue y Child (1979).

1 Se completó una muestra de 0,2 g de nódulos (o en su defecto el contenido total) de
2 cada estrato a partir de los nódulos de mayor tamaño individual (superiores a 2 mm de
3 diámetro), de modo de facilitar y agilizar la tarea de extracción de muestras, y se
4 homogeneizó la muestra en una solución de 2000 µl de ferricianuro de potasio (0,02%
5 p/v) y bicarbonato de sodio (0,1% p/v). Se extrajeron 50 µl del sobrenadante obtenido
6 luego de centrifugar las muestras (15000 rpm durante 20 minutos), para luego llevarlo a
7 200 µl de la solución de ferricianuro de potasio y bicarbonato de sodio, y posteriormente
8 agregarle 2000 µl de una solución de ácido oxálico (1 molar). Las muestras se llevaron a
9 olla de presión a 0,75 atm por 40 minutos, dejando un blanco no sometido a este
10 tratamiento en cada caso. Se determinó la intensidad de fluorescencia de cada muestra y
11 blanco usando un fluorómetro de microplacas spectraMAX Gemini EM (Molecular
12 Devices, Sunnyvale, CA), calibrado a una excitación de 405 nm y una emisión de 650 nm.
13 La intensidad de fluorescencia registrada para cada muestra (unidades arbitrarias) se
14 relativizó (0-1) al máximo valor observado en la serie. Se utilizó como patrón la intensidad
15 de fluorescencia registrada en 0 - 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 10 - 30 - 50 -70 y 100 µl de una solución
16 (0,5 mg/ml) de hemoglobina humana liofilizada.

17 **4.2.3. Análisis estadístico**

18 Se analizaron los efectos de los distintos factores y sus interacciones a través de análisis
19 de varianza (ANOVA) para diseños multifactoriales. En los casos en los que se analizaron
20 variables a distintas profundidades, se incluyeron la profundidad de suelo y sus
21 interacciones como factores anidados. En los casos en los que se realizaron
22 determinaciones en distintas fechas o estadios fenológicos, se realizó un ANOVA para
23 diseños multifactoriales y medidas repetidas en el tiempo, considerando la fecha de

1 medición como factor. Si se detectaron efectos de interacción entre la profundidad o fecha
2 y algún otro factor, se realizaron además ANOVAs (dos vías) en cada profundidad o fecha
3 para analizar los efectos de los factores principales asociados a los tratamientos. Se
4 realizaron test de comparaciones múltiples de Fisher para determinar la diferencia mínima
5 significativa (DMS) entre tratamientos ($P < 0,05$). Si la interacción entre factores no resultó
6 significativa, se indicó a modo orientativo la DMS. Se analizaron las correlaciones entre
7 variables a través del coeficiente de Pearson. Se utilizó el programa estadístico Infostat
8 (Di Rienzo, 2011).

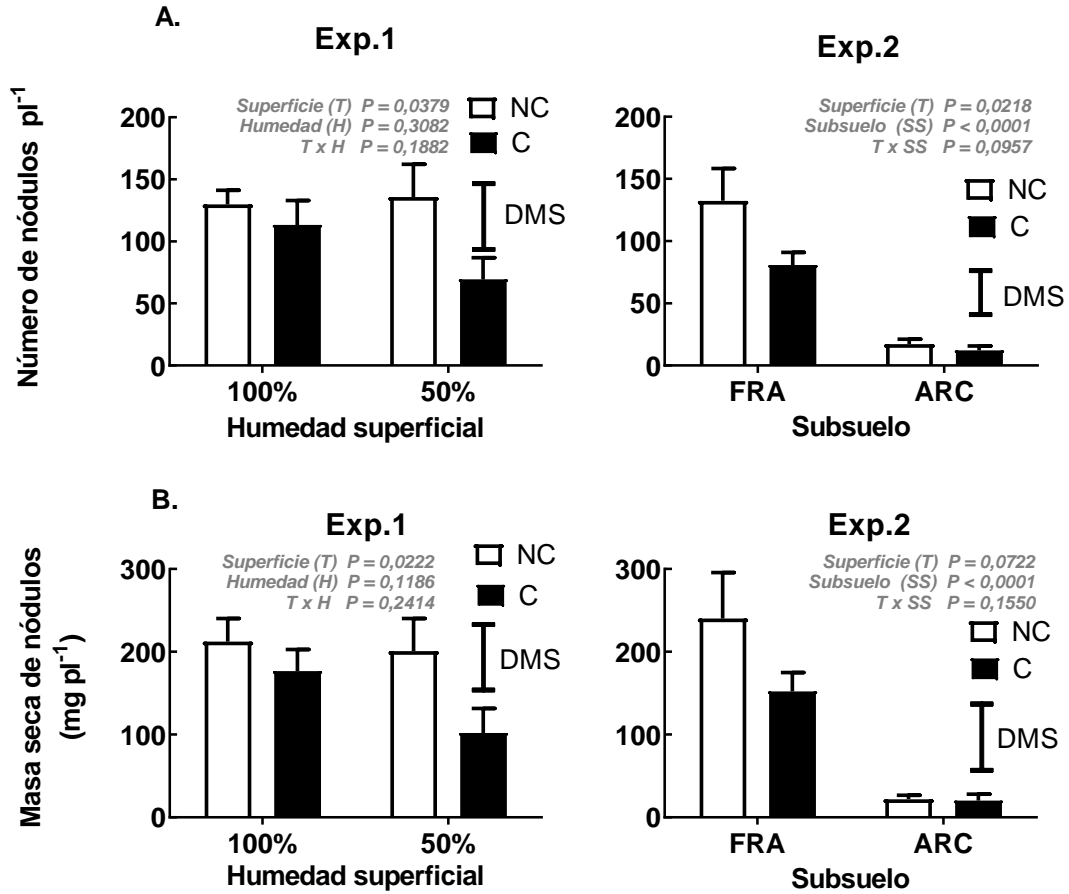
9 **4.3. Resultados**

10 **4.3.1. Efecto de la compactación sobre la nodulación total y distribución de nódulos**

11 La compactación superficial redujo el número total de nódulos por planta ($P < 0,05$)
12 en los distintos experimentos. En el experimento 1 (Fig. 4.1 A, izquierda), las plantas
13 que crecieron en suelos no compactados presentaron en promedio un 45% más de
14 nódulos que aquellas en suelos compactados, independientemente del nivel de humedad
15 superficial. No se observaron efectos de la humedad superficial ni de interacción entre
16 humedad superficial y el nivel de compactación sobre el número total de nódulos. La
17 masa seca total de los nódulos por planta (Fig. 4.1 B, izquierda) presentó una tendencia
18 similar: las plantas creciendo en suelos NC presentaron una masa de nódulos 48% mayor
19 que las de C ($P < 0,05$), sin efectos significativos de la humedad superficial o de su
20 interacción con el nivel de compactación.

21 En el experimento 2, el nivel de compactación superficial también redujo la
22 nodulación total: las plantas creciendo en condiciones NC presentaron un 51% más de

1 nódulos que las de C. El tipo de subsuelo afectó notablemente el número total de nódulos
2 ($P < 0,0001$), y los subsuelos con elevados contenidos de arcilla redujeron la nodulación
3 cerca de un 88% respecto de los subsuelos franco-arenosos (Fig. 4.1 A, derecha). No se
4 observaron efectos significativos de interacción entre el subsuelo y la condición física
5 superficial: los efectos de la compactación sobre el total de nódulos resultaron similares
6 en plantas creciendo en suelos arcillosos o franco arenosos. En este experimento, las
7 diferencias en cuanto a la masa total de nódulos resultaron menos claras. Las plantas en
8 suelos NC tendieron a presentar una masa de nódulos mayor que las de C ($P = 0,07$), pero
9 con una mayor variabilidad que en el caso del número de nódulos (Fig. 4.1 B, derecha).
10 El tipo de subsuelo ejerció de todos modos un efecto muy significativo ($P < 0.001$),
11 reduciéndose en ca. 92% la masa total de nódulos por planta en los suelos arcillosos,
12 tanto en C como en NC.



1 **Figura 4.1** (A) Número total de nódulos y (B) masa seca total de nódulos, según la humedad
 2 superficial (50 vs. 100%) y la condición de compactación superficial (C: compactado vs. NC: no
 3 compactado) en el experimento 1 (paneles izquierda); o según la condición de compactación
 4 superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs. ARC: arcillosos) en el experimento
 5 2 (paneles derecha). Se indica el valor P de los efectos de los factores: compactación superficial
 6 (T, “Superficie”), humedad superficial (H), tipo de subsuelo (SS) y su interacción. Se indica la
 7 magnitud de las diferencias mínimas significativas al 5% (DSM Fisher, todos los tratamientos en
 8 cada experimento). Las barras indican el error estándar.

9

10

11 Los nódulos se concentraron principalmente en los primeros 20 cm (Fig. 4.2), y

12 fue en este estrato donde se observaron las mayores diferencias entre tratamientos. En el

13 experimento 1, las plantas creciendo en suelos compactados presentaron en promedio un

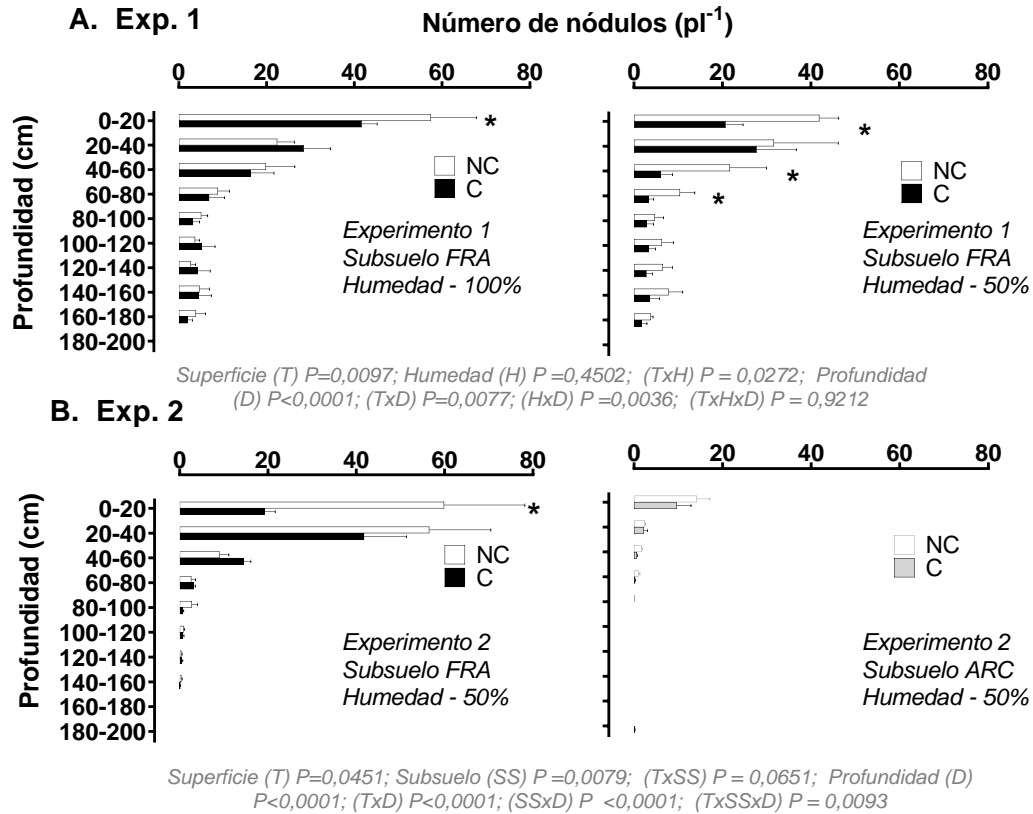
14 36% menos de nódulos respecto de aquellas en condiciones no compactadas ($P < 0.01$;

15 Fig. 4.2 A), independientemente del contenido de humedad superficial. En todos los

16 casos se observaron nódulos más allá de los 20 cm. La compactación redujo también la

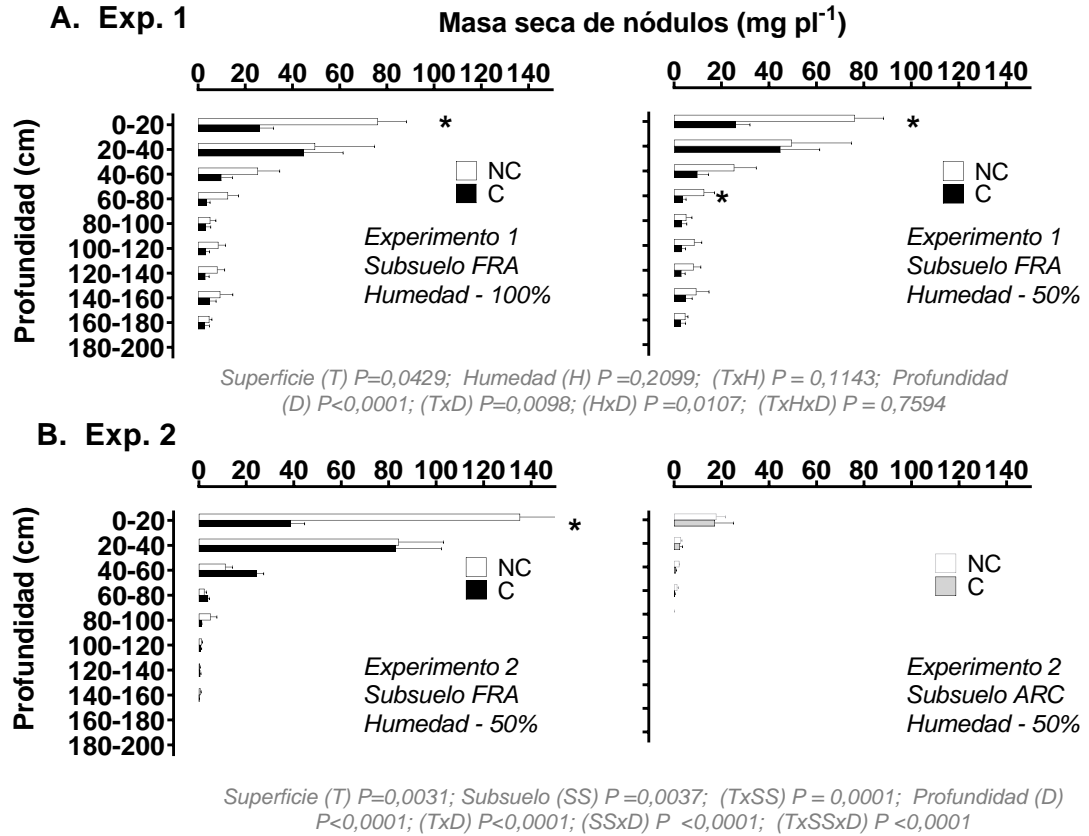
1 nodulación en los estratos subsuperficiales en las condiciones más restrictivas de
2 humedad: el número de nódulos en los estratos de 40-60 cm y 60-80 cm resultó 67-70%
3 menor ($P < 0.05$) en las plantas creciendo en suelos compactados con 50% de humedad
4 superficial (Fig. 4.2 A, derecha); con 100% de humedad superficial, no se apreciaron
5 diferencias significativas asociadas a la compactación en la nodulación subsuperficial
6 (Fig. 4.2 A, izquierda). La masa de nódulos en las distintas profundidades mostró una
7 tendencia semejante (Fig. 4.3), aunque en general las diferencias resultaron menos
8 pronunciadas que en el caso del número de nódulos.

9 En el experimento 2, las diferencias en la distribución vertical de nódulos
10 resultaron más marcadas (Fig. 4.2 B) que en el experimento 1, y los nódulos se
11 concentraron principalmente en los estratos 0-20 y 20-40 cm. Los efectos de la
12 compactación superficial sobre la distribución de nódulos estuvieron influenciados por
13 las características del subsuelo. En las plantas creciendo sobre subsuelos franco arenosos,
14 la compactación redujo un 67% el número de nódulos del estrato 0-20 cm, pero más allá
15 de este estrato no se observaron diferencias significativas asociadas a la condición física
16 superficial. En cambio, en los subsuelos arcillosos no se observaron diferencias
17 significativas entre plantas creciendo en condiciones NC y C. El número total de nódulos
18 en todos los estratos hasta los 100 cm fue significativamente ($P < 0,01$) menor en relación
19 a los subsuelos franco arenosos, incluyendo también el estrato superficial (Fig. 4.2 B,
20 derecha). Al igual que en el experimento 1, la masa de nódulos siguió una tendencia
21 similar al número de nódulos (Fig. 4.3 B).



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

Figura 4.2 Perfil de distribución del número de nódulos a R7, según la humedad superficial y la condición de compactación superficial (C: compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 1 (A, arriba); o según la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-arenosos vs. ARC: arcillosos) en el experimento 2 (B, abajo). Se muestra el valor P de los efectos de la condición de compactación superficial (T, “Superficie”), Humedad superficial (H), tipo de subsuelo (SS), profundidad (D) y sus interacciones. Los asteriscos indican diferencias significativas entre C y NC dentro de cada profundidad (* $P<0,05$) cuando se observaron efectos significativos de interacción entre la condición de compactación superficial (T) y algún otro factor. Las barras indican el error estándar.



1
2 **Figura 4.3** Perfil de distribución de la masa de nódulos a R7, según la humedad superficial y la
3 condición de compactación superficial (C: compactado vs. NC: no compactado) en el experimento
4 1 (A, arriba); o según la condición de compactación superficial y el tipo de subsuelo (FRA: franco-
5 arenosos vs. ARC: arcillosos) en el experimento 2 (B, abajo). Se muestra el valor P de los efectos
6 de la condición de compactación superficial (T, “Superficie”), Humedad superficial (H), tipo de
7 subsuelo (SS), profundidad (D) y sus interacciones. Los asteriscos indican diferencias
8 significativas entre C y NC dentro de cada profundidad (* $P<0,05$) cuando se observaron efectos
9 significativos de interacción entre la condición de compactación superficial (T) y algún otro
10 factor. Las barras indican el error estándar.

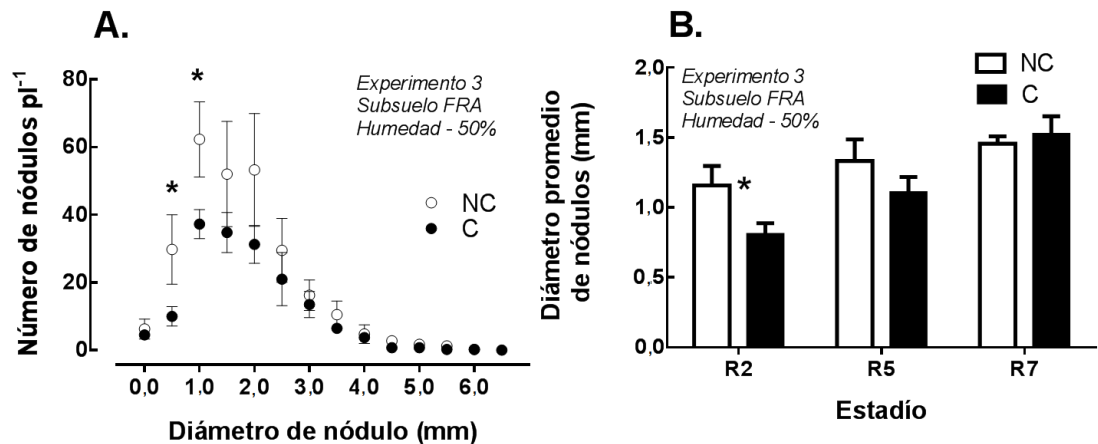
11

12 A pesar de que en ambos experimentos y en todos los tratamientos el número y masa
13 de nódulos se concentraron en los primeros 20 cm, los nódulos del subsuelo
14 representaron una proporción importante del total en las plantas creciendo con los
15 subsuelos franco-arenosos. En estas condiciones, la masa de nódulos en estos estratos
16 representó entre 40-50% del total. En algunos casos incluso, como en los tratamientos
17 compactados del experimento 2, los nódulos subsuperficiales representaron un 70% del

1 total. En cambio, en los subsuelos arcillosos, cerca del 80% de la masa de nódulos se
 2 concentró en los primeros 20 cm, independientemente de la condición superficial.

3 4.3.2. Efecto de la compactación sobre el tamaño y actividad de nódulos

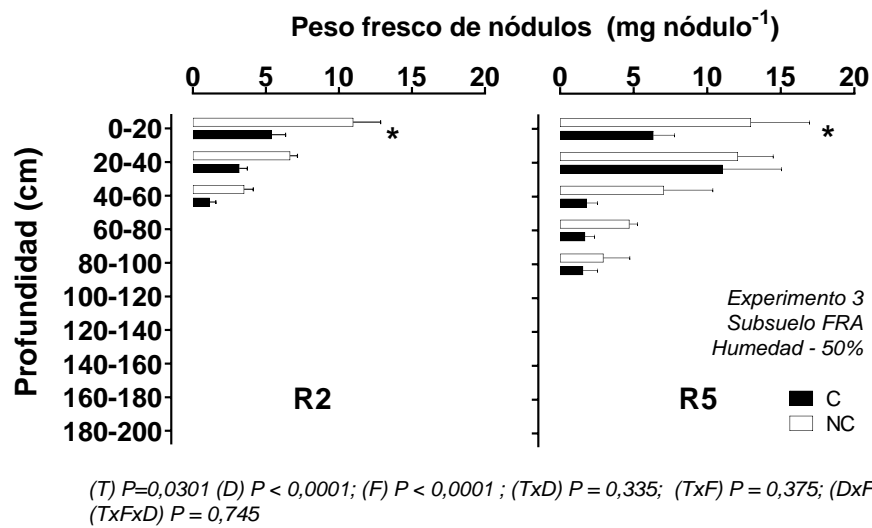
4 El experimento 3 permitió analizar los efectos de la compactación superficial
 5 sobre las características y funcionalidad de los nódulos. Las plantas creciendo en
 6 condiciones de suelo NC presentaron una mayor cantidad de nódulos más pequeños, de
 7 diámetro igual o inferior a 1 mm, que aquellas en C (Fig. 4.4 A). Aun así, las plantas en
 8 NC presentaron nódulos de mayor diámetro promedio ($P < 0,05$) que las de C a inicios del
 9 periodo reproductivo (Fig. 4.4 B). Posteriormente en el ciclo, durante el llenado de grano
 10 y madurez, no se observaron diferencias asociadas a la compactación superficial.



11

12 **Figura 4.4** (A) Distribución del tamaño de nódulos (a R7, agrupados en categorías de acuerdo al
 13 tamaño individual, cada 0,5 mm de diámetro), según la condición de compactación superficial
 14 (C: compactado vs. NC: no compactado), en el experimento 3. (B) Diámetro promedio de
 15 nódulos en distintos momentos fenológicos (R2 = floración; R5= inicio de llenado de grano, y
 16 R7 = inicio de madurez fisiológica), según la condición de compactación superficial (C:
 17 compactado vs. NC: no compactado) en el experimento 3. (B). Los asteriscos indican diferencias
 18 significativas ($P < 0,05$) entre C y NC. Las barras indican el error estándar.

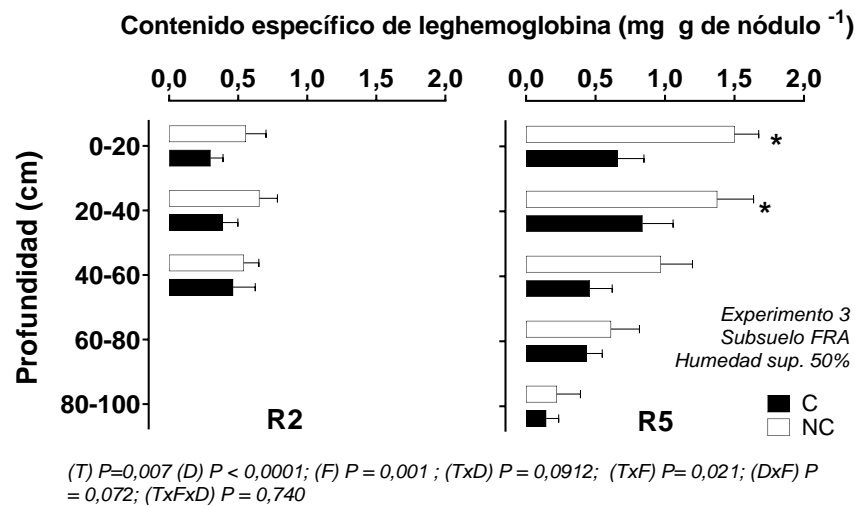
1 Durante el período reproductivo, los nódulos de mayor tamaño (diámetro superior
 2 a 2 mm, extraídos para determinaciones de contenido de leghemoglobina) resultaron un
 3 46% menores en las plantas de C que en las de NC (P=0,03). Si bien no se observaron
 4 efectos de interacción entre el tratamiento y el estado fenológico o la profundidad, las
 5 diferencias tendieron a ser mayores en el estrato superficial (Fig. 4.5), donde a su vez se
 6 observaron los nódulos de mayor peso individual.



7
 8 **Figura 4.5** Peso fresco promedio de los nódulos extraídos para los muestreos de leghemoglobina
 9 (diámetro superior a los 2 mm) en R2 (izquierda) y R5 (derecha), en estratos de 20 cm, según la
 10 condición de compactación superficial (C: compactado vs. NC: no compactado) del experimento
 11 3. Los asteriscos indican cuando las diferencias entre C y NC excedieron el valor de la DMS
 12 (Fischer) dentro de cada fecha y estrato. Se indican los niveles de significancia para la
 13 compactación superficial (T), el estado fenológico/fecha (F), la profundidad (D), y sus
 14 interacciones. Las barras indican el error estándar.

15
 16 El contenido específico de leghemoglobina en los nódulos (mg.g nódulo⁻¹) se
 17 incrementó significativamente (P<0,001) entre R2 y R5 (Fig. 4.6). A su vez, los nódulos
 18 de los estratos de 0-20 y 20-40 cm tuvieron un mayor contenido específico de
 19 leghemoglobina en sus tejidos que los nódulos de estratos más profundos (P < 0.0001).
 20 Se observaron también efectos significativos asociados a la compactación superficial

1 (P<0,01) y de interacción entre el nivel de compactación y el estado fenológico (P<0,05):
 2 los nódulos de las plantas creciendo en NC presentaron mayores contenidos de
 3 leghemoglobina que los de C en las distintas profundidades, y estas diferencias fueron a
 4 su vez mayores en R5. En R2 no se observaron diferencias significativas entre
 5 tratamientos (P=0,265). No hubo efectos de interacción entre el tratamiento y la
 6 profundidad (P=0,394).



7

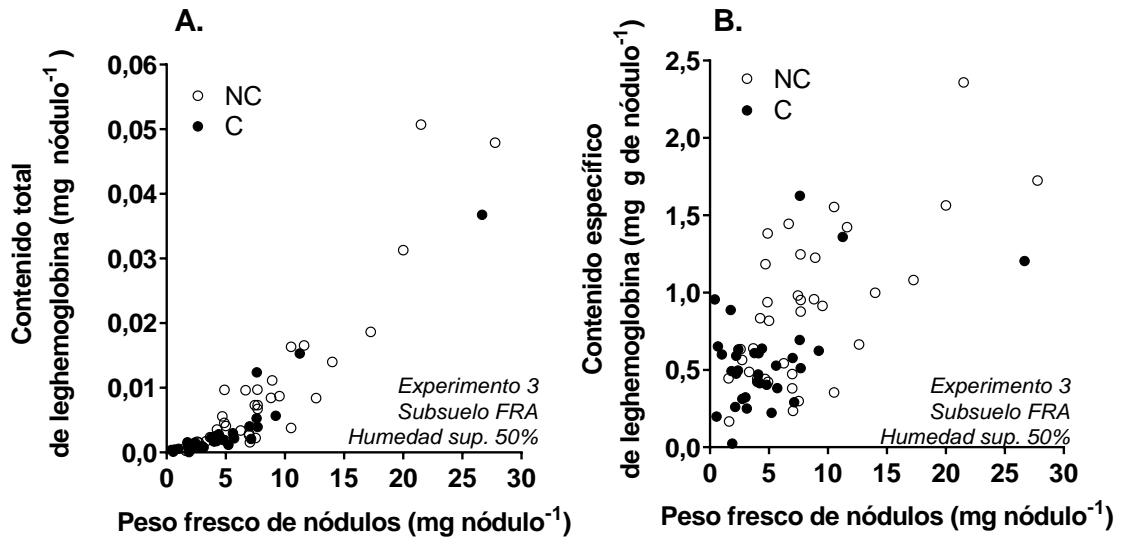
8 **Figura 4.6** Contenido específico de leghemoglobina en R2 y R5, en estratos de 20 cm, según la
 9 condición de compactación superficial (C: compactado vs. NC: no compactado) del experimento
 10 3. Los asteriscos indican cuando las diferencias entre C y NC excedieron el valor de la DMS
 11 (Fischer) dentro de cada fecha y estrato. Se indican los niveles de significancia para el nivel de
 12 compactación superficial (T), el estado fenológico/fecha (F), la profundidad (D), y sus
 13 interacciones. Las barras indican el error estándar.

14

15 El contenido total de leghemoglobina estuvo asociado positivamente con el peso
 16 fresco promedio de los nódulos (P<0,0001; r = 0,91). El contenido específico de
 17 leghemoglobina en los tejidos resultó también mayor en los nódulos más grandes
 18 (P<0,0001; r = 0,6273). En consecuencia, los nódulos de mayor peso (como los que se
 19 encontraron presentes en los estratos de 0-20 cm y 20-40 cm, especialmente los de NC)
 20 presentaron un mayor contenido total de leghemoglobina; Fig. 4.7 A). y, dado la mayor

1 cantidad de nódulos, y el mayor contenido específico de leghemoglobina por nódulo en
2 el tratamiento no compactado, las plantas creciendo con una condición física superficial
3 más favorable presentaron un mayor contenido total de leghemoglobina ($P=0,042$), con
4 diferencias más pronunciadas entre tratamientos durante el llenado de granos (Fig. 4.8).

5



6

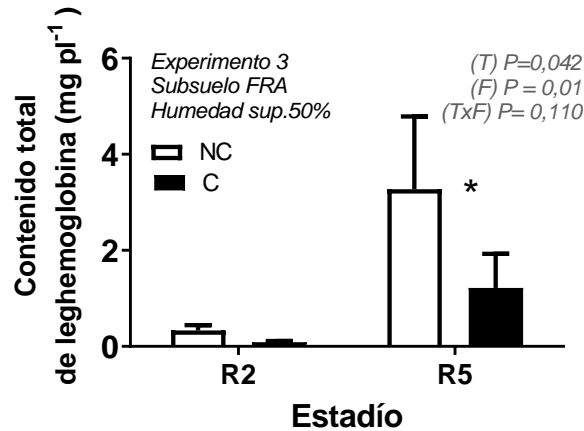
7 **Figura 4.7** (A) Contenido total de leghemoglobina por nódulo en función al peso fresco
8 promedio de los nódulos; y (B) Contenido específico de leghemoglobina en función al peso
9 fresco promedio de los nódulos; para los nódulos de los distintos estratos de plantas de soja
10 creciendo en suelos compactados (C) o no compactados (NC) del experimento 3.

11

12

13

14



1

2 **Figura 4.8** Contenido total de leghemoglobina por planta en distintos momentos fenológicos (R2
3 = floración; R5= inicio de llenado de grano), en plantas de soja creciendo en suelos compactados
4 (C) o no compactados (NC) del experimento 3. Se indican los niveles de significancia para la
5 condición física superficial (T), la fecha o estadio fenológico (F) y su interacción (Tx F). Los
6 asteriscos indican cuando las diferencias entre C y NC excedieron el valor de la DMS (Fischer,
7 $P < 0,05$), en cada estadio. Las barras indican el error estándar.

8 4.3.4. Nodulación y producción de Biomasa

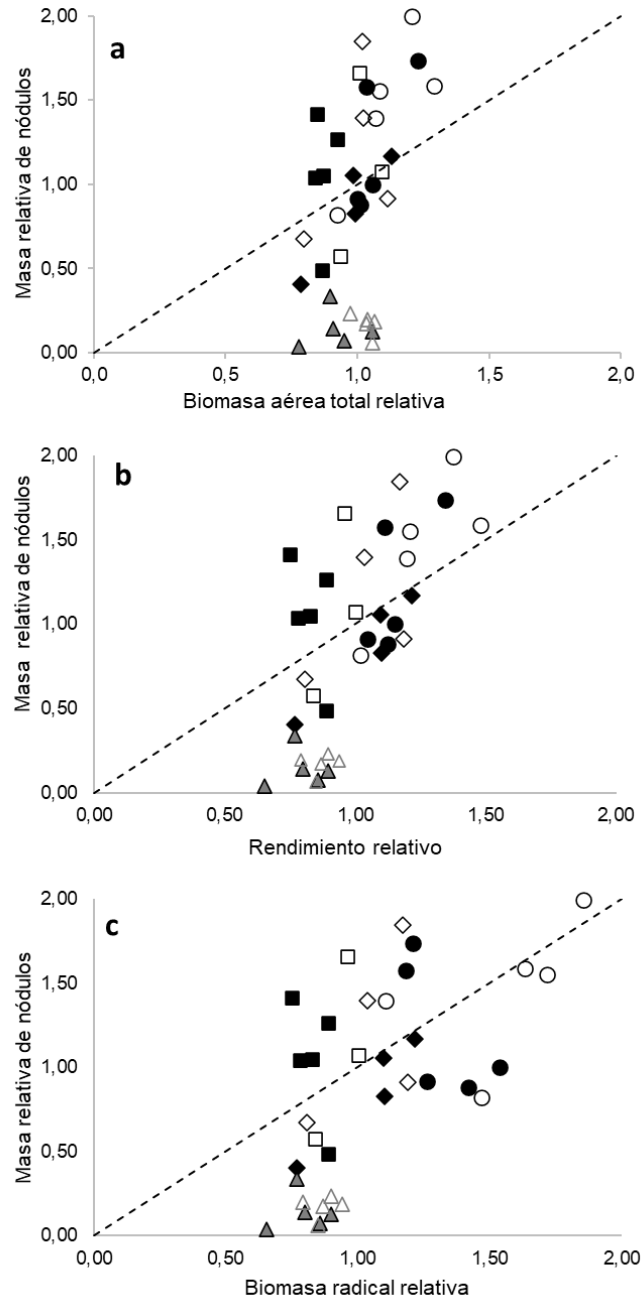
9 El grado de correlación y significancia entre las variables analizadas fue diferente
10 analizando los experimentos por separado (Cuadro 4.1). En el experimento 1, las cuatro
11 variables relacionadas con las dimensiones de los nódulos estuvieron significativamente
12 correlacionadas con la biomasa aérea total, el rendimiento y la biomasa vegetativa. Por
13 el contrario, en el experimento 2 la masa total de nódulos estuvo correlacionada
14 significativamente con el rendimiento y con la biomasa de raíces y el peso de nódulos
15 con la biomasa de las raíces.

16 Al analizar conjuntamente la información de los experimentos 1 y 2, se encontró
17 una correlación positiva y significativa entre biomasa aérea total, biomasa de raíces y
18 biomasa de grano y la masa seca total y número de nódulos de las plantas. (Cuadro 4.1).
19 No se observó una correlación significativa entre la biomasa de los distintos órganos y el
20 tamaño promedio de los nódulos (diámetro o peso), ni entre la biomasa vegetativa y

ninguna de las características de éstos. Al analizar los resultados en términos relativos a los valores promedio de todos los tratamientos y experimentos, se observó que el grado de variación de atributos como la masa total de los nódulos por planta fue mayor que el de la biomasa total aérea, de granos y de raíces (Figura 4.9). Así, por ejemplo, frente a variaciones cercanas al 10% en la biomasa aérea, la masa de nódulos varió cerca de un 100%. Otros atributos como el número de nódulos siguieron una tendencia similar.

Cuadro 4.1 Coeficientes de correlación de Pearson entre la biomasa final a R7 de plantas individuales (BAT=aérea total, G=grano, BAV=aérea vegetativa, y BR=de raíces) y la masa seca total de nódulos por planta, número de nódulos por planta; diámetro promedio de nódulos y peso promedio de nódulos individuales; en el conjunto de los experimentos 1 y 2; y para ambos experimentos por separado. Se indica debajo de cada coeficiente el grado de significancia de la correlación (* P<0,05; ** P<0,01; *** P<0,001; ns = no significativa).

	Exp. 1 y 2				Exp.1				Exp.2			
	BAT	G	BA V	BR	BAT	G	BAV	BR	BAT	G	BAV	BR
Masa	0,41	0,62	0,14	0,53	0,71	0,76	0,56	0,01	0,03	0,52	-0,27	0,86
	**	***	ns	**	***	***	**	ns	ns	*	ns	***
Número	0,43	0,49	0,11	0,35	0,56	0,55	0,53	0,32	0,11	-0,03	0,18	0,07
	**	***	ns	*	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns
Diámetro	0,003	-0,12	0,17	-0,12	0,52	0,46	0,57	0,33	-0,24	-0,02	-0,31	0,39
	ns	ns	ns	ns	*	*	**	ns	ns	ns	ns	ns
Peso	-0,06	-0,13	0,09	-0,13	0,52	0,44	0,59	0,21	-0,38	-0,07	-0,47	0,46
	ns	ns	ns	ns	*	*	**	ns	ns	ns	ns	*



1

2 **Figura 4.9.** Relaciones entre la masa total de nódulos por planta y (a) la biomasa aérea total, (b)
 3 rendimiento y (c) biomasa radical por planta, a R7, en términos relativos. Los datos se encuentran
 4 relativizados al promedio de todos los datos de los experimentos 1 y 2. Los símbolos vacíos
 5 corresponden a los tratamientos no compactados y los símbolos llenos a los compactados;
 6 Experimento 1: círculos (100% de humedad superficial, subsuelo franco-arenoso) y rombos (50
 7 % de humedad superficial, subsuelo franco-arenoso); Experimento 2: cuadrados (subsuelo
 8 franco-arenoso) y triángulos (subsuelo arcilloso). La línea punteada representa la relación 1:1

1 **4.4. Discusión**

2 La compactación del horizonte superficial redujo la cantidad, la masa y actividad de
3 nódulos totales por planta (Figuras 4.1 y 4.6). Esto coincide con lo encontrado en otros
4 estudios que observaron disminuciones en el número y la masa total de nódulos por
5 planta (Buttery et al., 1998; Paredes et al., 2008; Siczec y Lipiec, 2011) o en la actividad
6 de los nódulos (Siczec y Lipiec, 2011) ante aumentos en la densidad aparente y
7 resistencia mecánica de los suelos en el cultivo de soja.

8 Si bien los principales efectos de la compactación se produjeron en los nódulos de
9 las raíces superficiales (Fig. 4.2), es decir, en aquellas expuestas directamente a las
10 impedancias físicas, los resultados obtenidos no pueden interpretarse como un efecto
11 local de la compactación sobre los nódulos o sobre las raíces. En leguminosas, el número
12 de nódulos está regulado por un complejo sistema de señalización, que involucra tanto
13 respuestas locales, a nivel de nódulos y raíces, como sistémicas (Larrainzar et al., 2014).
14 Las respuestas sistémicas dependen del estado fisiológico de las plantas y son moduladas
15 por factores externos, como, por ejemplo, la disponibilidad de nitratos (Day et al. 1989;
16 Mortier et al., 2012). Las señales que intervienen en la supresión de la formación de
17 nódulos pueden ser emitidas por la parte aérea, las raíces e incluso los nódulos maduros
18 fijadores de N (Oka-Kira y Kawaguchi, 2006; Mortier et al., 2012; Libault, 2012). Más
19 aún, algunas señales son producidas localmente en las raíces, transportadas a la parte
20 aérea y retransmitidas a las raíces para limitar la formación de nuevos nódulos, como
21 sucede en el caso de condiciones de elevada acidez del suelo (Larrainzar et al., 2014).
22 Esta complejidad en los mecanismos que regulan el número de nódulos, dificulta la
23 interpretación sobre los efectos de la compactación sobre la nodulación en las raíces

1 directamente afectadas. Se requieren mayores estudios para esclarecer si la reducción en
2 la nodulación en las raíces superficiales corresponde únicamente a una respuesta local de
3 la compactación, a una reducción en la disponibilidad de asimilados, o a otro tipo de
4 respuesta de tipo sistémica generada por la compactación como algunas de las descritas
5 anteriormente.

6 Además de afectar la nodulación en las raíces superficiales la compactación
7 superficial redujo la presencia de nódulos en los estratos subsuperficiales (Fig. 4.3). La
8 presencia de nódulos subsuperficiales ha sido documentada a campo en cultivos como
9 alfalfa hasta profundidades de 110 cm (Racca et al., 2001; Arolfo y Basigalup, 2012), y
10 hasta profundidades de 100 a 140 cm en el cultivo de soja, en ensayos de campo
11 (Grubinger, et al., 1982) y rizotrones (Hoogenboom et al., 1987). Sin embargo, la
12 contribución, dinámica y actividad de estos nódulos subsuperficiales, y los efectos que
13 pudiera tener la compactación superficial sobre éstos, no había sido documentada hasta
14 ahora. En nuestros estudios, a pesar de la importante masa de los nódulos
15 subsuperficiales, éstos no alcanzaron a compensar la reducción generada por un estado
16 físico superficial desfavorable en los primeros cm en el número y masa de nódulos total.
17 En efecto, se observó un efecto de la compactación superficial del suelo sobre el número
18 y masa de los nódulos de estratos más profundos, ya que las plantas creciendo en NC
19 presentaron una mayor nodulación en los estratos subsuperficiales que las de C. Es
20 probable que ese efecto se deba, al menos en parte, al menor tiempo de crecimiento de
21 las raíces en profundidad como consecuencia del retraso inicial en atravesar los estratos
22 compactados (Capítulo 3), y menor proliferación total de raíces en estratos más
23 profundos. No obstante, pueden existir otros mecanismos detrás de estos efectos sobre la

1 nodulación en sectores que no son directamente afectados por la compactación, como
2 ocurre en otras situaciones de estrés. Por ejemplo, se ha observado que limitaciones
3 prolongadas de nitrógeno en algunas especies leguminosas como *Medicago truncatula*
4 pueden inducir una respuesta compensatoria en otros sectores del sistema radical a través
5 de un mayor número y tamaño de nódulos (Jeudy et al., 2010; Laguerre et al., 2012). En
6 el caso del estrés por sequía, algunos autores han observado que la cantidad de nódulos
7 y la FBN en soja pueden verse disminuidas en toda la planta a partir de una respuesta de
8 tipo sistémico, generada por la acumulación de ureidos en hojas (Purcell et al., 1998;
9 Serraj et al., 1999) y nódulos (King y Purcell, 2005; Ladrera et al., 2007). Otros autores
10 en cambio han indicado que podría existir también una regulación local en soja y otras
11 legumbres frente a estreses como sequías temporarias (Ladrera et al., 2007; Marino et
12 al., 2007; Gil-Quintana et al., 2013). Hasta el momento no existían evidencias en cuanto
13 a la respuesta del sistema de nódulos en su conjunto a la compactación superficial. El
14 presente estudio mostró indicios de que una estructura de suelo desfavorable en el estrato
15 superficial puede alterar la nodulación también en estratos no afectados directamente,
16 generando una respuesta de tipo sistémica, al menos al considerar el ciclo total, sin
17 generarse compensaciones como las encontradas en otras especies (Laguerre et al.,
18 2012). Se necesitan sin embargo estudios específicos que permitan esclarecer esta
19 respuesta y analizar en detalle los mecanismos que regulan los efectos de la compactación
20 de suelos sobre la nodulación.

21 En cuanto al tamaño de los nódulos, se encontraron nódulos de mayor diámetro en
22 los suelos no compactados al inicio del período reproductivo (R2), en nódulos
23 superficiales y subsuperficiales. Cabe destacar que las diferencias en diámetro no fueron

1 evidentes al progresar el ciclo, lo que puede deberse a la mayor cantidad de nódulos
2 pequeños (<1,5 mm) que se formaron en los suelos no compactados. Este cambio en la
3 cantidad y proporción de granos de diferente tamaño puede explicar por qué en algunos
4 estudios no se observaron efectos de la condición física superficial sobre el tamaño de
5 los nódulos (por ejemplo, Buttery et al., 1998) o que, incluso, se hayan registrado
6 aumentos en el tamaño promedio de los nódulos (Voorhees, et al., 1976; Siczek y Lipiec,
7 2011), asignando este efecto al engrosamiento de las raíces generalmente observable en
8 suelos compactados. Sin embargo, el presente estudio muestra que el tamaño máximo de
9 los nódulos fue mayor en la situación NC, en todas las profundidades analizadas. El
10 tamaño de los nódulos está principalmente gobernado por el suministro de carbohidratos
11 desde la parte aérea (Vance, 2008). Los productos de la fotosíntesis son transportados a
12 los nódulos donde son utilizados en procesos de respiración y, desarrollo, y se acumulan,
13 contribuyendo al incremento de tamaño del nódulo (Libault, 2012). Se ha hipotetizado
14 que los nódulos de mayor tamaño tendrían una mayor capacidad de actuar como
15 “destino” (*sink*) de fotoasimilados y agua que nódulos más pequeños en condiciones de
16 estrés (Purcell et al., 1997; King y Purcell, 2005), y que este mecanismo evolutivo
17 evitaría que demasiados nódulos se transformen en una “carga” para la planta en
18 condiciones de estrés (Arrese-Igor y González, 2011). De hecho, se ha demostrado que
19 la asignación de carbono a los nódulos es parte de un complejo mecanismo de
20 señalización (Larrainzar et al., 2014) que, a su vez, depende de factores endógenos, como
21 la disponibilidad de carbono (Mortier et al., 2012) o la tasa de fijación de nitrógeno
22 (Jeudy et al. 2010). Por lo tanto, si bien se desconocen los mecanismos mediante los
23 cuales la compactación afectó el tamaño final de los nódulos, esto parecería ser más una

1 consecuencia indirecta del crecimiento de la planta que de un efecto local directo del
2 suelo sobre el tamaño de los nódulos.

3 La compactación superficial afectó la funcionalidad de los nódulos, medida a través
4 del contenido de leghemoglobina, en coincidencia con lo observado por Siczek y Lipiec
5 (2011), quienes encontraron una menor actividad de nitrogenasa en los nódulos creciendo
6 en zonas compactadas. Por un lado, los nódulos desarrollados en las capas directamente
7 afectadas por la compactación (0-20 cm) tuvieron un menor contenido total y específico
8 de leghemoglobina (Fig. 4.6). Por otro lado, y al contrario de lo planteado en la tercera
9 hipótesis, los resultados mostraron que la concentración de leghemoglobina se redujo
10 también en los nódulos que crecieron más allá de los estratos compactados. De este
11 modo, aunque se observó una importante masa de nódulos subsuperficiales y éstos
12 resultaron activos, no se observaron efectos compensatorios ni en la masa ni en la
13 actividad en estos estratos más profundos. Así, con menor cantidad de nódulos y
14 concentración de leghemoglobina en nódulos superficiales y subsuperficiales, el
15 contenido total de leghemoglobina por planta resultó menor en las plantas creciendo en
16 suelos compactados superficialmente (Fig. 4.8). Estos resultados sugieren que los
17 patrones generales de distribución de la nodulación y de la fijación, con fuerte
18 preponderancia en los estratos superiores del suelo (Caetano-Anollés y Gresshoff, 1993),
19 se mantienen más allá de estos estratos, y respaldan la existencia de un efecto sistémico
20 de la compactación sobre la actividad del sistema de fijación biológica de nitrógeno.

21 Los contenidos totales y específicos de leghemoglobina estuvieron directamente
22 relacionados con el tamaño de los nódulos. Coincidentemente, King y Purcell (2005),
23 encontraron que los nódulos más grandes poseen proporcionalmente una mayor cantidad

1 de tejido capaz de fijar N₂ que nódulos más pequeños y relacionaron esto con una mayor
2 capacidad de los nódulos grandes para actuar como destino de fotoasimilados por unidad
3 de masa (Purcell et al. 1997; King y Purcell, 2005). En efecto, la tasa de fijación de
4 nitrógeno está positivamente relacionada con la asignación de carbono a los nódulos y se
5 ha observado que nódulos con baja tasa de fijación reducen e, incluso, detienen su
6 crecimiento (Jeudy et al., 2010). Por lo tanto, la relación entre el tamaño de los nódulos
7 y su actividad incluye dos procesos íntimamente relacionados: un mayor tamaño,
8 definido por las vías de señalización discutidas en los párrafos precedentes, que
9 determina un contenido total mayor de leghemoglobina y una mayor promoción del
10 crecimiento asociada a la mayor actividad de los nódulos. La compactación,
11 probablemente, esté impactando en ambos procesos. Al reducir conjuntamente la
12 cantidad y el tamaño de los nódulos y sus contenidos totales y específicos de
13 leghemoglobina, posiblemente redujo también la capacidad total de las plantas en fijar
14 nitrógeno.

15 Las correlaciones encontradas entre las características de la nodulación,
16 principalmente asociadas a la masa y número de nódulos estuvieron correlacionadas con
17 la biomasa de las plantas. Sin embargo, la aproximación realizada en los experimentos
18 descritos en este capítulo, y la complejidad de los procesos involucrados en la definición
19 del número, tamaño y actividad de los nódulos, no permite discernir si una posible menor
20 FBN esperable a partir de los resultados encontrados, fue limitante para el crecimiento de
21 las plantas o fue un resultado de éste. Cabe destacar, no obstante, que el rango de
22 variabilidad de los atributos de los nódulos (Fig. 4.9) fue mayor al que tuvieron los
23 atributos de las plantas. Esto sugieren que, frente a cambios como la compactación

1 superficial, la disponibilidad de agua o la textura del subsuelo, existe una mayor
2 sensibilidad de los procesos ligados a la definición de la cantidad y dimensiones de los
3 nódulos que de los relacionados con el crecimiento de las plantas y que, dentro de estos
4 últimos, la sensibilidad de la raíz fue mayor que la del rendimiento y éste mayor a la
5 biomasa total. Esto guarda cierta relación con las respuestas generales a la sequía, en las
6 que está bien documentado que la nodulación y la tasa de fijación biológica se deprimen
7 aún con niveles de déficit hídrico moderados que no afectan la fotosíntesis ni el
8 crecimiento de las plantas (Sinclair, 1986; Santachiara et al., 2019). Se refuerza así la idea
9 de la participación de señales que involucran a la parte aérea, raíces y nódulos más allá
10 de la producción y provisión de asimilados, que regulan las respuestas de la nodulación a
11 la compactación superficial del suelo. Se requieren estudios específicos que permitan
12 esclarecer los mecanismos fisiológicos detrás de esta respuesta.

13 La relación entre una menor nodulación actividad de los nódulos y la producción de
14 biomasa aérea y grano puede, además, estar regulada por múltiples factores, como la
15 disponibilidad de N en el suelo, la capacidad del cultivo para absorber ese N, y/o el grado
16 de limitación de otros recursos, como el agua o radiación. Por ejemplo, algunos estudios
17 recientes muestran que la disponibilidad de N proveniente de FBN puede estar limitando
18 los rendimientos de soja sobre todo en aquellos ambientes de alta productividad potencial
19 (Cafaro La Menza et al., 2017). De manera coincidente, las correlaciones entre la
20 nodulación y la biomasa y el rendimiento resultaron significativas en el experimento 1,
21 que tuvo menores restricciones a la extracción de agua, según se discutió en el Capítulo
22 3.

1 En los experimentos realizados, un estado físico desfavorable en los primeros cm de
2 suelo redujo la cantidad y masa de nódulos tanto en condiciones de humedad superficial
3 cercanas a capacidad de campo como en condiciones de humedad edáfica más restrictivas
4 (Fig. 4.1 y 4.2 A). Esto contrasta con algunos estudios que encontraron que los efectos
5 de la compactación en la nodulación pueden acentuarse con deficiencias hídricas
6 (Buttery et al., 1998; Siczek et al., 2015), debido a la reducción de la resistencia a la
7 penetración que ocurre al humedecerse los suelos (Whalley et al., 2006; Bengough et al.,
8 2011). Sin embargo, los niveles de macro-porosidad de los suelos con alto contenido de
9 limo que se utilizaron en estos experimentos resultan naturalmente bajos (Taboada et al.,
10 1998; 2008), y los niveles de macro-porosidad en los tratamientos compactados (Cuadro
11 3.1, Capítulo 3) estuvieron por debajo del valor umbral crítico de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ó 10%
12 (Bengough et al. 2006; Valentine et al. 2012). Estos bajos niveles de macro-porosidad
13 podrían estar actuando como limitantes, en especial con mayores contenidos de humedad
14 en el suelo.

15 Los efectos de la compactación sobre la nodulación fueron menos marcados en los
16 subsuelos arcillosos del experimento 2. Si bien se esperaba, como observaron otros
17 autores en soja y poroto (Buttery et al., 1998), que los elevados contenidos de arcilla
18 restringieran la proliferación de nódulos subsuperficiales, los subsuelos arcillosos
19 impactaron también sobre la cantidad de nódulos del estrato 0-20 cm tanto en condiciones
20 compactadas como no compactadas. Así, los efectos de la compactación superficial sobre
21 la nodulación fueron enmascarados en las plantas sobre estos subsuelos. La restricción
22 en las tasas de extracción de agua generadas en los subsuelos arcillosos presentadas en
23 el Capítulo 3, en especial durante el período de llenado de granos, pudo haber

1 condicionado las tasas de crecimiento y provisión de asimilados para los nódulos,
2 observándose así una respuesta de tipo sistémica que limitó los efectos de la
3 compactación.

4 **4.5. Conclusiones**

5 La compactación superficial redujo la cantidad, y masa del sistema de nódulos del
6 cultivo de soja, tanto en el horizonte superficial, donde se encuentran la mayor cantidad
7 de nódulos, los nódulos de mayor tamaño y los nódulos de mayor actividad, como en los
8 estratos subsuperficiales. Estos resultados no proporcionan suficiente evidencia para
9 rechazar la hipótesis 1, la cual puede así ser aceptada La presencia de subsuelos con
10 restricciones en profundidad limitó aún más la cantidad y masa total de los nódulos
11 subsuperficiales, e incluso ejerció un efecto negativo sobre la nodulación en superficie,
12 enmascarando posibles diferencias asociadas a la compactación. Por tanto, los efectos de
13 la compactación sobre la nodulación superficial y subsuperficial fueron menos marcados
14 en suelos con restricciones en profundidad (alto contenido de arcilla). En este caso, las
15 evidencias fueron suficientes para rechazar la segunda hipótesis. Como se esperaba, la
16 compactación afectó como se esperaba la actividad de los nódulos de las raíces
17 superficiales directamente afectadas, pero al contrario de lo planteado en la tercera
18 hipótesis, los contenidos de leghemoglobina de los nódulos subsuperficiales también se
19 vieron afectados, dando indicios de una respuesta de tipo sistémica en este aspecto. Si
20 bien la mayor parte de los resultados obtenidos parecen sugerir una respuesta de este tipo
21 frente en la nodulación y actividad de los nódulos frente a la compactación, para la
22 correcta comprensión de los mecanismos involucrados se precisan otras aproximaciones,
23 como las sugeridas por Larrainzar et al. (2014) que logren separar los efectos sistémicos

- 1 de otros probables efectos locales. Se requieren también mayores estudios que permitan
- 2 analizar bajo qué condiciones ambientales los efectos observados sobre la nodulación
- 3 pueden actuar como limitantes para el rendimiento del cultivo y el aprovechamiento de
- 4 otros recursos.
- 5 .

Capítulo 5

Descompactación mecánica de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas.

1 susceptibilidad a la compactación están inversamente relacionadas con el contenido de
2 materia orgánica (Quiroga et al., 1999; Díaz-Zorita y Grosso, 2000).

3 Independientemente de los niveles de materia orgánica total del suelo, los
4 aportes de residuos orgánicos pueden reducir la susceptibilidad de los suelos a la
5 compactación, en especial a partir de los efectos de los materiales orgánicos lábiles sobre
6 la estabilidad de los agregados, menor dispersión y migración de partículas y micro-
7 agregados, y disminución de las fuerzas de cohesión intra-agregados (Zhang, 1994; Ball
8 et al., 2000; Hamza y Anderson, 2005). La cobertura de residuos puede también reducir
9 la susceptibilidad a la compactación de los suelos, a partir de los efectos antes
10 mencionados, y al modificar la interface suelo-neumático de la maquinaria agrícola y la
11 presión ejercida sobre el suelo (Li et al., 2001; Alakukku et al., 2003; Chamen et al.,
12 2003). Así, algunos estudios han resaltado que la adopción de sistemas de mayor
13 intensidad y rotación de cultivos e inclusión de cultivos de cobertura, con mayores aportes
14 de carbono y residuos en superficie, puede ser una estrategia efectiva para prevenir o
15 atenuar los procesos de compactación (Chamen et al., 2003).

16 La compactación, en especial a nivel subsuperficial, genera alteraciones en las
17 propiedades físicas del suelo de efectos duraderos y difíciles de corregir (Alakukku et al.,
18 2003; Spoor, 2006). Hamza y Anderson (2005), y Chamen et al. (2003; 2015) han
19 analizado una serie de medidas de manejo para prevenir o mitigar la compactación de
20 suelos o sus efectos. Las estrategias de prevención incluyen: (a) reducir la presión en el
21 suelo disminuyendo el peso por eje, y/o incrementar el área de contacto de los neumáticos
22 con el suelo; (b) transitar y pastorear en condiciones óptimas de humedad edáfica; (c)
23 reducir el número de pasadas de maquinaria y la intensidad y frecuencia de pastoreos; (d)
24 confinar el tránsito de maquinaria a superficies específicas (tránsito controlado); (e)
25 mantener elevados niveles de materia orgánica y residuos vegetales; y (f) mantener un

1 estado de saturación de bases balanceado y contenidos nutricionales adecuados para
2 permitir al sistema suelo-cultivo a resistir este y otro tipo de estreses. Estos mismos
3 autores han propuesto también medidas orientadas a la corrección o mitigación de la
4 compactación, entre las cuales se destacan: (a) la rotación con cultivos que permitan altos
5 aportes de materia orgánica y sistemas radicales profundos y profusos; y (b) la
6 descompactación mecánica.

7 Existe una extensa experiencia respecto al uso de descompactadores mecánicos
8 (p.ej. para-till, cultivie, escarificadores, subsoladores, etc.) y a sus efectos sobre suelos y
9 cultivos a nivel mundial, en especial en sistemas bajo laboreo continuo, con resultados
10 muy variables (Radford et al., 2001; Hamza y Anderson, 2005; Spoor, 2006; Batey, 2009;
11 Dang et al., 2015; Chamen et al., 2015; Schneider et al., 2017). En las últimas décadas se
12 han desarrollado también distintas experiencias orientadas a remover impedancias físicas
13 en SD a través del uso de subsoladores, como las que se desarrollan en Molisoles con alto
14 contenido de limo y alta susceptibilidad a la compactación como los de la región
15 pampeana. Sin embargo, los resultados han sido ampliamente variables en cuanto a la
16 respuesta en los rendimientos de los cultivos, sobre a qué aspectos de la estructura del
17 suelo y propiedades físicas se ven modificadas al descompactar, y a la magnitud de los
18 cambios generados por la práctica. Por ejemplo, mientras que algunos estudios no han
19 observado modificaciones significativas en los niveles de densidad aparente de suelos
20 descompactados (Álvarez et al., 2009 a; Álvarez, 2012) otros estudios han observado
21 reducciones de 1,33 a 1,27 Mg.m⁻³ (Díaz-Zorita, 2000) o de 1,43 a 1,29 Mg.m⁻³
22 (Guecaimburú et al., 2014) dentro de los primeros 0,2 m del suelo. Algunos estudios han
23 incluso mostrado aumentos en la densidad del suelo asociados al pasaje de escarificadores
24 (Bonel et al., 2004). Los resultados sobre la perdurabilidad de la descompactación
25 resultan también variables, con efectos de menos de una campaña de duración (Álvarez

1 et al., 2006), a efectos residuales hasta dos o tres años después del escarificado o
2 subsolado (Mon, 2008; Guecaimburú et al., 2014).

3 Así, las experiencias de descompactación en Molisoles en SD como los de la
4 región pampeana han incluido suelos con diferencias texturales superficiales y
5 subsuperficiales, en el contenido de carbono orgánico, en el nivel de compactación previo
6 a la labor, y en la historia agrícola previa; todos factores que podrían estar incidiendo en
7 la respuesta a la descompactación (Spoor, 2006). Es esperable que, en suelos más
8 susceptibles a la compactación, como aquellos con mayor contenido de limo, menor
9 contenido de materia orgánica y una historia agrícola de menor intensidad, y en aquellos
10 con mayores niveles de compactación inicial, los cambios en las propiedades físicas luego
11 de la descompactación sean mayores. Pero si bien existen estudios que han analizado los
12 factores edáficos y de manejo que inciden sobre la susceptibilidad a la compactación de
13 los suelos en algunos sistemas productivos (Ball et al., 2000), no existen al momento
14 estudios que permitan identificar cuáles de esos factores pueden estar incidiendo en la
15 respuesta a la descompactación y a su perdurabilidad, en particular en SD. A su vez,
16 mucha de esta información se encuentra únicamente disponible en informes y
17 publicaciones de carácter local, y no ha sido aún integrada. El presente capítulo tuvo, por
18 lo tanto, los siguientes objetivos:

- 19 • Evaluar los efectos de la descompactación mecánica sobre las propiedades físicas
20 de los suelos y su perdurabilidad, de acuerdo con el estado físico del suelo previo a
21 la labor y a la historia agrícola previa.
- 22 • Integrar y contrastar en un trabajo de meta-análisis los resultados de 32 estudios de
23 descompactación mecánica en Molisoles en SD de la región pampeana, relevados
24 de diferentes fuentes de información.

- 1 • Identificar los factores edáficos y de manejo que pueden estar condicionando la
2 respuesta de las propiedades físicas del suelo a la descompactación mecánica.

3 Las hipótesis de trabajo del presente capítulo son:

4 (a) La descompactación mecánica permite reducir los niveles de resistencia a la
5 penetración, y aumentar la infiltración y la capacidad de aireación en suelos
6 previamente compactados.

7 (b) La magnitud de estos será mayor en ambientes restrictivos (i.e. mayor
8 compactación) y/o con mayor susceptibilidad a la compactación, incluyendo:

9 b.1. suelos con mayores niveles de compactación inicial,

10 b.2. suelos con mayor contenido de limo,

11 b.3. suelos con menor contenido de materia orgánica,

12 b.4. condiciones con menor intensidad agrícola.

13 (c) La historia agrícola previa a la labor afecta tanto la respuesta en las propiedades
14 físicas del suelo a la descompactación mecánica, como la perdurabilidad de la
15 práctica. La perdurabilidad de la práctica será mayor en esquemas de mayor
16 intensidad, al disminuir la susceptibilidad a la re-compactación posterior a la labor.

17 **5.2. Materiales y métodos**

18 **5.2.1. Ensayos de campo 2013-14 y 2014-15**

19 *5.2.1.1. Sitios y diseño experimental*

20 Para cumplir con el primer objetivo, se llevaron a cabo cuatro experimentos de
21 descompactación mecánica a campo en 2013-14 (año 1) y 2014-15 (año 2), en lotes de
22 producción de la Pampa Ondulada, cercanos a la localidad de Salto, provincia de Bs. As
23 (34° 17' 45" S; 60° 14' 46" O). En cada año, se preseleccionaron lotes que presentaron

1 los siguientes signos de compactación en los primeros 30 cm de suelo,
2 independientemente de su historia agrícola: niveles de resistencia a la penetración
3 superiores a 1,5 MPa (Bengough et al., 2011), y presencia de tipos estructurales masivos
4 (similares a las estructuras descritas como tipo “Δ” en De Battista et al., 1994; Sasal,
5 2012; Boizard et al., 2017), (Ver sección de Resultados 5.2.1). De esos lotes, en cada año
6 se seleccionaron dos lotes de producción contiguos diferentes, todos con más de 15 años
7 de manejo en SD, pero con historias agrícolas contrastantes: sitios con menor intensidad
8 de cultivos al año en los últimos 8 años (Sitios de predominio de monocultura de soja; SJ:
9 Soja – Soja; con índices de intensificación de 0,35 días.días⁻¹ en el sitio del año 1 y de
10 0,387 días.días⁻¹ en el sitio del año 2) y sitios de mayor intensidad de cultivos al año en
11 ese mismo período (sitios rotados, ROT: Maíz 1^a - Soja 1^a -Trigo/Soja 2^a; con índices de
12 intensificación de 0,52 días.días⁻¹ en el sitio del año 1, y de 0,48 días.días⁻¹ en el sitio del
13 año 2). El índice de intensificación de la secuencia (CI) se estimó a partir del historial
14 agrícola disponible como la proporción de días en el año con crecimiento activo de
15 cultivos (siembra-madurez fisiológica; días.días⁻¹), (Ver Sección 2.2; Capítulo 2). Se
16 contó así con cuatro sitios con signos de compactación de 0-30 cm: dos sitios diferentes
17 (SJ y ROT) en cada año. En cada uno de los sitios se estableció un experimento con dos
18 tratamientos (cuatro experimentos en total): a) el suelo compactado en su situación
19 original en el campo, que se consideró como testigo (T0), y b) el mismo suelo
20 descompactado mecánicamente mediante el pasaje de un para-till (PTILL). Las
21 diferencias en la historia agrícola (SJ y ROT) se consideraron como condiciones o
22 escenarios contrastantes donde se evaluaron los tratamientos, y no como un factor
23 adicional a los tratamientos.

24 En cada uno de los cuatro experimentos, el tamaño de cada parcela individual/
25 unidad experimental fue de 24 m x 200 m (0,48 ha), y se constituyó en un diseño en

1 bloques completos aleatorizados (DBCA) con tres repeticiones en cada sitio. La
2 descompactación se realizó el 17-7 (98 días pre-siembra de soja, en los sitios del año 1)
3 y el 21-8 (87 días pre-siembra de soja, en los sitios del año 2), usando un descompactador
4 tipo para-till APACHE 5400, con cuchillas turbo de corte delanteras, rolo posterior para
5 el sellado del suelo, y láminas descompactadoras curvas (en tándem), a una distancia de
6 corte entre láminas de aproximadamente 0,5 m, y una profundidad de trabajo de
7 aproximadamente 0,3 m. La humedad edáfica 0-0,3 m en el momento de la operación
8 mecánica fue 0,23 g agua.g suelo⁻¹ (~74 % agua útil) en promedio para los sitios del año
9 1, y de 0,18 g agua .g suelo⁻¹ (~46 % agua útil) en promedio para los sitios del año 2.

10 En todos los casos se sembró soja de 1^a, variedad ASP 4931. La siembra se realizó
11 el 23/10/2013 en los sitios y tratamientos del año 1, y el 16/11/2014 en los sitios y
12 tratamientos del año 2, debido a retrasos en las condiciones óptimas de humedad
13 superficial. Los detalles de manejo del cultivo se describen en la sección de Materiales y
14 Métodos del Capítulo 6 (sección 6.2.2.1. Sitios y diseño experimental), donde se
15 analizarán los efectos de la descompactación sobre el cultivo de soja. La secuencia de
16 cultivos posterior en los sitios de ensayo fue de maíz 1^a - soja 1^a en los tratamientos
17 compactados y descompactados en todos los casos.

18 *5.2.1.2. Determinaciones de suelo*

19 A modo de caracterización al momento previo de la descompactación, se
20 extrajeron en los sitios SJ y ROT muestras compuestas (15 submuestras) de los primeros
21 0,2 m de profundidad, las que fueron analizadas para los siguientes indicadores: carbono
22 orgánico total (COT; Walkley y Black, en Nelson y Sommers, 1982), pH (agua 1: 2,5),
23 nitrógeno total (NT; método de Kjeldahl), fósforo disponible (P; método de Bray-Kurtz
24 I), capacidad de intercambio catiónico (CIC; extracción con acetato de amonio).

1 Luego de la descompactación, 31 y 20 días antes de la siembra del cultivo de soja
2 (año 1 y 2 respectivamente) se determinaron: la tasa de infiltración básica (superficial y
3 a 0,1 m; 3 submuestras por repetición, con permeámetro de disco; Perroux y White, 1988),
4 la densidad aparente (0-0,1 m y 0,1-0,2 m; 1 muestra por repetición, con el método del
5 cilindro; Klute, 1986) y la porosidad de aireación (0-0,1m y 0,1-0,2 m; 1 muestra por
6 repetición; por curvas de retención hídrica; Danielson y Sutherland, 1986). La resistencia
7 a la penetración se registró cada 0,05 m hasta una profundidad de 0,3 m (penetrómetro
8 H4200, Humboldt Mfg. Co., Schiller Park, Illinois, USA; Carter, 1990; Guerif, 1994),
9 con 3 submuestras por repetición. Las determinaciones se realizaron entre los sitios de
10 pasaje de las púas del para-till. A su vez, siguiendo una metodología similar a la propuesta
11 por Álvarez et al. (2014), se determinó la frecuencia de aparición de tipos estructurales
12 desfavorables (estructuras laminares y masivas) en los primeros 0,2 m, y sus espesores
13 máximos y promedios, en extracciones de 0,2 x 0,2 x 0,2 m con pala plana, en tres
14 transectas de 10 puntos de muestreo. Los tipos estructurales “laminares” correspondieron
15 a aquellos con características coincidentes a la estructura de tipo “P” descrita en Boizard
16 et al. (2017), con una red de poros de orientación predominantemente horizontal. Los
17 tipos estructurales definidos como “masivos” correspondieron a bloques de más de 0,1 m
18 de diámetro máximo luego de la extracción con pala, y con características coincidentes
19 con estructuras de tipo “Δ” descritas para siembra directa por De Battista et al (1994),
20 Sasal (2012) y Boizard et al. (2017): elevada cohesión, nula a escasa porosidad visible y
21 caras de ruptura lisas de aspecto continuo.

22 En el momento de la siembra de cada ensayo (98 y 87 días después de la labor, en
23 los experimentos del año 1 y 2 respectivamente), se determinó la cobertura de rastrojo
24 por el método de la transecta (Laflen et al., 1981), con 3 submuestras por repetición, y el
25 contenido de nitrógeno como nitratos N-NO₃ (mg.kg⁻¹; 0 – 0,2; 0,2 - 0,4 y 0,4 - 0,6 m)

1 por colorimetría de ácido fenoldisulfónico (Keeney y Nelson, 1982), tomando una
2 muestra compuesta (10 piques) por repetición. Con los valores medidos de densidad
3 aparente (DAP), los resultados para cada tratamiento se expresaron en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, como la
4 suma de 0 – 0,6 m del contenido de $\text{N}\text{-NO}_3$ de cada estrato de 0,2 m:

$$5 \quad \text{N-NO}_3 (\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}) = \text{N-NO}_3 (\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) \cdot \text{DAP} (\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot 0,2 (\text{m}) \cdot 10 \quad [5.1]$$

6 Para analizar la residualidad de la práctica de descompactación, se repitieron las
7 determinaciones de resistencia a la penetración a los 12 y 24 meses sobre los sitios y
8 tratamientos del año 1, siguiendo la metodología descrita anteriormente.

9 *5.2.1.3. Análisis estadístico*

10 Se analizaron los efectos del tratamiento de descompactación (T0 vs PTILL) a
11 través de un análisis de varianza (ANOVA), modelo de efectos fijos, para diseños en
12 bloques aleatorizados. En cada experimento, se realizaron ANOVAs independientes para
13 cada sitio (SJ o ROT), considerando las diferencias en historia agrícola como condiciones
14 contrastantes donde se evaluaron los tratamientos, y no como un factor adicional, de modo
15 de evitar efectos de pseudo-replicación. En los casos en los que se analizaron variables a
16 distintas profundidades, se incluyeron la profundidad de suelo y sus interacciones como
17 factores anidados. Se analizaron las relaciones entre variables de suelo a través del
18 coeficiente de correlación de Pearson. Se utilizó el programa Infostat (Di Rienzo, 2011)
19 para realizar los ANOVA, pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y
20 matrices de correlaciones, y el software GraphPad Prism (versión 6.01) para el ajuste de
21 curvas y modelos.

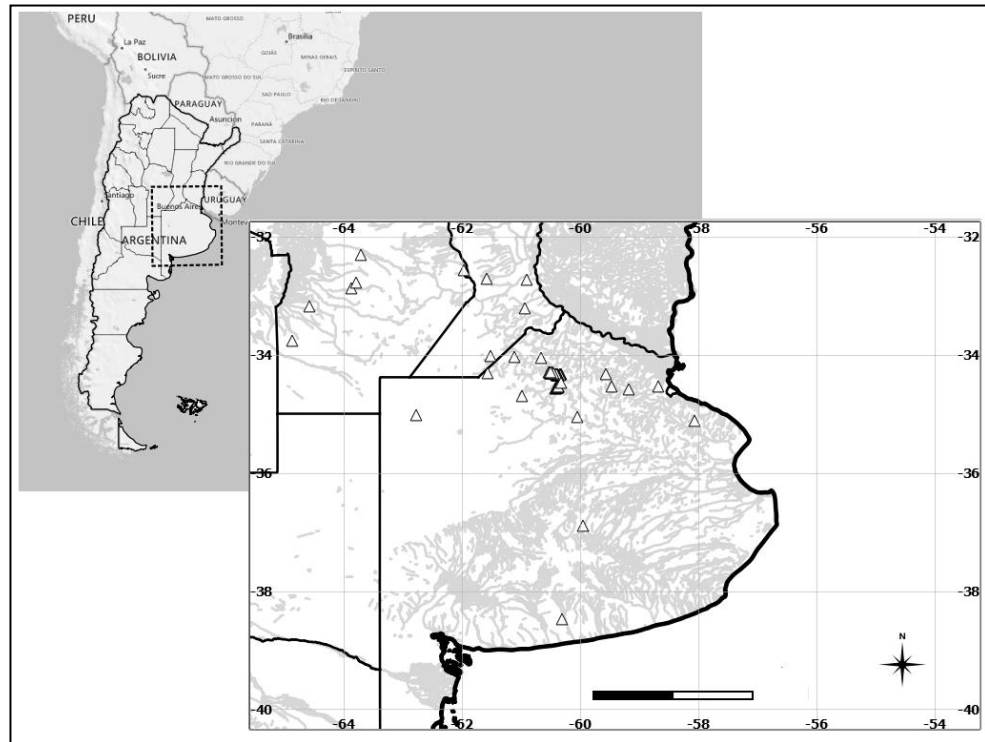
22 **5.2.2. Meta-análisis**

23 Para cumplir con los objetivos 2 y 3, se analizaron los resultados de 32 estudios
24 de campo realizados en la región pampeana, en los cuales se evaluaron los efectos

1 inmediatos y/o perdurabilidad de la descompactación mecánica sobre el suelo, publicados
2 en informes, boletines, revistas nacionales e internacionales. Siguiendo la metodología
3 propuesta por Álvarez y Steinbach (2009), la elección final de los estudios se realizó
4 teniendo en cuenta las siguientes condiciones: (1) que los tratamientos hayan recibido un
5 mismo manejo previo a la descompactación (2) que hayan sido realizados sobre suelos
6 representativos de los ambientes de la región; (3) que incluya réplicas en su diseño
7 experimental; (4) que las determinaciones edáficas posteriores (en especial las de
8 resistencia a la penetración), se hayan llevado a cabo en condiciones de humedad del
9 suelo similares entre tratamientos, y en rangos adecuados (ni extremadamente secas: i.e.
10 menos de 50% de agua útil; ni extremadamente húmedas: cercanas a saturación); (5) que
11 se informe o pueda inferirse las características superficiales de los suelos sobre los cuales
12 se realizaron los ensayos; (6) que se detalle la localización del ensayo. La precisión de la
13 ubicación de los sitios dependió del ensayo. En algunos casos se indicó la ubicación
14 georreferenciada; en otros la ubicación de la estación experimental en donde se realizaron
15 los ensayos; y en otros casos la ubicación de la localidad más cercana (en este caso se
16 asumió la ubicación dentro de un radio máximo de 25 km respecto a la localidad referida).

17 Los tratamientos de los distintos estudios se agruparon en dos: testigo sin
18 descompactar; y suelo descompactado. Este último grupo incluyó tratamientos de
19 descompactación mecánica realizados con distintos equipos: para-till, cultivie, cinceles y
20 otros escarificadores. Las características climáticas de los sitios de ensayo (temperatura
21 media anual, precipitación media anual) se estimaron en base a la serie climática histórica
22 de localidad más cercana (1980-2014). Las características edáficas superficiales (arena,
23 limo, arcilla y materia orgánica) correspondieron a las indicadas en el ensayo o en su
24 defecto a las correspondientes al perfil representativo de la serie de suelo (INTA, 2018)
25 indicada en el ensayo. Se estimó la proporción de soja (cultivo soja 1ª ó 2ª. cultivos totales

1 ¹), y el índice de intensificación de la secuencia (CI), como la proporción de días en el
 2 año con crecimiento activo de cultivos (siembra-madurez fisiológica; días.días⁻¹) a partir
 3 de la historia referida en cada ensayo, (Ver Sección 2.2; Capítulo 2). Las características
 4 de los ensayos y tratamientos considerados se resumen en el ANEXO. La Figura 5.1
 5 muestra la ubicación de las localidades de ensayo.



7 **Figura 5.1** Localización (triángulos) de los sitios de los 32 ensayos incluidos en el meta-análisis
 8 de descompactación de la región pampeana. Las líneas negras llenas indican los límites
 9 interprovinciales. Las líneas grises indican la presencia de cuerpos y cursos de agua.

10 Las determinaciones de resistencia a la penetración de los distintos ensayos
 11 relevados en el meta-análisis se realizaron *in situ* utilizando penetrómetros de punta
 12 cónica (Bradford, 1986), digitales, manuales o de impacto (Díaz-Zorita, 2000), y
 13 condiciones comparables de humedad edáfica entre tratamientos. Los resultados
 14 muestreados a distintas profundidades se integraron a 0-0,2 m con fines comparativos. La
 15 densidad aparente se realizó en todos los casos a través del método del cilindro (Blake y
 16 Hartge, 1986). Al igual que en el caso de la resistencia a la penetración, los resultados de
 17 las distintas profundidades se integraron a 0-0,2 m con fines comparativos. La infiltración

1 de agua incluyó determinaciones realizadas con permeámetros de disco (Perroux y White,
2 1988), simuladores de lluvia (Mon, 2008) o infiltrómetros de anillo simple (USDA-
3 NRCS, 1998).

4 Se analizó la información a través de la comparación de pares del mismo
5 experimento (prueba t-apareada, $P=0,05$), y gráficamente comparando los resultados de
6 los T0 sin descompactar vs. descompactados. Se estimó también la diferencia entre
7 tratamientos de acuerdo con el valor observado en el T0 para cada indicador (Álvarez y
8 Steinbach, 2009). Se analizaron las correlaciones entre la respuesta a la descompactación
9 (Δ Cambio = testigo - descompactado) en distintos indicadores y: a) las características
10 edáficas (arena, limo, arcilla, materia orgánica), b) climáticas (temperatura media anual,
11 precipitación media anual), y c) historia agrícola (Años en SD, % de soja en la rotación;
12 índice de intensificación).

13 **5.3. Resultados**

14 **5.3.1. Caracterización de los sitios: Ensayos de descompactación 2013-14 y 2014-15**

15 El Cuadro 5.1 resume los niveles de carbono orgánico total, nitrógeno total,
16 fósforo, capacidad de intercambio catiónico y pH en 0-0,2 m de los distintos sitios
17 experimentales propios de esta tesis previo a la descompactación. En todos los sitios se
18 observaron tipos estructurales laminares y masivos (Cuadro 5.2). En los sitios de SJ, se
19 observaron estructuras laminares en todos los puntos de observación, y con un espesor
20 promedio que superó los 40 mm en el sitio del año 1 y los 90 mm en el sitio del año 2.
21 En los sitios ROT, se observaron estructuras laminares en 53 a 73% de los puntos de
22 observación y con un espesor de 25 a 33 mm (sitios de año 1 y de año 2, respectivamente).
23 Se observaron tipos estructurales masivos en un 20% de los puntos de observación en los
24 sitios SJ; y en un 27 % (sitio año 1) y 13% (sitio año 2) en los sitios ROT.

1 **Cuadro 5.1** Propiedades químicas iniciales del horizonte superficial (0-0,2 m), para sitios de
 2 monocultura de soja (SJ) y rotados (ROT) de cada experimento: carbono orgánico total (COT),
 3 pH, nitrógeno total (NT), fósforo disponible (P), capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Análisis Químicos						
	Sitio	COT (%)	NT (%)	P (ppm)	CIC (cmol.kg ⁻¹)	pH
Año 1	SJ	1,74	0,17	18,3	13,3	5,7
	ROT	1,72	0,16	23,2	14,1	5,9
Año 2	SJ	1,57	0,16	23,7	13,2	5,8
	ROT	1,63	0,17	28,8	13,4	5,9

4

5 **Cuadro 5.2** Características estructurales iniciales del horizonte superficial (0-0,2 m), para sitios
 6 de monocultura de soja (SJ) y rotados (ROT) de cada experimento: Frecuencia de aparición de
 7 Estructuras laminares y masivas; espesor (E) promedio y máximos de las estructuras laminares;
 8 diámetro (Ø) promedio y máximo de las estructuras masivas. Se indica el error estándar.

Tipos estructurales							
	Sitio	Estructuras laminares			Estructuras Masivas		
		Frecuencia (%)	E. Medio (mm)	E. Máximo (mm)	Frecuencia (%)	Ø medio (mm)	Ø Máximo (mm)
Año 1	SJ	100 ± 0	41 ± 2,6	63 ± 8,8	20 ± 11,5	145 ± 15	143 ± 12
	ROT	73 ± 13	25 ± 2,8	50 ± 5,8	27 ± 6,7	130 ± 10	137 ± 8,8
Año 2	SJ	100 ± 0	92 ± 17,4	123 ± 14,5	20 ± 11	120 ± 10	125 ± 5,0
	ROT	53 ± 13	33 ± 4,4	43 ± 6,7	13,3 ± 13	140 ± 5,0	150 ± 0,0

9

10

11 5.3.2. Cambios en las propiedades edáficas asociados a la descompactación

12 5.3.2.1. Ensayos de descompactación 2013-14 y 2014-15.

13 La descompactación mecánica con para-till redujo los niveles de cobertura de
 14 rastrojo, lo que se observó aun habiéndose utilizado cuchillas de corte vertical para evitar
 15 el arrastre de residuos. En el año 1, la proporción de suelo cubierto con residuos se redujo
 16 un 22% en el sitio SJ (P<0,05) y un 12% en el sitio ROT (P<0,01), (Cuadro. 5.3). En el
 17 año 2, la descompactación redujo un 21% la cobertura de rastrojo en el sitio SJ (P<0,01),

1 mientras que en el sitio ROT, las diferencias no resultaron significativas. Ni en ROT ni
 2 en SJ se advirtieron efectos de la descompactación en los niveles de nitrógeno (N-NO₃) a
 3 la siembra del cultivo hasta los 0,6 m.

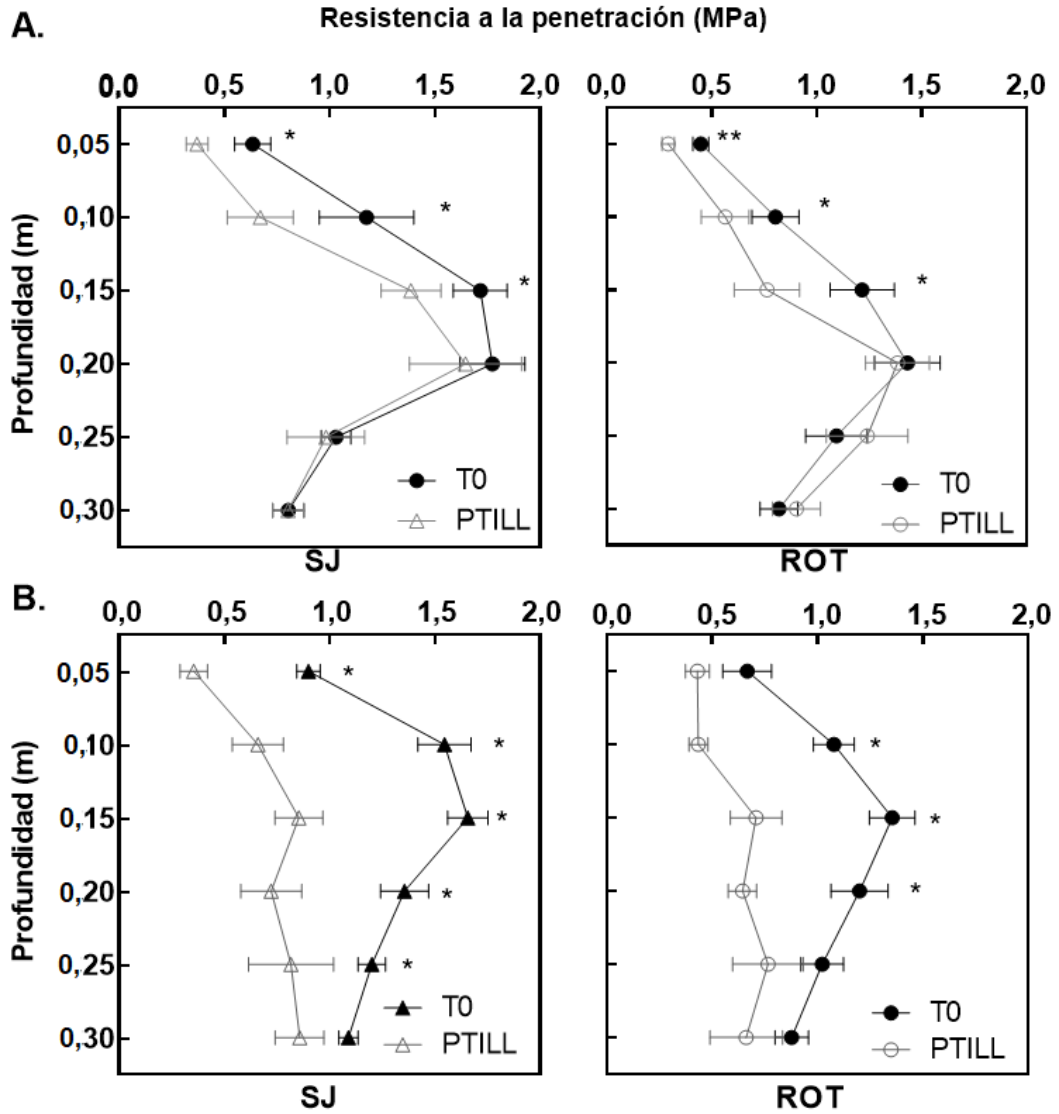
4 **Cuadro 5.3** Cobertura de rastrojo y contenido de nitrógeno como nitratos de 0-0,6 m (kg.ha⁻¹, a
 5 la siembra de soja, para los tratamientos testigo (T0) y descompactado con para-till (PTILL), en
 6 sitios con historia agrícola contrastante: sitios de monocultura de soja (SJ) y sitios rotados (ROT).
 7 Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos dentro de un
 8 mismo sitio y año (* P ≤ 0,05; ** P ≤ 0,01; y ns = no significativa considerando α=0,05). Se indica
 9 el error estándar.

	Sitio	Tratamiento	Cobertura de rastrojo (%)		N-Nitratos (kg.ha ⁻¹)	
Año 1	SJ	T0	82,7 ± 3,5	*	103,2 ± 19,2	ns
		PTILL	55,5 ± 3,4		104,4 ± 17,7	
	ROT	T0	88,3 ± 3,2	**	103,2 ± 19,2	ns
		PTILL	76,1 ± 3,6		94,5 ± 21,3	
Año 2	SJ	T0	68,8 ± 3,5	**	86,3 ± 20,2	ns
		PTILL	47,7 ± 5,2		96,5 ± 19,3	
	ROT	T0	80,0 ± 5,5	ns	86,3 ± 20,	ns
		PTILL	65,1 ± 5,2		105,2 ± 23,7	

10

11 En el año 1, la descompactación redujo significativamente la resistencia a la
 12 penetración entre los 0,05 y 0,15 m, tanto en el sitio SJ como en el sitio ROT (Fig. 5.2
 13 A). Los cambios en la resistencia penetración al pasar el para-till fueron mayores en los
 14 primeros 0,15 m (46 % en SJ y 39 % en ROT). Más allá de estas profundidades, no se
 15 observaron diferencias significativas entre tratamientos, ni en SJ ni en ROT. En el
 16 segundo año (Fig. 5.2 B), la descompactación redujo significativamente la resistencia a
 17 la penetración hasta los 0,25 m en el sitio de SJ (P<0,05), y entre los 0,1 y 0,2 m en ROT
 18 (P<0,05). Al igual que en el año anterior, las mayores reducciones en la RP se observaron
 19 a los 0,15 m: 51 % en SJ y 48 % en ROT. En el momento del muestreo no se observaron
 20 diferencias significativas en los niveles de humedad edáfica (0-0,2 m y 0,2-0,4 m) entre
 21 tratamientos, que pudieran estar influenciando los valores de RP u otros parámetros

- 1 edáficos ($P > 0,1$, con valores de humedad promedio de ~88 % de agua útil en el año 1, y
- 2 ~ 96 % de agua útil en el año 2).



3

4 **Figura 5.2** Perfil de resistencia a la penetración cada 0,05 m hasta los 0,3 m (± 1 error estándar),

5 en los experimentos de campo de esta tesis (A -arriba- experimentos del año 1: 2013/14; y B –

6 abajo- experimentos del año 2: 2014/15), para los tratamientos testigo (T0) y descompactado con

7 para-till (PTILL), en sitios con historia agrícola contrastante: sitios de monocultura de soja (SJ,

8 izquierda) y sitios rotados (ROT, derecha). Los asteriscos indican diferencias estadísticas

9 significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio y profundidad (* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$).

10 Otros parámetros como la densidad aparente, la porosidad de aireación y la

11 infiltración de agua mostraron una tendencia menos clara que la resistencia a la

12 penetración (Cuadro 5.4). En el primer año, la descompactación mecánica redujo 18% la

13 densidad aparente a nivel superficial ($P < 0,001$) y 5% a nivel subsuperficial ($P < 0,01$) en

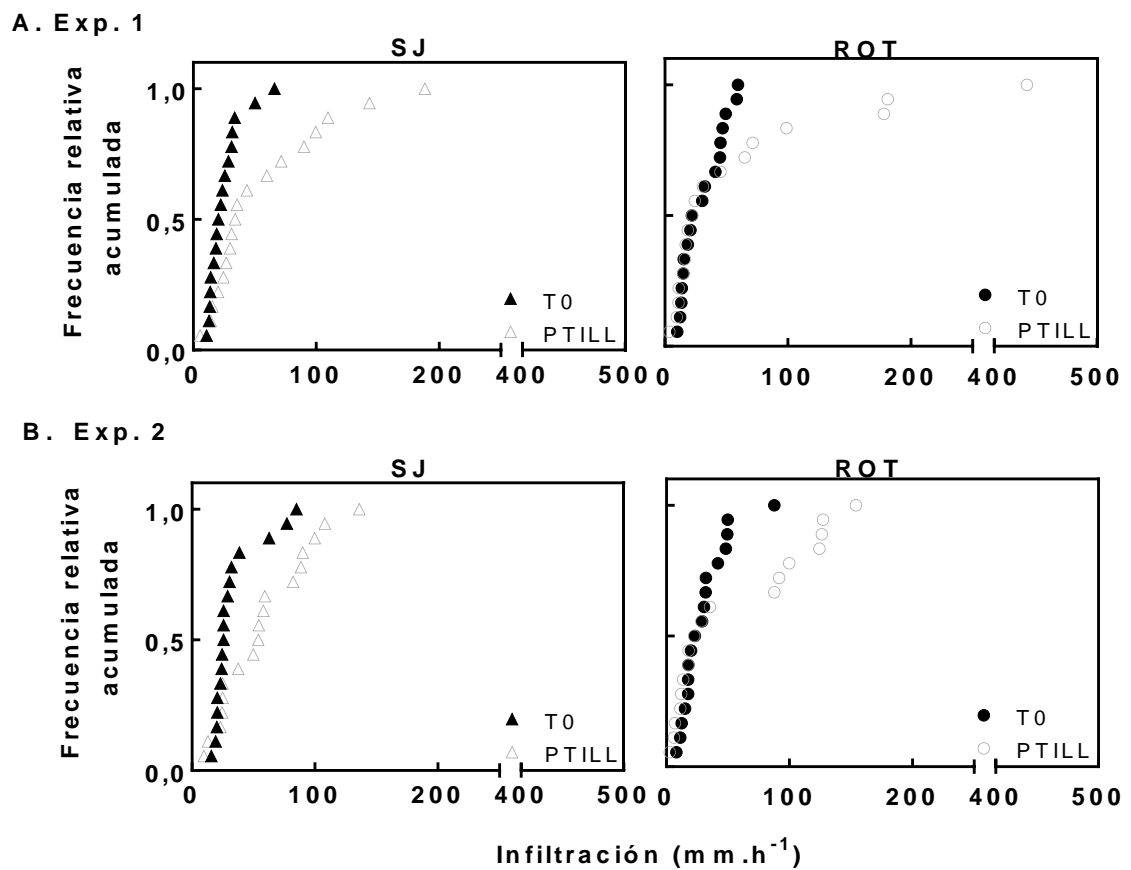
1 el sitio de SJ; y 4% a nivel subsuperficial en ROT ($P < 0,05$). La porosidad de aireación se
2 incrementó significativamente al pasar el PTILL, en el estrato subsuperficial en SJ
3 ($P < 0,05$), y en el estrato superficial en ROT ($P < 0,01$). No se observaron diferencias
4 significativas entre tratamientos en las tasas de infiltración ($P > 0,1$). En el segundo año,
5 se observaron cambios significativos únicamente en la densidad aparente de los primeros
6 0,1 m en SJ (disminución del 14%, $P < 0,05$), a pesar de haberse registrado cambios en la
7 resistencia a la penetración hasta los 0,2-0,25 m cm en los distintos sitios (Fig.5.2). La
8 porosidad de aireación y la infiltración no mostraron cambios significativos asociados a
9 la descompactación en este segundo ensayo ($P > 0,1$).

10

Cuadro 5.4. Densidad aparente, porosidad de aireación e infiltración (± 1 error estándar), muestreados en el estrato superficial (0-0,1 m) y subsuperficial (0,1-0,2 m) del suelo, para los tratamientos testigo (T0) y descompactado con para-till (PTILL), en sitios con historia agrícola contrastante: menor intensidad de cultivos (SJ) y mayor intensidad de cultivos (ROT); en el año 1 y año 2. Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos dentro de un mismo año, sitio, y profundidad (* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$, y ns = no significativa considerando $\alpha=0,05$).

	Sitio	Tratamiento	Densidad aparente		Porosidad de aireación				Infiltración de agua	
			$Mg.m^{-3}$		$m^3.m^{-3}$				$mm.h^{-1}$	
			0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m
Año 1	SJ	T0	1,32 \pm 0,06	1,45 \pm 0,03	0,08 \pm 0,01	0,06 \pm 0,006	31,7 \pm 5,7	23,1 \pm 2,17		
		PTILL	1,08 \pm 0,06	1,38 \pm 0,10	0,12 \pm 0,03	0,10 \pm 0,02	75,7 \pm 17,5	37,7 \pm 6,4	***	**
	ROT	T0	1,25 \pm 0,07	1,41 \pm 0,05	0,11 \pm 0,01	0,07 \pm 0,01	45,3 \pm 3,3	24,1 \pm 3,8		
		PTILL	1,20 \pm 0,06	1,35 \pm 0,07	0,19 \pm 0,02	0,11 \pm 0,02	117,1 \pm 44	38,5 \pm 16,5	ns	*
Año 2	SJ	T0	1,22 \pm 0,04	1,35 \pm 0,06	0,15 \pm 0,02	0,07 \pm 0,020	43,5 \pm 8,1	18,5 \pm 5,8		
		PTILL	1,05 \pm 0,05	1,30 \pm 0,08	0,19 \pm 0,03	0,09 \pm 0,02	80,5 \pm 11,7	40,1 \pm 14,3	*	ns
	ROT	T0	1,21 \pm 0,07	1,35 \pm 0,06	0,15 \pm 0,02	0,08 \pm 0,02	36,3 \pm 8,8	15,6 \pm 1,3		
		PTILL	1,20 \pm 0,09	1,34 \pm 0,06	0,14 \pm 0,02	0,09 \pm 0,03	70,9 \pm 17,7	21,8 \pm 6,8	ns	ns

1 La infiltración fue el parámetro que mostró mayor variabilidad. Si bien la prueba
 2 de homogeneidad de varianzas (prueba de Levene) no indicó diferencias significativas en
 3 las varianzas entre tratamientos, esta variabilidad resultó especialmente marcada en los
 4 tratamientos descompactados (Fig. 5.3). Aunque no se registraron diferencias
 5 significativas entre T0 y PTILL ($P>0.1$), se observaron con mayor frecuencia valores de
 6 infiltración elevados en los tratamientos descompactados: tanto en SJ como en ROT, al
 7 descompactar se observaron (al menos un 20% de los muestreos) tasas de infiltración
 8 superiores a los 100 mm.h⁻¹, que no se registraron en los T0 (Fig. 5.3 A y B)



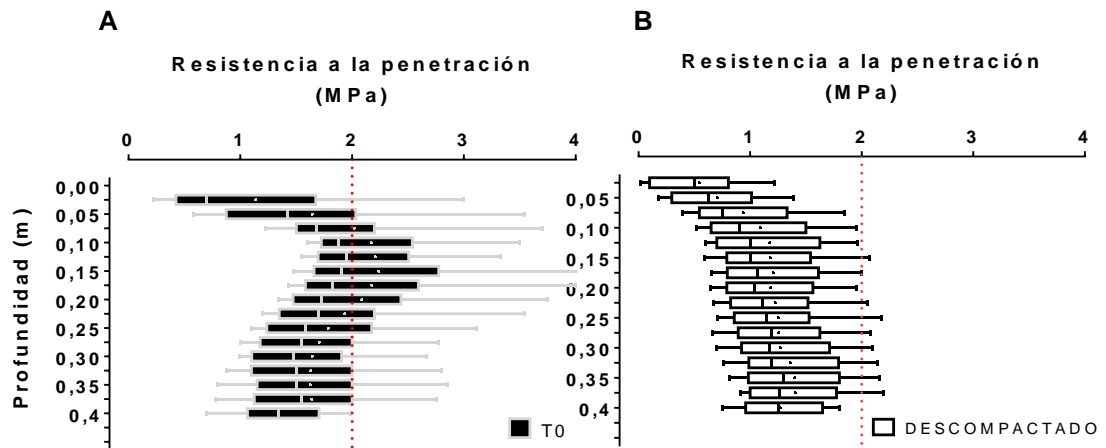
9
 10 **Figura 5.3** Frecuencias acumuladas en los valores observados de infiltración (0-10 y 10-20 cm)
 11 en experimentos del año 1 (A -arriba- 2013/14) y del año 2 (B -abajo- 2014/15), para los
 12 tratamientos testigo (T0) y descompactado con para-till (PTILL), en sitios con historia agrícola
 13 contrastante: monocultura de soja (SJ, izquierda) y sitios rotados (ROT, derecha).

14

15

1 5.3.2.2. *Meta-análisis: Cambios físicos asociados a la descompactación en otros*
 2 *ensayos de la Región*

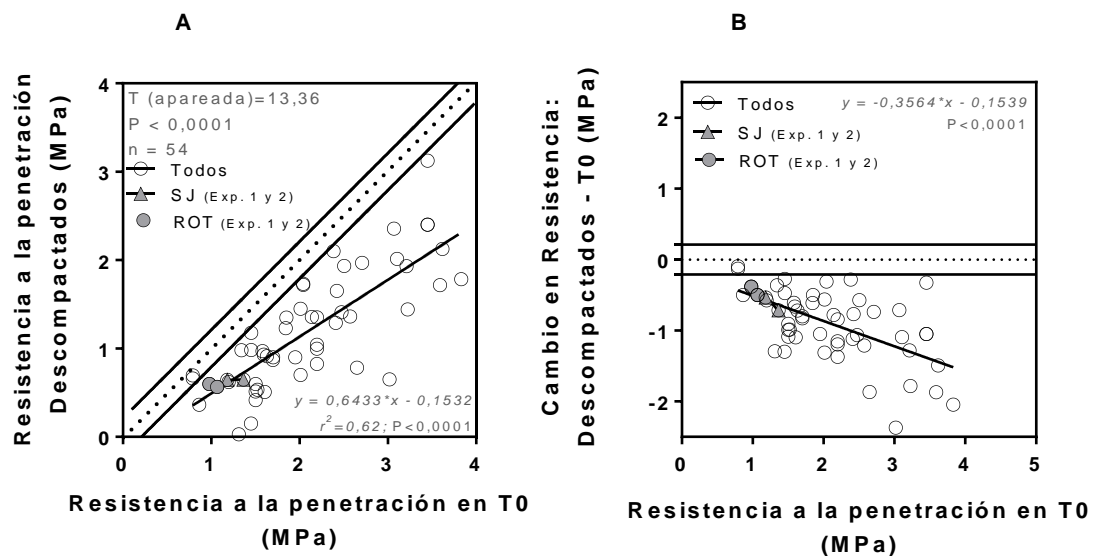
3 Al igual que en los ensayos propios de esta tesis, los suelos en SD de los casos
 4 analizados a nivel regional mostraron signos de compactación subsuperficial, con valores
 5 crecientes de resistencia a la penetración desde superficie, valores máximos entre los 0,1
 6 y los 0,2 m, y valores nuevamente decrecientes más allá de los 0,25 m. Los niveles de
 7 resistencia a la penetración en los estratos más compactados superaron en promedio el
 8 umbral de 1,5-2 MPa mencionado por Bengough et al. (2011), (Fig. 5.4 A). La
 9 descompactación mecánica (Fig.5.4 B) redujo la resistencia a la penetración en los
 10 distintos estratos respecto a los T0, especialmente en los primeros 0,3 m, y en cerca del
 11 90% de las determinaciones los valores no superaron los 2 MPa.



12 **Figura 5.4** Perfil de resistencia a la penetración (cada 0,025 m hasta 0,45 m de profundidad), en
 13 tratamientos T0 sin descompactar (A) y descompactados mecánicamente (B). Datos extraídos de
 14 32 trabajos publicados para la región pampeana. Las barras de las cajas indican los percentiles
 15 P10 y P90; y lo puntos el promedio de cada profundidad. La línea punteada indica el umbral de 2
 16 MPa (Bengough et al., 2011).
 17

18
 19 Los suelos descompactados presentaron en promedio una resistencia a la
 20 penetración (promedio 0-0,2 m) un 47% menor ($P < 0,0001$) que los suelos sin
 21 descompactar (Δ testigo - descompactados = 0,86 MPa), con reducciones de hasta 89%;
 22 $\Delta = 2,37$ MPa). La resistencia a la penetración se redujo como producto de la

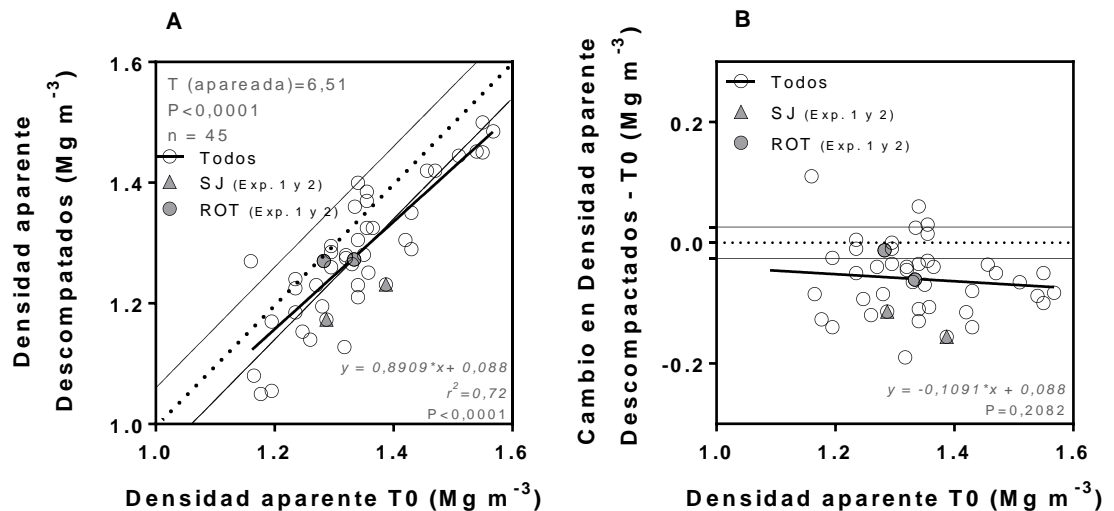
1 descompactación prácticamente en todos los experimentos y estudios analizados (Fig. 5.5
 2 A). Únicamente un 8% de los casos no superaron la diferencia mínima significativa
 3 ($P=0,05$). Las diferencias entre tratamientos variaron de acuerdo con los niveles de
 4 resistencia a la penetración de los suelos ($P<0,0001$): en suelos con impedancias
 5 mecánicas más marcadas, las reducciones en la resistencia asociadas a la
 6 descompactación resultaron mayores (Fig. 5.5 B).



7
 8 **Figura 5.5 (A):** Meta-análisis: Relación entre la resistencia a la penetración (promedio 0-0,2 m)
 9 en los T0 sin descompactar y en los tratamientos descompactados mecánicamente. La línea
 10 punteada indica la relación 1:1, las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa entre
 11 tratamientos (\pm DMS; $P=0,05$). **(B):** Cambio en la resistencia a la penetración (Descompactados –
 12 T0) en relación al nivel de resistencia a la penetración del T0. La línea punteada indica la ausencia
 13 de cambios entre tratamientos ($\Delta=0$) y las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa
 14 entre tratamientos (\pm DMS; $P=0,05$). Los símbolos llenos indican los resultados de los ensayos de
 15 campo de este capítulo (SJ y ROT).

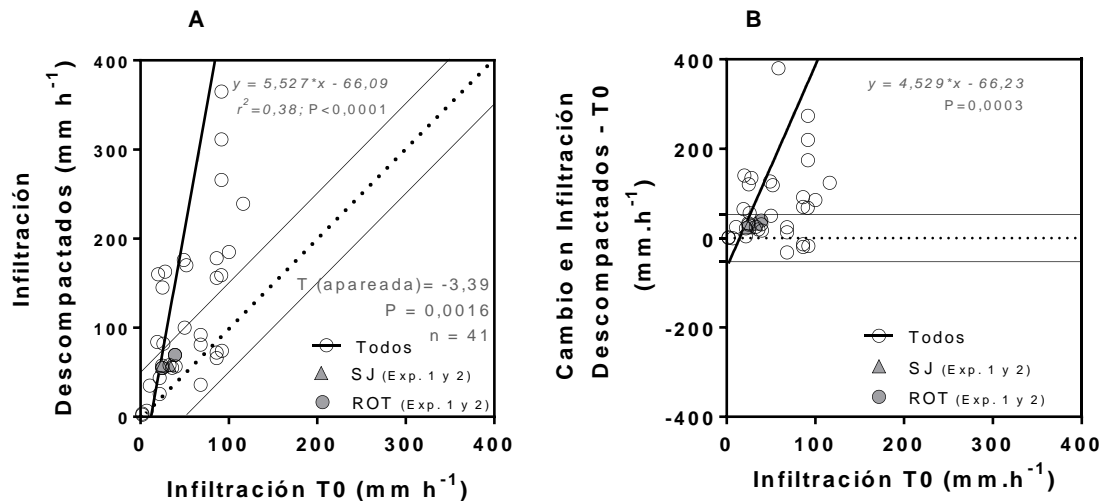
16 La densidad aparente promedio de los primeros 0,2 m resultó significativamente
 17 menor al descompactar mecánicamente ($P<0,0001$). En promedio, la descompactación
 18 generó una reducción de la densidad del suelo cercana al 4.7% (Δ testigo –
 19 descompactado = $0,06 \text{ Mg.m}^{-3}$), aunque se observaron reducciones de hasta un 15% (Δ =
 20 $0,19 \text{ Mg.m}^{-3}$; Fig. 5.6 B). En un 86% de los casos analizados, los suelos descompactados
 21 presentaron valores de densidad aparente menores a los testigos (Fig.5.6 A), y en un 61%
 22 de los casos la reducción resultó superior a la diferencia mínima estimada ($P=0,05$). Los

1 cambios fueron menos pronunciados que en el caso de la resistencia a la penetración. No
 2 se observó una tendencia clara entre la magnitud de los cambios y el nivel de densidad
 3 aparente de los suelos ($P=0,20$; Fig. 5.6 B). Sin embargo, las mayores reducciones en este
 4 indicador se observaron entre 1,3-1,4 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$; más allá de estos valores, las diferencias
 5 entre tratamientos compactados y descompactados resultaron menores.



6
 7 **Figura 5.6 (A):** Meta-análisis: Relación entre la densidad aparente (promedio 0-0,2 m) en los T0
 8 sin descompactar y en los tratamientos descompactados mecánicamente. La línea punteada indica
 9 la relación 1:1, las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa entre tratamientos
 10 ($\pm\text{DMS}$; $P=0,05$). **(B):** Cambio en la densidad aparente (Descompactados – T0) en relación al
 11 nivel de densidad aparente del T0. La línea punteada indica la ausencia de cambios entre
 12 tratamientos ($\Delta=0$) y las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa entre tratamientos
 13 ($\pm\text{DMS}$; $P=0,05$). Se indican las ecuaciones de ajuste, los coeficientes de ajuste, y la significancia
 14 de la relación. Los símbolos llenos indican los resultados de los ensayos de campo de este capítulo
 15 (SJ y ROT).

16 La infiltración superficial de agua en suelos descompactados se incrementó
 17 significativamente ($P < 0,0001$) con respecto a los testigos no compactados (Fig. 5.7 A).
 18 Un 93% de los casos analizados mostraron valores mayores al T0 en este parámetro al
 19 descompactar, y cerca de un 65% de los casos mostraron incrementos mayores a la
 20 diferencia mínima significativa ($P=0,05$). Las diferencias tendieron a incrementarse en
 21 situaciones con altas tasas de infiltración ($P=0,045$; Fig. 5.7 B), pero al igual que en el
 22 caso de la densidad aparente, estas tendencias resultaron menos claras que en la
 23 resistencia a la penetración ($r^2 = 0,19$).



1
 2 **Figura 5.7 (A):** Meta-análisis: Relación entre infiltración superficial de agua en los T0 sin
 3 descompactar y en los tratamientos descompactados mecánicamente. La línea punteada indica la
 4 relación 1:1, las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa entre tratamientos
 5 ($\pm\text{DMS}$; $P=0,05$). **(B):** Cambio en la infiltración (Descompactados – T0) en relación al nivel de
 6 infiltración del T0. La línea punteada indica la ausencia de cambios entre tratamientos ($\Delta=0$) y
 7 las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa entre tratamientos ($\pm\text{DMS}$; $P=0,05$).
 8 Se indican las ecuaciones de ajuste, los coeficientes de ajuste, y la significancia de la relación.
 9 Los símbolos llenos indican los resultados de los ensayos de campo de este capítulo (SJ y ROT).

10 Las diferencias en resistencia a la penetración entre tratamientos compactados y
 11 descompactados estuvieron significativamente relacionadas al contenido de arena, arcilla
 12 y materia orgánica (Cuadro 5.5). Los cambios en la dureza del suelo al descompactar,
 13 indicados por este parámetro, fueron crecientes en suelos con mayores contenidos de
 14 arena, y decrecientes en suelos con mayores contenidos de arcilla y/o mayores contenidos
 15 de materia orgánica. Las mayores diferencias por descompactar se observaron en
 16 situaciones con una historia de mayor proporción de barbecho y menor tiempo de
 17 ocupación (índice de intensificación más bajo). El cambio en la resistencia del suelo al
 18 descompactar fue decreciente en suelos con mayor intensificación. Esta tendencia fue
 19 coincidente con los valores observados de resistencia a la penetración en los testigos: se
 20 observaron mayores niveles de resistencia inicial asociados a mayores niveles de arena,
 21 mayores niveles de limo y menores niveles de arcilla. Los cambios en otros indicadores
 22 como la densidad aparente o infiltración no mostraron una asociación significativa con
 23 ninguna de las variables analizadas.

1

2 **Cuadro 5.5** Correlación entre los niveles de resistencia a la penetración (RP), densidad aparente
 3 (DAP) e infiltración (INF) en los tratamientos testigo (T0), y en los cambios en estos indicadores
 4 (Δ testigo - descompactados), y los parámetros de suelo, clima e historia agrícola, de todos los
 5 ensayos incluidos en el meta-análisis Los valores indican los coeficientes de correlación de
 6 Pearson y los asteriscos indican la significancia de la relación (* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq$
 7 0,001, y ns = no significativa a $\alpha = 0,05$).

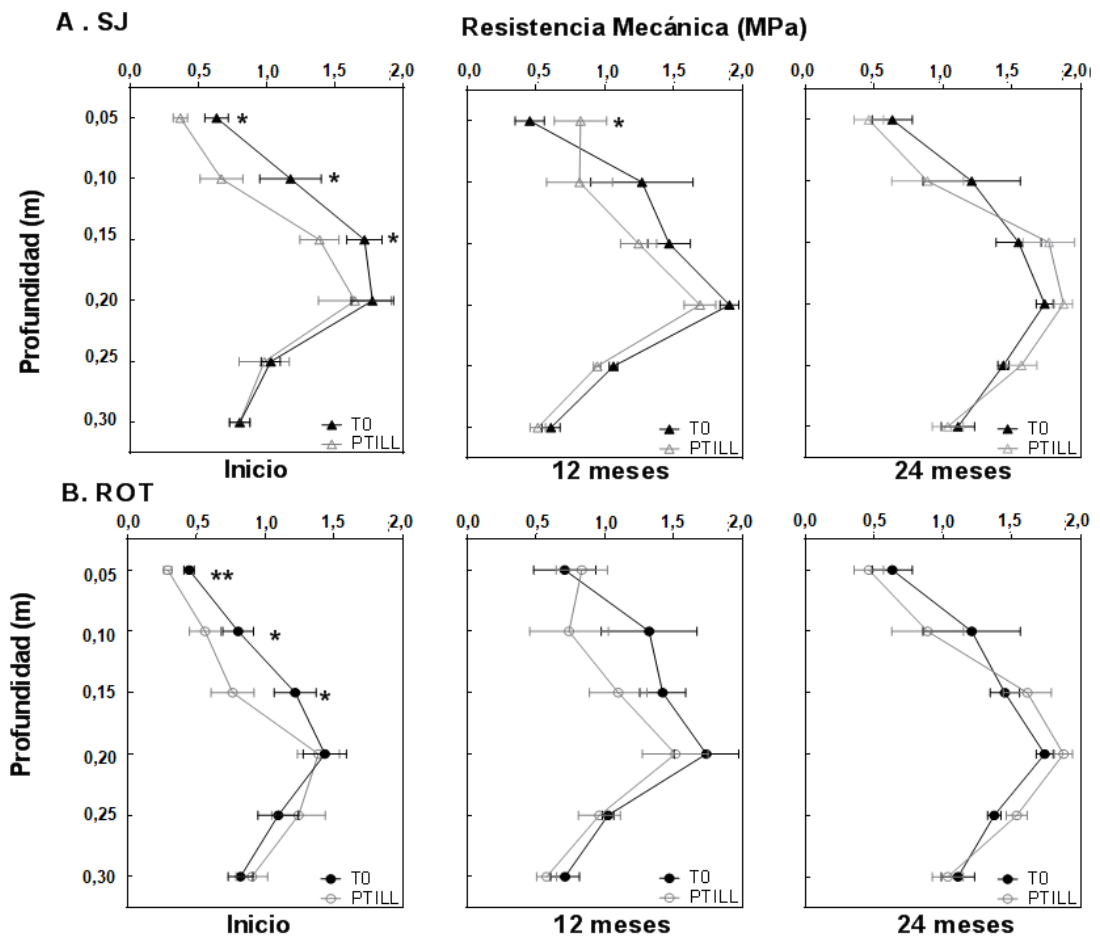
	Parámetro	RP T0	Δ RP	DAP T0	Δ DAP	INF T0	Δ INF
Suelo	% Arena	0.43***	0,47**	0.71***	0,04 ns	-0.23 ns	-0,16 ns
	% Arcilla	-0.54***	-0,59***	-0.65***	-0,22 ns	0.20 ns	0,15 ns
	% Limo	-0.33**	-0,33 ns	0.55***	0,04 ns	0.22 ns	0,15 ns
	% Materia orgánica	-0.22 ns	-0,44**	0.14 ns	-0,32 ns	-0.01 ns	0,05 ns
Clima	Lluvia Anual	0.11 ns	-0,25 ns	0.16 ns	-0,13 ns	0.04 ns	0,18 ns
	Temperatura media anual	0.22 ns	0,21 ns	0.25 ns	0,3 ns	0.21 ns	0,23 ns
Historia Agrícola	Años en SD	-0.08 ns	0,02 ns	-0.42 *	-0,27 ns	0.50**	-0,06 ns
	% Soja en la rotación	-0.16 ns	-0,01 ns	0.30 ns	-0,26 ns	0.28 ns	-0,25 ns
	Índice de intensidad de cultivos	-0.25 ns	-0,46**	0.35 ns	-0,07 ns	0.10 ns	0,25 ns

8

9 5.3.3. Perdurabilidad de la descompactación

10 5.3.3.1. Ensayos de campo 2013-14 y 2014-15

11 En los ensayos propios de esta tesis, las diferencias en la resistencia del suelo
 12 generadas por la descompactación mecánica fueron reduciéndose en campañas sucesivas.
 13 Luego de aproximadamente 12 meses no se advirtieron diferencias significativas entre
 14 tratamientos compactados y descompactados, ni en SJ ni en ROT (Fig. 5.8). Se
 15 observaron incluso valores más elevados de resistencia a la penetración en los primeros
 16 5 cm a los 12 meses de pasar el para-till, en SJ.



1

2 **Figura 5.8** Perfiles de resistencia a la penetración (± 1 error estándar) hasta los 0,3 m, al mes
 3 (Inicio), a los 12 meses y a los 24 meses de la descompactación, para los tratamientos testigo (T0)
 4 y descompactado con para-till (PTILL), en sitios de monocultura de soja (A: SJ) y rotados (B:
 5 ROT). Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos de descompactación
 6 dentro de un mismo sitio y profundidad (* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$).

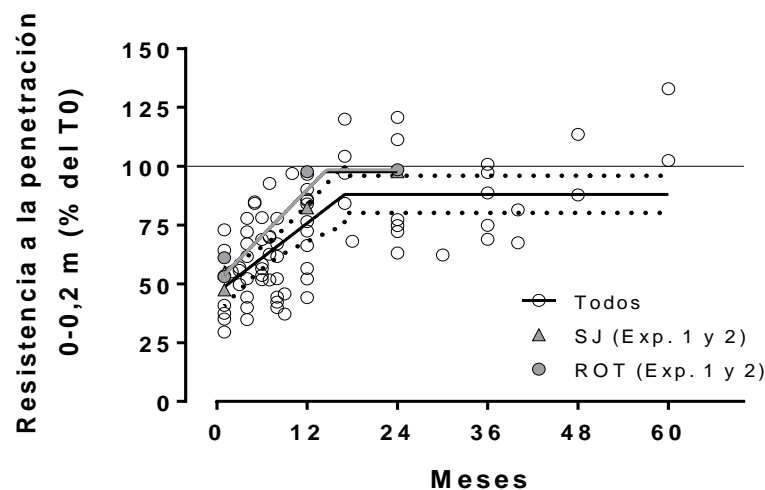
7

8 5.3.3.2. Perdurabilidad de la descompactación: Meta-análisis.

9 La resistencia a la penetración fue un indicador común que mostró sensibilidad en
 10 los distintos ensayos que analizaron la perdurabilidad de la descompactación, por lo que
 11 el análisis se limitó a esta determinación. En el promedio de los casos analizados, la
 12 descompactación redujo inicialmente la resistencia a la penetración cerca de un 50%
 13 respecto del valor observado en los T0 (Fig. 5.9). Las diferencias entre suelos
 14 descompactados y T0 se acotaron luego de la primera campaña de cultivo. A 12 meses de
 15 realizada la labor, los suelos descompactados mostraron en el promedio de las situaciones,
 16 niveles de resistencia a la penetración un 25% menores que la de los T0, Alrededor de los

1 18 meses desde la labor (Fig. 5.11; $r^2 = 0,42$; $y=46,26 + 2,455 x$, si $x < 18$; $y = 89,3$ si $x \geq 18$),
 2 los suelos descompactados presentaron valores de resistencia un 15% menores a los
 3 testigos. Los intervalos de confianza de la regresión (IC = 95%, líneas punteadas) indican
 4 incluso que, a partir de este periodo, pueden alcanzarse en promedio niveles de dureza
 5 del suelo similares a los T0 (100%). Más aún, algunos ensayos mostraron incrementos en
 6 la resistencia a la penetración respecto de los T0 luego en campañas sucesivas.

7 Al comparar los ajustes de los datos de los experimentos propios de esta tesis
 8 (círculos y triángulos llenos de la Figura 5.9) a través de funciones lineales segmentadas
 9 como la mencionada anteriormente, no se advirtieron diferencias significativas asociadas
 10 a la intensidad de cultivos y diversidad de la rotación (SJ vs ROT) en cuanto a la evolución
 11 de la resistencia a la penetración luego de la labor. Tanto la pendiente como la
 12 intercepción de la función lineal segmentada no difirieron significativamente entre SJ y
 13 ROT ($P=0,28$) y ajustaron a una única función lineal segmentada ($r^2 = 0,93$; $y=50,77$
 14 $+3,26 x$, si $x < 15$; $y = 96,6$ si $x \geq 15$).



15

16 **Figura 5.9** Meta-análisis y ensayos propios: evolución temporal de la resistencia a la penetración
 17 de suelos descompactados respecto a los valores observados en los T0 sin descompactar. La línea
 18 negra muestra el ajuste de todos los datos por regresión lineal segmentada ($y=46,26 + 2,455 x$, si
 19 $x < 18$; $y = 89,3$ si $x \geq 18$; $r^2 = 0,42$). Las líneas punteadas muestran el intervalo de confianza de la
 20 estimación (IC = 95%). Los símbolos llenos indican los resultados de los ensayos de campo de
 21 este capítulo (SJ y ROT), y la línea gris muestra el ajuste de los datos propios de los experimentos
 22 de esta tesis por regresión lineal segmentada ($y=50,77 + 3,26 x$, si $x < 15$; $y = 96,6$ si $x \geq 15$; $r^2 =$
 23 $0,93$).

1

2 **5.4. Discusión**

3 **5.4.1. Cambios en las propiedades físicas asociados a la descompactación**

4 Pese a los contrastes en el estado de la estructura (Cuadro 5.2) o de la cobertura
5 de rastrojo (Cuadro 5.3) entre los sitios rotados y de monocultura de los experimentos
6 propios de este capítulo, en todos los casos se observaron síntomas de densificación
7 subsuperficial del suelo, con niveles de resistencia a la penetración crecientes desde los
8 estratos superficiales, y máximos alrededor de los 0,15-0,20 m (Fig. 5.2 A y B). Este
9 perfil de resistencia a la penetración se correspondió con los resultados del meta-análisis
10 (Fig. 5.4): bajo diversos sistemas de rotaciones, se observa el desarrollo de estratos
11 densificados o compactados entre los 0,1 y los 0,2 m de profundidad. Este patrón es
12 coincidente con lo observado por Sivarajan et al. (2018) para suelos francos y franco
13 arenosos finos en SD de EEUU. Estos autores han descrito un patrón recurrente en el
14 perfil de resistencia en suelos bajo SD, con una zona con forma de “nariz” (*nose zone* en
15 inglés) que presenta picos máximos de resistencia a la penetración cercanos a los 1,5-2
16 MPa entre los 0,10-0,16 m. En el promedio de los casos de nuestros análisis, los valores
17 de resistencia a la penetración superaron estos valores, e incluso superaron el umbral
18 crítico de 2 MPa propuesto por Bengough et al. (2011) para el crecimiento de raíces. En
19 más del 25% de los casos del meta-análisis, los valores superaron a los umbrales de 2,5
20 MPa propuestos por otros autores (Håkansson y Lipiec, 2000; Hamza y Anderson, 2005).

21 Algunas revisiones previas (Álvarez y Steinbach, 2009) han sugerido que los
22 niveles de resistencia a la penetración observados en los planteos de siembra directa de la
23 región pampeana se encuentran por debajo de los umbrales críticos. Sin embargo, esos
24 análisis se han centrado en el promedio de las observaciones de 0-0,2 m, lo cual puede
25 conducir a minimizar los valores de resistencia observados. El análisis del perfil de

1 resistencia en profundidad de los distintos trabajos analizado en nuestro análisis permite
2 identificar que a nivel subsuperficial (entre los 0,1 y los 0,2 m), los valores umbrales
3 pueden ser ampliamente superados, independientemente de la rotación. La información
4 analizada muestra además que pueden encontrarse incrementos en la resistencia a la
5 penetración más allá incluso de los 0,2 m. El análisis de los niveles de resistencia de los
6 suelos en SD debería, por lo tanto, no sólo analizar los valores promedio en el perfil de
7 suelo, sino también los picos de resistencia, y la profundidad a la que se obtienen. Esto
8 permitirá un adecuado diagnóstico y detectar o descartar posibles problemas de
9 compactación, en especial a nivel subsuperficial.

10 Distintos autores han remarcado los riesgos que conlleva la compactación cuando
11 se genera a nivel subsuperficial, dada su persistencia y la dificultad para aliviarla o
12 corregirla (Alakukku et al., 2003; Chamen et al., 2003; Hamza y Anderson, 2005; Spoor,
13 2006; Botta et al., 2006a; Batey, 2009). Los experimentos propios y los resultados del
14 meta-análisis corroboraron la primera hipótesis (hipótesis a), y mostraron que la
15 descompactación mecánica a través del uso de subsoladores es capaz de remover en el
16 corto plazo las impedancias mecánicas subsuperficiales observadas, disminuyendo los
17 niveles de resistencia a la penetración por debajo de niveles críticos. De acuerdo a lo
18 esperado (hipótesis b.1), la magnitud de estos cambios resulta mayor cuanto más elevados
19 son los niveles de resistencia a la penetración iniciales, como muestra la Figura 5.5 (que
20 incluye resultados propios y del meta-análisis).

21 La ubicación de los picos de resistencia entre 0,10-0,15 m en los suelos analizados
22 en SD de esta tesis contrastan con la compactación subsuperficial analizada por otros
23 autores en otros sistemas productivos (p.ej. producción forestal, o sistemas agrícolas en
24 labranza convencional con elevada frecuencia de tránsito, con suelos que exhibieron
25 valores restrictivos de resistencia a la penetración a 0,40 m o más de profundidad, y con

1 un espesor superior a los 0,2 m; p.ej. Alakukku et al. 2003; Chamen et al., 2003; Hamza
2 y Anderson, 2005). Esta diferencia en ubicación y espesor podría explicar la efectividad
3 de la descompactación en el corto plazo para remover impedancias mecánicas
4 subsuperficiales en los estudios de esta tesis, a diferencia de lo observado por estos
5 autores.

6 Los resultados de esta tesis permitieron avanzar en el entendimiento de los
7 factores que regulan la respuesta a la descompactación mecánica, que hasta ahora habían
8 sido poco estudiados. El meta-análisis mostró que en estos suelos caracterizados de por
9 sí por su fragilidad y baja resiliencia (Taboada et al. 2008; Álvarez et al., 2012), las
10 respuestas a la descompactación son mayores en suelos con mayor contenido de arena,
11 menos contenido de arcilla, y menos contenido de materia orgánica (Cuadro 5.5). Estos
12 fueron los suelos que a su vez presentaron valores de resistencia a la penetración más
13 elevados en los T0 (sin descompactar). Los resultados de los efectos de la textura sobre
14 la respuesta a la descompactación pueden asociarse a los análisis de Chamen et al. (2015).
15 De acuerdo con estos autores, en suelos con elevados contenidos de arcilla, y mayor
16 capacidad de expansión-contracción, el incremento en la resistencia a la penetración
17 resulta menor comparado con otros suelos, y por lo tanto la respuesta a la
18 descompactación o prácticas de control de tránsito resultan menores a mayor contenido
19 de arcilla.

20 Los resultados de Spoor et al. (2003) indican resultados similares. Estos autores
21 han identificado a los suelos con menor contenido de arcilla y mayor contenido de arena
22 como aquellos de mayor susceptibilidad a la compactación y mayor probabilidad de
23 respuesta a prácticas de reversión. Sin embargo, se esperaba (de acuerdo a la hipótesis
24 b.2) que el grado de compactación y la respuesta a la descompactación fuera también
25 mayor en suelos más limosos, dado la influencia del contenido del limo superficial sobre

1 la susceptibilidad de los suelos a compactarse en Molisoles (Díaz-Zorita y Grosso, 2000).
2 Los resultados del meta-análisis no permitieron encontrar una asociación clara entre la
3 respuesta a la descompactación mecánica y el contenido de limo en superficie, al contrario
4 de lo observado para los contenidos de arena y arcilla (Cuadro 5.5). Posiblemente, dado
5 la ubicación de los sitios de los ensayos analizados en el meta-análisis, la variación en el
6 contenido de arena y arcilla entre sitios resultó relativamente mayor que en el contenido
7 de limo (ver Cuadro A1. Anexo), y esto permitió detectar mayores cambios asociados a
8 estas variables. El contenido de arena de los sitios de ensayo se encontró entre 40-576 g
9 kg⁻¹ (con un coeficiente de variación de 68%) y el de arcilla entre 97-315 g kg⁻¹ (con un
10 coeficiente de variación de 28%). El contenido de limo resultó en cambio menos variable
11 (rango de 230-745 g kg⁻¹, pero con un coeficiente de variación de 21%). A su vez, los
12 contenidos de arcilla mostraron una asociación positiva y significativa con los contenidos
13 de materia orgánica ($r=0,69$; $P<0,0001$), no observada para los contenidos de limo. Sitios
14 con mayor arcilla superficial presentaron mayores valores de materia orgánica,
15 posiblemente una menor susceptibilidad a la compactación (Quiroga et al., 1999; Spoor
16 et al., 2003), y por lo tanto una menor respuesta a la descompactación (Cuadro 5.5).

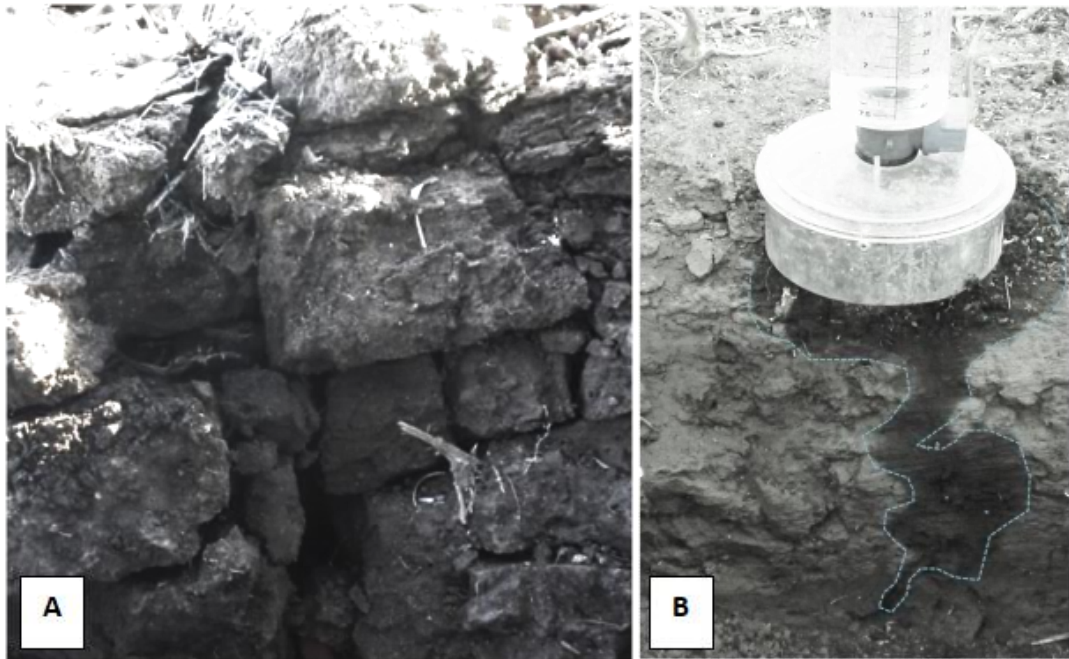
17 La respuesta a la descompactación mecánica estuvo inversamente relacionada al
18 nivel de intensificación de la rotación previo a la labor: a mayor intensidad de cultivos,
19 menor respuesta (Cuadro 5.5). Los sitios con una mayor intensidad tendieron también a
20 presentar menores niveles de resistencia en los tratamientos T0 ($r= -0.25$; $P=0.08$).
21 Mayores aportes de residuos como los que se observan en sistemas más intensos pueden
22 reducir la susceptibilidad de los suelos a la compactación, a partir de los efectos de los
23 materiales orgánicos lábiles sobre la estabilidad de los agregados (Zhang, 1994; Ball et
24 al., 2000; Hamza y Anderson, 2005) y a los efectos protectores que confieren mayores
25 niveles de residuos en superficie sobre la presión ejercida por el tráfico de maquinaria (Li

1 et al., 2001; Alakukku et al., 2003; Chamen et al., 2003). Esta menor susceptibilidad a la
2 compactación en sistemas más intensos con más aportes de residuos puede haber
3 generado menores niveles de resistencia a la penetración inicial, y por lo tanto una menor
4 respuesta la práctica de descompactación, de acuerdo a lo planteado (hipótesis b.4). Sin
5 embargo, como se observó en el Capítulo 2 en los ambientes de la Pampa Ondulada,
6 sistemas más intensos no necesariamente implican menores niveles de compactación. Se
7 necesitan estudios adicionales que permitan esclarecer en mayor detalle los efectos de la
8 intensidad de cultivos sobre la susceptibilidad a la compactación y la posible respuesta a
9 la descompactación, de acuerdo con las características edafo-climáticas.

10 No todos los indicadores físicos respondieron de la misma manera a la
11 descompactación. Al igual que lo observado por Álvarez et al. (2009 a), los experimentos
12 propios muestran que los cambios generados por la descompactación con para-till en la
13 densidad aparente, porosidad de aireación, e infiltración resultan menos evidentes que los
14 cambios en la resistencia a la penetración. Por un lado, como se mencionó en los Capítulos
15 2 y 3 de esta tesis, las características mineralógicas propias de los suelos de la región bajo
16 estudio, con elevados contenidos de silico-fitolitos de origen biológico, y por lo tanto baja
17 densidad de partícula (Cosentino y Pecorari, 2002), generan diferencias poco marcadas
18 asociadas al manejo en parámetros como la densidad aparente o la porosidad de aireación
19 (Taboada y Micucci, 2006). Aun así, aunque la reducción en densidad aparente asociada
20 a la descompactación mecánica no fue evidente en todos los experimentos y sitios, se
21 observaron diferencias significativas en la densidad aparente entre T0 y PTILL tanto de
22 0-0,1 m como de 0,1-0,2 m (Cuadro 5.4), en especial en los sitios de SJ.

23 Por otro lado, la diferente respuesta entre indicadores físicos puede también
24 deberse a la propia heterogeneidad en el suelo que generan las operaciones de
25 descompactación mediante labores verticales. Los resultados de algunos estudios reflejan

1 esta heterogeneidad, habiendo observado cambios favorables en la infiltración y en la
2 porosidad únicamente en las líneas de acción de las púas/rejas de los escarificadores, y
3 diferencias inexistentes, menos marcadas o extremadamente variables entre las líneas
4 (Bonel et al., 2004; Guecaimburú et al., 2014). Esta respuesta heterogénea se observó al
5 analizar en detalle los efectos de las labores en los experimentos propios. La
6 descompactación fragmentó las estructuras masivas en bloques de menor tamaño, pero
7 estos bloques de tamaño variable presentaron características similares a las de las capas
8 compactadas iniciales (baja porosidad visible, baja rugosidad; Fig.5.10 A), especialmente
9 entre las líneas de acción del para-till. Así, mientras que las determinaciones de resistencia
10 a la penetración registraron las fisuras generadas, las determinaciones de densidad
11 aparente y porosidad de aireación realizadas entre las líneas de acción del implemento,
12 pueden haber incluido una menor o mayor proporción de este tipo de fragmentos
13 densificados y de baja porosidad. Del mismo modo, la descompactación generó una gran
14 variabilidad en la infiltración de agua. Se observaron, aún entre las líneas de acción del
15 para-till, sitios con grietas y fisuras que propiciaron un marcado flujo preferencial de agua
16 (Fig. 5.10 B), generando tasas de infiltración que superaron los 100 mm.h^{-1} , pero con una
17 variabilidad mayor (Fig. 5.4).



1

2 **Figura 5.10 (A):** Fragmentos luego de la descompactación mecánica con para-till, en los primeros
 3 20 cm de suelo. **(B):** Infiltración de agua por grietas y fisuras generadas en tratamientos
 4 descompactados con para-till (las líneas punteadas indican el flujo preferencial de agua sobre las
 5 fisuras).

6

7 Los resultados del meta-análisis indican una tendencia similar, con diferencias
 8 menos marcadas entre tratamientos (o con una amplia variabilidad) en indicadores como
 9 la densidad aparente e infiltración (Fig. 5.7), posiblemente también debido a la
 10 irregularidad del trabajo de los escarificadores en los distintos ensayos. El análisis
 11 apareado de todos los ensayos en conjunto, al presentar un elevado número de casos
 12 analizado (mayor n, más grados de libertad), permitió detectar diferencias significativas
 13 entre situaciones compactadas y descompactadas en estos parámetros, que pueden
 14 resultar enmascaradas por la variabilidad en ensayos de campo individuales. En el corto
 15 plazo, y siguiendo la primera hipótesis planteada, la descompactación mecánica mejora
 16 entonces las propiedades físicas de suelos compactados en SD con alto contenido de limo
 17 como los de la región pampeana: reduce la resistencia a la penetración, y con distinto
 18 grado de variabilidad y magnitud disminuye también la densidad aparente, aumenta la
 porosidad de aireación y aumenta la infiltración.

1 Sin embargo, es necesario destacar que, tal como observara también Díaz-Zorita
2 (2000), la descompactación con escarificadores puede generar efectos adversos al reducir
3 los niveles de cobertura de rastrojo (Cuadro 5.3). Una menor cobertura de rastrojo puede
4 propiciar la formación de costras superficiales, en especial en suelos con altos contenido
5 de limo, y favorecer pérdidas de agua por escurrimiento (por ese encostramiento) y por
6 evaporación directa desde el suelo (por una menor cobertura). Sin embargo, la disrupción
7 del sistema poroso del suelo y los cambios en la conectividad y orientación de poros,
8 como los que pueden generar los laboreos, pueden generar alteraciones en el flujo capilar
9 y evaporación de agua (Or et al., 2013), por lo que no necesariamente la descompactación
10 mecánica implique mayores pérdidas evaporativas. Se requieren por lo tanto estudios que
11 permitan analizar cómo influyen los cambios edáficos generados por la descompactación
12 mecánica en los suelos en SD sobre el balance de agua y eficiencia de uso de este recurso
13 (Capítulo 1, ecuación 1.1) en los cultivos.

14 **5.4.2. Residualidad de la descompactación**

15 Los suelos descompactados pueden volver a compactarse luego de unos pocos
16 días de realizada la labor (Spoor, 2006) o bien mantener las mejoras físicas en un periodo
17 de seis o más años (Busscher et al., 2002), dependiendo de las características del suelo,
18 estado de degradación e historia productiva previa, características del equipo
19 descompactador y condiciones de manejo, tránsito y meteorológicas posteriores a la labor
20 (Hamza y Anderson, 2005; Spoor, 2006). Los experimentos de campo propios de esta
21 tesis indican que la historia previa en SD no parece tener influencia en la perdurabilidad
22 de la descompactación: luego de los 12 meses, los niveles de RP en los tratamientos
23 descompactados resultaron similares a los de los testigos, tanto en SJ como en ROT (Fig.
24 5.8 y 5.9).

1 Por su parte, el meta-análisis mostró que en líneas generales los efectos sobre las
2 propiedades físicas no perduran más allá de 12-18 meses desde realizada la labor. Esto es
3 coincidente con las revisiones realizadas por Chamen et al (2003) y Spoor et al. (2003)
4 en sistemas agrícolas bajo labranza en el Reino Unido, donde indicaron una duración de
5 alrededor de 2 años de los efectos del subsolado. Otros autores (Håkansson, 2005;
6 Chamen et al., 2015) han informado una duración similar, desde 1 a 2 años, para los
7 efectos de otras prácticas como el control de tránsito, una vez que se vuelve al manejo
8 original. La inclusión de cultivos de cobertura, de cultivos de gran proliferación de raíces,
9 y/o la aplicación de enmiendas orgánicas posteriormente a las labores de
10 descompactación podrían incrementar perdurabilidad de la práctica (Chamen et al.,
11 2003). Se requieren sin embargo mayores estudios que permitan analizar distintas
12 alternativas orientadas a incrementar la perdurabilidad de la descompactación mecánica
13 en SD.

14 Más aún, a los 12 meses de la descompactación se observó en los propios ensayos
15 de campo un incremento en la resistencia a la penetración superficial (Fig. 5.8; SJ). Como
16 se observa también en la Figura 5.9, esta tendencia a la re-compactación de los suelos,
17 incluso por encima de los niveles originales, se advierte en algunos de los casos
18 analizados en el meta-análisis (Mon, 2008; Álvarez et al., 2009b; Smith et al., 2011).
19 Estos resultados coinciden con las observaciones de Chamen et al. (2015) en suelos franco
20 arenosos descompactados de climas húmedos del Reino Unido, en los cuales con dos
21 labores posteriores con tractores los niveles de resistencia del suelo se incrementaron
22 hasta valores superiores a los originales. La descompactación reduce la capacidad
23 portante de los suelos (Spoor et al., 2003) y los vuelve extremadamente vulnerables a la
24 re-compactación posterior (Bonel et al., 2004; Hamza y Anderson, 2005; Spoor, 2006;
25 Álvarez et al., 2009 a). Las superficies desplazadas por la descompactación mecánica

1 pueden volver a unirse por la presión ejercida sobre el suelo suelto (Spoor, 2006), y/o las
2 grietas generadas pueden ser gradualmente rellenadas por partículas finas, coloides y
3 micro-agregados dispersados durante los ciclos de humedecimiento y secado posteriores
4 (Hamza y Anderson, 2005). La reducción en la capacidad portante y en los niveles de
5 cobertura de rastrojo (y por lo tanto en su efecto amortiguador de la presión ejercida por
6 los neumáticos de la maquinaria agrícola sobre el suelo; Chamen et al, 2003), sumado a
7 las características de escasa resiliencia de los suelos de la región (Taboada et al., 2008),
8 pueden haber contribuido a los procesos de re-compactación observados. Las condiciones
9 de cosecha de los cultivos de verano en la región, durante los meses de elevada
10 pluviometría y baja demanda hídrica de otoño, y por ende elevadas condiciones de
11 humedad edáfica, pueden favorecer los procesos de re-compactación en los ambientes
12 pampeanos, en especial de la Pampa Ondulada (Álvarez, 2012). La implementación de
13 estrategias de descompactación en suelos en SD como los analizados requerirá considerar
14 factores como la cobertura de residuos, la humedad edáfica en las cosechas siguientes, e
15 intensidad de tránsito, de modo de minimizar el riesgo de re-compactación posterior.

16 La práctica de la descompactación mecánica no parece por sí sola ser capaz de
17 revertir el proceso de compactación en suelos en SD como los de los ambientes analizados
18 en este capítulo. A esto debe sumarse el riesgo de remoción de cobertura de rastrojo y de
19 re-compactación posterior observado en algunos casos. En este sentido, se ha destacado
20 a nivel local (Duval et al., 2012; Scianca et al., 2013; Frasier et al., 2016; Romaniuk et
21 al., 2018) y en otros ambientes bajo SD (Calonego y Rosolem, 2010; Calonego et al.,
22 2017), que la inclusión de esquemas agrícolas más intensos, y que incorporen una mayor
23 proporción de gramíneas con sistemas radicales profusos, y/o limiten los períodos de
24 barbecho través de una mayor incorporación de cultivos de cobertura o servicio, tienden
25 a generar cambios graduales en las propiedades físicas de los suelos, pero que pueden

1 tener una mayor estabilidad en el largo plazo. Sin embargo, como se observó en el
2 Capítulo 2, rotaciones agrícolas más intensas, por sí solas, tampoco revirtieron la
3 compactación subsuperficial, al menos en los plazos analizados.

4 Como destacaran también otros autores (Hamza y Anderson, 2005; Álvarez, 2013),
5 difícilmente sea posible solucionar el problema de la compactación de suelos mediante
6 una única estrategia. Los estudios de Chamen et al. (2015) en suelos laboreados del Reino
7 Unido, han concluido que mientras que el subsolado puede resultar rentable en algunos
8 ambientes, se obtienen mejores resultados productivos y económicos con la aplicación de
9 prácticas de prevención de la compactación, como el control de tráfico agrícola y la
10 minimización de la presión ejercida sobre el suelo. Probablemente, en el caso de los
11 suelos en SD, la solución requiera también combinar distintas prácticas de reversión y
12 prevención, incluyendo regular o minimizar el tránsito agrícola, especialmente en
13 períodos de cosecha húmedos. Las experiencias de Botta et al. (2007) mostraron
14 resultados promisorios en cuanto a esquemas de tránsito controlado y ordenado en suelos
15 en SD. Sin embargo, será necesario profundizar estas experiencias y adaptar estos
16 esquemas a las particularidades locales (Antille et al., 2015), a la vez de generar
17 información respecto a los costos y beneficios económicos de estas prácticas (p.ej.
18 Chamen et al., 2015). Estos estudios permitirán analizar en mayor detalle la factibilidad
19 de su adopción a escala.

20 **5.5. Conclusiones**

21 De acuerdo con la primera hipótesis, la descompactación mecánica través del uso
22 de escarificadores fue capaz de aliviar la presencia de capas compactadas superficiales y
23 subsuperficiales en el corto plazo, al reducir los niveles de resistencia a la penetración por
24 debajo de niveles considerados normalmente como limitantes para el crecimiento de las
25 raíces de la mayoría de los cultivos. Los efectos sobre otros indicadores físicos como la

1 densidad aparente y la infiltración fueron más variables, aunque se observaron
2 reducciones en la densidad aparente e incrementos en la infiltración, tanto en algunos de
3 los experimentos de esta tesis como en los casos del meta-análisis. A su vez, de acuerdo
4 con lo esperado, la magnitud de estos cambios resultó mayor cuánto más compactados se
5 encontraron los suelos (hipótesis b.1), y mayor en suelos más susceptibles a la
6 compactación como aquellos con menores contenidos de materia orgánica (hipótesis b.3).
7 La textura del suelo influyó sobre la respuesta a la descompactación. Sin embargo, al
8 contrario de lo planteado (hipótesis b.2), el contenido de limo superficial no afectó
9 significativamente la magnitud de esta respuesta. Ésta resultó en cambio regulada por los
10 contenidos de arena y arcilla: a mayor contenido de arcilla y menor contenido de arena,
11 los cambios en la resistencia a la penetración al descompactar fueron menores.

12 La historia agrícola previa a la labor mecánica influyó sobre la respuesta inicial a la
13 descompactación: los cambios en la resistencia a la penetración del suelo al descompactar
14 resultaron de mayor magnitud en esquemas de menor intensidad de cultivos. Esto
15 corrobora la hipótesis planteada (b.4). Sin embargo, y al contrario de lo esperado
16 (hipótesis c), la historia agrícola previa no afectó la perdurabilidad de la práctica de
17 descompactación mecánica. Los efectos de la descompactación no perduraron más allá
18 de los 12-18 meses de realizada la labor, independientemente de la historia agrícola
19 previa.

20 En resumen, la descompactación a través de labores verticales redujo la presencia
21 de impedancias mecánicas, aunque con efectos heterogéneos sobre el suelo y de corta
22 duración, generando a su vez posibles factores adversos como la remoción de cobertura
23 de rastrojo, y en algunos casos una re-compactación posterior con niveles de resistencia
24 a la penetración superiores a los originales. De modo de analizar la viabilidad de estas
25 prácticas en suelos en SD, se requieren estudios que permitan analizar los efectos que

- 1 estos cambios generan sobre los rendimientos de los cultivos, y en particular sobre la
- 2 eficiencia de uso de recursos clave como el agua.

Capítulo 6

Descompactación mecánica de suelos en siembra directa: efectos sobre los rendimientos y la captura y conversión de recursos en soja. Resultados de ensayos de campo

1 **6. Descompactación mecánica de suelos en siembra directa: efectos sobre los**
2 **rendimientos y la captura y conversión de recursos en soja. Resultados de**
3 **ensayos de campo**

4
5 **6.1. Introducción**

6 La compactación ha demostrado ser un proceso de degradación de suelos
7 ampliamente extendido a nivel mundial (Batey, 2009; Nawaz et al., 2013; Singh et al.,
8 2015), y en los Molisoles en SD con alto contenido de limo superficial como los de la
9 subregión de la Pampa Ondulada (Capítulo 2). Los experimentos controlados de los
10 Capítulos 3 y 4 demostraron que la compactación en SD puede impactar sobre el
11 crecimiento y funcionalidad del sistema de raíces del cultivo de soja, la extracción de
12 agua, y sobre atributos ligados a la FBN, afectando la producción de biomasa y
13 rendimiento. Los resultados del meta-análisis y de los ensayos de campo del Capítulo 5
14 ilustraron cómo la descompactación mecánica a través del uso de escarificadores es capaz
15 de aliviar la presencia de impedancias mecánicas superficiales y subsuperficiales en el
16 corto plazo, al reducir los niveles de resistencia a la penetración por debajo de niveles
17 considerados normalmente como limitantes para el crecimiento de cultivos como la soja.

18 Los efectos de la descompactación mecánica sobre los rendimientos de los
19 cultivos suelen resultar ampliamente variables (Chamen et al., 2015; Schneider et al.,
20 2017). La respuesta a la descompactación es el resultado de múltiples factores, entre los
21 que podemos incluir el tipo de cultivo, el grado de impedancia para el crecimiento de
22 raíces y movimiento de agua previo al pasaje del implemento; las condiciones hídricas y
23 nutricionales experimentadas por el cultivo; la profundidad a la que se encuentran las

1 capas densificadas y su espesor; las características texturales del suelo; el estado
2 estructural del suelo y la existencia previa de vías naturales para el pasaje de raíces y
3 movimiento de agua; el drenaje general, entre otros factores (Spoor, 2006; Chamen et al.,
4 2015). La revisión de Chamen et al. (2015), centrada principalmente en cereales, muestra
5 respuestas en los rendimientos tanto positivas, de entre 1.5-9.4%, como negativas, de
6 entre 5.7–11.7%. Revisiones más recientes como la de Schneider et al. (2017), incluyendo
7 cereales, leguminosas, tubérculos y una amplia gama de ambientes edafo-climáticos,
8 muestran una variabilidad aún mayor, con incrementos de hasta 200% y reducciones de
9 hasta 20 %, con un efecto promedio en los rendimientos positivo cercano al 6%. Estos
10 autores han concluido que la respuesta a la descompactación es mayor en sitios con capas
11 compactadas marcadamente restrictivas al crecimiento de raíces (incrementos promedio
12 del 20%) y en temporadas de crecimiento de menores precipitaciones, y han destacado a
13 su vez el alto riesgo de reducciones en el rendimiento en suelos con elevado contenido de
14 limo en superficie. De acuerdo con esta revisión, en la cual predominaron los casos de
15 sistemas bajo labranza, las operaciones de subsolado en suelos con alto contenido de limo
16 pueden resultar en un colapso del sistema de poros y estructura de estos suelos, y
17 frecuentemente reducir los rendimientos de los cultivos.

18 Los efectos de la descompactación mecánica en suelos con alto contenido de limo
19 en SD sobre los rendimientos del cultivo de soja han resultado contradictorios y no se
20 encuentran del todo esclarecidos. En Molisoles en SD con elevado contenido de limo en
21 superficie como los de la región pampeana, se han documentado tanto reducciones en los
22 rendimientos (Mon, 2008; Vallejos, 2014; Lozano et al., 2016), como respuestas
23 superiores a los 1000 kg.ha⁻¹ (Tesouro et al., 2006; Mon, 2008). Las experiencias han

1 incluido ambientes climáticos de distinta oferta hídrica y régimen térmico, suelos con
2 diferencias texturales, en el contenido de carbono orgánico, en el nivel de compactación
3 previo a la labor, y en la historia agrícola previa; todos factores que podrían estar
4 incidiendo en la respuesta a la descompactación (Spoor, 2006). Como se analizó en el
5 Capítulo 5, estos factores pueden influir en la susceptibilidad de los suelos a la
6 compactación y en los cambios en los parámetros físicos luego de las labores de
7 descompactación, y esto podría incidir en la respuesta del cultivo. Así, es esperable que,
8 en suelos más susceptibles a la compactación, con mayores niveles de compactación
9 inicial y con mayores cambios en las propiedades físicas luego de la descompactación,
10 como los suelos con menor contenido de arcilla, bajos contenidos de materia orgánica y
11 una historia agrícola de menor intensidad (ver resultados Capítulo 5), la respuesta de los
12 rendimientos a la descompactación sea mayor. Sin embargo, no existen al momento
13 estudios que permitan identificar si los mismos factores que regulan la compactación son
14 los mismos que inciden en la respuesta de los rendimientos de soja a la descompactación,
15 en particular en Molisoles de elevados contenidos de limo y elevado riesgo a las labores
16 de subsolado (Schneider et al., 2017).

17 A su vez, se desconocen los mecanismos por los cuales la compactación en SD
18 pueda estar afectando los rendimientos en condiciones de campo de este cultivo, y cómo
19 la descompactación mecánica puede contribuir a aliviar estos efectos. En los sistemas
20 agrícolas de secano, el agua disponible para los cultivos durante la estación de
21 crecimiento resulta generalmente el factor más limitante (Grassini et al., 2009; Monzón
22 et al., 2012). Resulta clave por lo tanto implementar estrategias de manejo que permitan
23 aumentar la productividad total de este recurso (Caviglia et al., 2004 a; 2013, ecuación

1 1.1 del Capítulo 1), mejorando la disponibilidad de este recurso para los cultivos, su
2 consumo, y/o su conversión a biomasa y partición a grano. La degradación de la estructura
3 superficial y la presencia de compactaciones pueden reducir la infiltración, y alterar los
4 patrones de drenaje y movimiento del agua durante el ciclo de los cultivos (Taboada et
5 al., 2008; Álvarez et al., 2009 b; Sasal et al., 2010; Alaoui et al., 2011; Garbout et al.,
6 2013; Abdollahi et al., 2014), afectando así la oferta de este recurso para el cultivo. Como
7 se observó en el Capítulo 5, la descompactación de suelos en SD permite incrementar la
8 infiltración de agua, lo cual permitiría incrementar la disponibilidad de este recurso en
9 suelos en SD, en especial en condiciones de menor oferta hídrica, como se observara en
10 trigo en suelos arenosos de ambientes semi-áridos (Sadras et al., 2005).

11 Además de la disponibilidad, las compactaciones pueden también alterar el
12 aprovechamiento de agua (Sadras et al., 2005; Andersen et al., 2013). Este
13 aprovechamiento incluye la capacidad de un cultivo para extraer agua en base a una oferta
14 determinada (“eficiencia de captura”), y de la capacidad del cultivo de transformar ese
15 recurso capturado a biomasa y grano (“eficiencia de conversión” y “partición a grano”),
16 (Caviglia et al. b, 2004; 2013, ecuación 1.1 del Capítulo 1). En trigo cultivado a campo
17 se ha documentado que las compactaciones impactan principalmente sobre la captura de
18 agua (Sadras et al., 2005), y que el uso de subsoladores permite aumentar la extracción
19 de agua total en el ciclo por el cultivo, para una oferta dada. Los resultados de los
20 experimentos controlados del Capítulo 3 mostraron que las compactaciones superficiales
21 pueden limitar el crecimiento de raíces y la extracción de agua de raíces subsuperficiales
22 en el cultivo de soja. La descompactación mecánica permitiría, entonces, incrementar la

1 captura de este recurso por el cultivo, como se observara los estudios en trigo antes
2 mencionados.

3 Por último, la disponibilidad de un recurso puede alterar la eficiencia con la que
4 otro recurso es utilizado (Stockle y Kemanian, 2009). La relación entre las eficiencias de
5 utilización de un recurso y otro puede resultar positiva o negativa, dependiendo de las
6 fuentes de variabilidad ambientales, genéticas, y escalas de estudio (Sadras y Rodríguez,
7 2010). Existen evidencias de que el crecimiento de los cultivos puede estar asociado al
8 grado de co-limitación de dos o más recursos, y pueden darse compensaciones o “trade-
9 offs” (i.e. asociaciones negativas) entre las eficiencias de uso de algunos recursos como
10 el nitrógeno y la radiación (Hirose y Bazzaz, 1998; Sadras, 2005; Sadras y Rodríguez,
11 2010). Se han establecido así asociaciones positivas, por ejemplo, entre el contenido de
12 nitrógeno en planta y la eficiencia de uso de la radiación y/o eficiencia de uso del agua
13 (Sinclair y Horie, 1989; Hammer y Wright, 1994; Caviglia y Sadras, 2001), o la
14 disponibilidad de agua y la eficiencia de uso de la radiación (Sadras et al. 1991). Algunos
15 estudios recientes en trigo encontraron que, al disminuir la disponibilidad de agua, las
16 compactaciones disminuyen la eficiencia de conversión de radiación a biomasa
17 (Andersen et al., 2013). De modo análogo, cuando la disponibilidad o captura de agua no
18 fuera limitante, las compactaciones podrían estar limitando la captura de otros recursos
19 como la radiación, y esto estar restringiendo la conversión del agua consumida a biomasa
20 y grano. Así, en casos en que la captura de radiación se vea limitada, la descompactación
21 mecánica permitiría incrementar la captura de radiación por el cultivo, e incrementar la
22 conversión de agua a biomasa y grano. Sin embargo, al momento no se cuenta con
23 estudios en soja en suelos en SD que hayan analizado cómo la descompactación mecánica

1 puede impactar sobre la productividad total del agua y radiación, y sobre sus componentes
2 de captura, conversión de agua a biomasa y partición a grano (Caviglia et al., 2004 b;
3 2013, ecuación 1.1 del Capítulo 1).

4 El presente capítulo tuvo, por lo tanto, los siguientes objetivos:

- 5 • evaluar los efectos de la descompactación mecánica sobre los rendimientos de soja
6 en Molisoles en SD de la región pampeana;
- 7 • identificar factores climáticos, edáficos y de la historia agrícola previa que pueden
8 estar condicionando la respuesta a la descompactación mecánica en los
9 rendimientos de soja en estos suelos;
- 10 • evaluar los efectos de la descompactación mecánica de suelos en con alto contenido
11 de limo superficial en SD sobre la productividad y componentes de captura y
12 conversión de agua y radiación a campo en el cultivo de soja.

13 Las hipótesis de trabajo fueron las siguientes:

- 14 a) La descompactación mecánica permite aumentar los rendimientos de soja en
15 Molisoles compactados en SD.
- 16 b) La respuesta del rendimiento de soja a la descompactación mecánica será mayor
17 en ambientes restrictivos y/o con mayor susceptibilidad a la compactación,
18 incluyendo:
 - 19 b.1. suelos con mayores niveles de compactación inicial,
 - 20 b.2. suelos con menor contenido de arcilla,
 - 21 b.3. suelos con menor contenido de materia orgánica,

- 1 b.4. ambientes de menores precipitaciones,
- 2 b.5. condiciones con baja intensidad agrícola.
- 3 c) La descompactación mecánica de suelos en SD permite:
- 4 c.1. un aumento en la disponibilidad de agua para el cultivo, y de la
- 5 eficiencia de captura de este recurso por el cultivo;
- 6 c.2. un aumento en la captura o intercepción de radiación por el cultivo;
- 7 c.3. un aumento en la eficiencia de conversión de agua a biomasa y grano a
- 8 partir de una mayor radiación interceptada;
- 9 c.4. aumentar los rendimientos y la productividad del agua y radiación en
- 10 condiciones de campo a partir de estos cambios.

11 **6.2. Materiales y métodos**

12 **6.2.1. Meta-análisis**

13 Para cumplir con los objetivos 1 y 2, de los 32 estudios de campo realizados en la

14 región pampeana analizados en el Capítulo 5, se seleccionaron 13 estudios en los cuales

15 se evaluaron los efectos de la descompactación mecánica sobre los rendimientos del

16 cultivo de soja. A estos se sumaron los resultados de los cuatro ensayos propios de este

17 capítulo (Ver sección 6.2.2). Los tratamientos de los distintos estudios se agruparon en

18 dos: testigo sin descompactar; y suelo descompactado. Este último grupo incluyó

19 tratamientos de descompactación mecánica realizados con distintos equipos: para-till,

20 cultivie, cinceles y otros escarificadores. Como se mencionó en el Capítulo 5, las

21 características climáticas de los sitios de ensayo (temperatura media anual, precipitación

22 media anual) se estimaron en base a la serie climática histórica de localidad más cercana

1 (1980-2014). Las características edáficas superficiales (arena, limo, arcilla y materia
2 orgánica) correspondieron a las indicadas en el ensayo o en su defecto a las
3 correspondientes al perfil representativo de la serie de suelo indicada en el ensayo. Se
4 estimó la proporción de soja (cultivo soja 1ª ó 2ª.cultivos totales⁻¹), y el índice de
5 intensificación de la secuencia (CI), como la proporción de días en el año con crecimiento
6 activo de cultivos (siembra-madurez fisiológica; días.días⁻¹), (Ver Sección 2.2; Capítulo
7 2). Las características de los ensayos y tratamientos considerados se resumen en el
8 ANEXO.

9 Se analizó la información a través de la comparación de pares del mismo
10 experimento (prueba t-apareada, P=0,05), y gráficamente comparando los resultados de
11 los T0 sin descompactar vs. descompactados. Se analizaron en total 43 pares de
12 comparación. Se analizaron las correlaciones (coeficientes de correlación de Pearson y
13 significancia de la relación) entre la respuesta en rendimiento de soja a la
14 descompactación (Δ Cambio = testigo - descompactado) y: a) la respuesta a la
15 descompactación en indicadores físicos como la resistencia a la penetración, la densidad
16 aparente y la infiltración (Δ Cambio = testigo - descompactado), b) el estado físico de los
17 tratamientos sin descompactar (la resistencia a la penetración, la densidad aparente y la
18 infiltración de los T0), c) las características edáficas (arena, limo, arcilla, materia
19 orgánica), d) características climáticas (temperatura media anual, precipitación media
20 anual), y e) historia agrícola (Años en SD, % de soja en la rotación; índice de
21 intensificación).

1 **6.2.2. Ensayos de campo 2013-14 y 2014-15**

2 *6.2.2.1. Sitios y diseño experimental*

3 Para cumplir con el tercer objetivo, se analizaron los efectos de la
4 descompactación mecánica sobre el cultivo de soja en los cuatro experimentos de campo
5 descritos en detalle en el Capítulo 5, realizados en 2013-14 (2 experimentos en año 1) y
6 2014-15 (2 experimentos en año 2) en lotes de producción de la Pampa Ondulada,
7 cercanos a la localidad de Salto, provincia de Bs. As. (34° 17' 45" S; 60° 14' 46" O),
8 correspondientes a Argiudoles Típicos de la Serie Arroyo Dulce (INTA, 2018).

9 En cada año se seleccionaron dos lotes de producción contiguos diferentes, todos
10 con signos de compactación en los primeros 30 cm de suelo (ver Materiales y métodos
11 Capítulo 5), todos con más de 15 años de manejo en SD, pero con historias agrícolas
12 contrastantes: sitios con menor intensidad de cultivos al año en los últimos 8 años (Sitios
13 de predominio de monocultura de soja; SJ: Soja – Soja; con índices de intensificación de
14 0,35 días.días⁻¹ en el año 1 y de 0,387 días.días⁻¹ en el año 2) y sitios de mayor intensidad
15 de cultivos al año en ese mismo período (sitios rotados con maíz y trigo en este mismo
16 período; ROT: Maíz 1^a - Soja 1^a -Trigo/Soja 2^a; índices de intensificación de 0,52
17 días.días⁻¹ en el año 1, y de 0,48 días.días⁻¹ en el año 2). Se contó así con 4 sitios, dos
18 sitios diferentes (SJ y ROT) en cada año. En cada uno de los sitios se estableció un ensayo
19 de campo con dos tratamientos (cuatro experimentos en total): a) el suelo compactado en
20 su situación original en el campo, que se consideró como testigo (T0), y el mismo suelo
21 descompactado mecánicamente mediante el pasaje de un para-till (PTILL), (ver detalles
22 de descompactación en sección de Materiales y métodos del Capítulo 5)

1 En todos los casos se sembró soja de 1ª, variedad ASP 4931, a una densidad de 38
 2 plantas.m⁻², con un distanciamiento entre surcos de 0,35 m. La siembra se realizó el
 3 23/10/2013 en los sitios y tratamientos del año 1, y el 16/11/2014 en los sitios y
 4 tratamientos del año 2, debido a retrasos en las condiciones óptimas de humedad
 5 superficial (siembra a 98 y 87 días después de la labor, en los experimentos del año 1 y 2
 6 respectivamente). En todos los casos se fertilizó a siembra con 80 kg ha⁻¹ de fosfato mono-
 7 amónico (N: 12% P: 22,5% K: 0%) y se inoculó con *Bradyrhizobium japonicum*
 8 (formulación comercial Nitragin Optimize II). Se realizaron los correspondientes
 9 controles de malezas, insectos y enfermedades durante el barbecho y ciclo del cultivo, de
 10 acuerdo al manejo del establecimiento.

11 6.2.2.2. Determinaciones de suelo

12 Las características del físico-químicas del horizonte superficial de los sitios de
 13 ensayo se resumen en la sección de Resultados del Capítulo 5 (Cuadros 5.1 y 5.2) Las
 14 constantes hídricas de capacidad de campo (CC a -0,33 bar de tensión) y punto de
 15 marchitez permanente (PMP a -15 bar de tensión) por olla de presión (Richards, 1948),
 16 cada 0,2 m hasta los dos metros de profundidad, se resumen en el Cuadro 6.1.

17 **Cuadro 6.1.** Contenido de humedad (gravimétrico, ± 1 desvío estándar) a capacidad de campo
 18 (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), cada 0,2 m de profundidad. Promedio de todos los
 19 sitios y experimentos. Se indica el error estándar.

Profundidad (m)	Constantes hídricas	
	CC	PMP
	g agua .100g suelo ⁻¹	
0,0 – 0,2	26,83 \pm 3,32	11,74 \pm 2,45
0,2 - 0,4	27,89 \pm 1,89	13,44 \pm 0,83
0,4 – 0,6	26,79 \pm 2,09	12,34 \pm 0,86
0,6 – 0,8	24,5 \pm 2,08	11,2 \pm 2,49

0,8 – 1,0	22,3 ± 2,21	9,8 ± 2,17
1,0 – 1,2	20,04 ± 3,15	8,84 ± 1,29
1,2 – 1,4	18,63 ± 2,96	7,28 ± 0,61
1,4 – 1,6	18,86 ± 2,95	7,34 ± 0,97
1,6 – 1,8	19,47 ± 3,03	7,72 ± 1,05
1,8 – 2,0	19,47 ± 3,16	7,72 ± 1,02

1

2 *6.2.2.3 Determinaciones en el cultivo*

3 En V3, R2, R3, R5.5 y R7 (Fehr y Caviness, 1977) se cosecharon manualmente
4 todas las plantas de dos surcos contiguos de 1,25 metros lineales (1m²), con tres
5 submuestras por repetición. A R7, se incluyeron también hojas caídas en el entresurco del
6 cultivo, contiguo a los 1,25 metros lineales de corte. Las muestras fueron secadas en
7 estufa a 65°C durante 72 horas y pesadas. En R7 se separó la biomasa vegetativa del
8 grano.

9 *6.2.2.4. Contenido hídrico edáfico, balance hídrico y sus componentes*

10 Se determinó el contenido hídrico edáfico por el método gravimétrico cada 0,2 m
11 hasta los dos metros de profundidad, cada 8-10 días, tomando una muestra compuesta
12 homogeneizada (tres piques) por repetición, tomadas del entre-surco del cultivo, y entre
13 sitios de descompactación de las labores (pasaje de las púas del implemento) en los
14 tratamientos descompactados. Los valores de humedad gravimétrica (g agua. g suelo⁻¹)
15 medidos en cada estrato en un tiempo t se expresaron en volumen (θ_t ; cm³ . cm⁻³)
16 considerando la densidad aparente (Mg.m⁻³) de cada estrato. Para los primeros 0,4 m se
17 utilizó la densidad aparente medida a campo en cada tratamiento, mientras que, para los
18 estratos inferiores, la densidad aparente se estimó a través de funciones de
19 pedotransferencia (Saxton y Rawls, 2006), asumiendo que este parámetro no resulta

1 afectado por los tratamientos más allá de la profundidad de descompactación. Se estimó
2 el contenido de agua útil disponible para el cultivo (AU; mm), como:

$$3 \quad AU \text{ (mm)} = \sum (\theta_t - \theta_{PMP}) \cdot Z \text{ (mm)} \quad [6.1]$$

4 donde θ_t representa la humedad volumétrica en un tiempo t (en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), θ_{PMP}
5 representa el punto de marchitez permanente (en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) y Z el espesor del estrato
6 considerado (en mm). Los niveles de AU del total del perfil en un tiempo determinado se
7 determinaron a partir de la sumatoria de los valores de AU de cada estrato de 0,2 m hasta
8 los 2 m.

9 A su vez, para cada estrato, se estimó el contenido porcentual de agua útil (AU,
10 %) como:

$$11 \quad AU \text{ (\%)} = [(\theta_t - \theta_{PMP}) \cdot (\theta_{CC} - \theta_{PMP})^{-1}] \cdot 100 \quad [6.2]$$

12 donde θ_t representa la humedad volumétrica en un tiempo t (en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), θ_{PMP}
13 representa el contenido de humedad volumétrica en el punto de marchitez permanente (en
14 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), y θ_{CC} representa el contenido de humedad volumétrica en el punto de
15 capacidad de campo (en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

16 *6.2.2.6. Profundización aparente de raíces y tasas de absorción de agua*

17 En las situaciones en las que se produjeron períodos prolongados sin aportes de
18 lluvias, se estimaron la tasa de extracción de agua (K), y la velocidad del frente de
19 absorción de agua o profundización aparente de raíces, de manera análoga a lo realizado
20 en el Capítulo 3. De acuerdo con la metodología propuesta por Monteith (1986) y
21 Dardanelli et al. (2003, 2004), se asume que el contenido de agua de un determinado

1 estrato de suelo comienza a disminuir en forma exponencial cuando es alcanzado por las
2 raíces y no hay aportes frecuentes de agua. Así, el momento en el que las raíces alcanzan
3 cada profundidad permite estimar velocidad de profundización en el perfil, y la tasa con
4 la cual disminuyen los niveles de humedad permite estimar la tasa de extracción de agua
5 de cada estrato. Para cada profundidad de suelo se ajustó entre períodos de riego una
6 ecuación de tipo exponencial con *plateau* inicial, como la propuesta por Dardanelli et al.
7 (2004), (para una descripción detallada de la metodología, ver sección Materiales y
8 métodos del Capítulo 3).

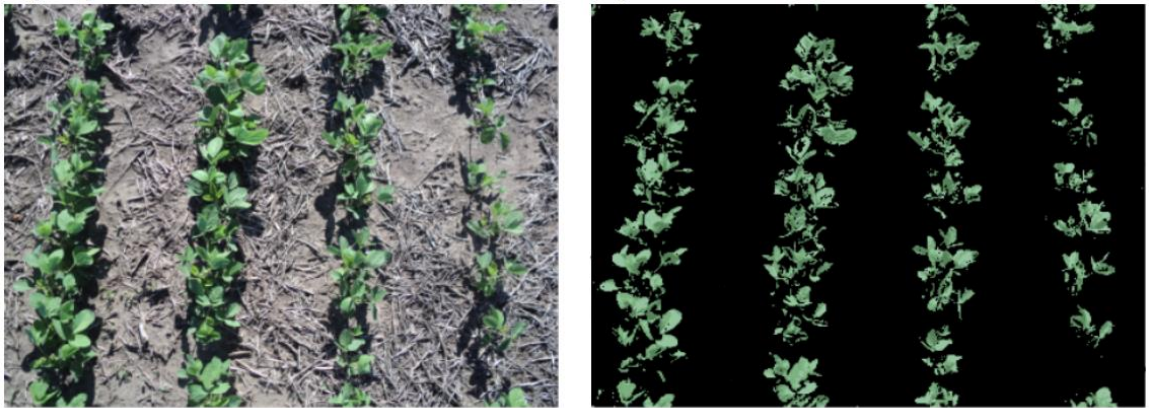
9 Una vez determinados los momentos de inicio de extracción exponencial en cada
10 estrato, se ajustaron modelos bi-lineales segmentados y modelos sigmoideos para
11 caracterizar la velocidad del frente de extracción de agua o profundización aparente de
12 raíces en el perfil, de manera similar a lo propuesto por Dardanelli et al. (2003; 2004) y
13 Severina (2011), (para una descripción detallada de la metodología, ver sección
14 Materiales y Métodos del Capítulo 3).

15 A partir de las determinaciones del contenido hídrico en cada estrato,
16 profundización aparente de raíces, registros pluviométricos diarios de los lotes y
17 meteorológicos diarios (EEA INTA Pergamino, a 39 km), y los registros fenológicos, se
18 estimó un balance hídrico diario entre las entradas (lluvias efectivas) y salidas de agua
19 (evapotranspiración, drenaje profundo, escurrimientos) al perfil de suelo de acuerdo con
20 el modelo de balance propuesto por Allen et al. (1998). Se estimó la evapotranspiración
21 potencial del cultivo (ET_c) como el producto la evapotranspiración de referencia (ET₀) y
22 un coeficiente de consumo de agua de cultivo (K_c) ajustado de acuerdo los registros de
23 cobertura del entresurco del cultivo, ver sección 6.2.2.5). Se determinó el consumo de

1 agua diario (evapotranspiración real; ET_r) a partir del consumo estimado en cada estrato
2 de 0,2 m. El consumo de agua en cada estrato se determinó a partir de las observaciones
3 gravimétricas de humedad entre fechas de medición, y se ajustó diariamente a partir de
4 un coeficiente de humedad de suelo (K_s) para cada estrato. Los escurrimientos y
5 precipitaciones efectivas diarios se estimaron a partir de los registros pluviométricos
6 diarios in situ, y usando como base las funciones propuestas por Gil (no publicados) para
7 suelos con alto contenido de limos en superficie (modificaciones a partir de las funciones
8 originalmente propuestas por Dardanelli et al., 2010). Se ajustaron los valores diarios de
9 escurrimientos y precipitaciones efectivas para cada tratamiento y repetición, efectuando
10 iteraciones sucesivas hasta obtener el mayor coeficiente de correlación entre los valores
11 observados de humedad y estimaciones del modelo.

12 *6.2.2.5. Intercepción de radiación*

13 Se estimó la intercepción lumínica usando el método propuesto por Purcell (2000)
14 para el cultivo de soja. Se tomaron imágenes digitales cada quince días en el momento
15 diario de máxima insolación, desde una altura de 2 metros por sobre el canopeo, tomando
16 5 submuestras por repetición. Se usó el software Sigma Scan Pro 5.0 (SPSS Inc., Chicago,
17 IL, USA) para filtrar la imagen y diferenciar cultivo del suelo-rastrojo (Fig. 6.1). Se
18 estimó una eficiencia de intercepción diaria a través de la interpolación lineal de los
19 valores registrados.



1

2 **Figura 6.1** Cobertura del entresurco de soja por método digital de Purcell (2000). Imagen
3 original (Izquierda) y filtrada (derecha) luego del análisis digital.

4

5 6.2.2.6. *Productividad de agua y radiación. Captura, conversión y partición*

6 Se estimó la productividad del agua (PA , $\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), de manera similar a lo propuesto
7 por Caviglia et al. (2004 b), como la relación entre la biomasa aérea total o el rendimiento
8 en grano y la oferta total de agua en el ciclo:

$$9 \quad PA = \frac{Etr}{PP+Ai} \frac{B}{Etr} \frac{Y}{B} \quad [6.7]$$

10 donde PP (en mm) es la oferta total de precipitaciones durante el ciclo del cultivo de
11 siembra a madurez fisiológica; Ai es el agua almacenada en el suelo (en mm de agua útil)
12 hasta los 2 m de profundidad a la siembra del cultivo (considerando a $PP + Ai$ la oferta
13 total de agua en el ciclo); ETr (en mm) es la cantidad de agua evapotranspirada (evaporada
14 desde el suelo y transpirada por el cultivo) de siembra a madurez fisiológica; B es la
15 biomasa aérea total (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 0% de humedad), e Y es el rendimiento en grano (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,
16 0% de humedad). El primer componente de la ecuación representa la “eficiencia de
17 captura de agua” y contempla principalmente ineficiencias generadas a partir de pérdidas
18 de agua por escurrimiento, drenaje profundo o agua que no pudo ser extraída del perfil de
19 suelo por las raíces; el segundo componente representa la eficiencia con la cual se ha

1 generado biomasa aérea a partir del agua evapotranspirada (eficiencia de uso del agua,
 2 EUA o eficiencia de conversión); y el tercer componente representa el índice de cosecha.
 3 Se estimó tanto la productividad del agua para la producción de biomasa aérea total (PA_B)
 4 como para grano (PA_Y).

5 La productividad en el uso de la radiación (PR , en $g.MJ^{-1}.m^{-2}$; Van Opstal et al., 2011)
 6 se calculó como la relación entre la biomasa (PR_B) o el rendimiento en grano (PR_Y) y la
 7 oferta total de radiación en el ciclo:

$$8 \quad PR = \frac{R_{int}}{R_s} \frac{B}{R_{int}} \frac{Y}{B} \quad [6.8]$$

9 donde R_s es la radiación global incidente (en $MJ.m^{-2}$) registrada durante el ciclo del
 10 cultivo de siembra a madurez fisiológica; R_{int} es la radiación interceptada en ese período
 11 (en $MJ.m^{-2}$); B es la biomasa aérea total (en $g.m^{-2}$, 0% de humedad), e Y es el rendimiento
 12 en grano (en $g.m^{-2}$, 0% de humedad). El primer componente de la ecuación representa la
 13 eficiencia de intercepción o “captura” y contempla principalmente ineficiencias
 14 generadas a partir de una cobertura subóptima del entresurco; el segundo componente
 15 representa la eficiencia con la cual se ha generado biomasa aérea a partir de la radiación
 16 interceptada (eficiencia de uso o conversión de la radiación, EUR); y el tercer componente
 17 representa, al igual que en el caso anterior, el índice de cosecha. La eficiencia de
 18 conversión de agua y radiación se estimó también a partir del ajuste lineal entre la biomasa
 19 acumulada y el agua evapotranspirada o la radiación interceptada acumuladas a lo largo
 20 del ciclo (Sandaña et al., 2012; Hidayat et al., 2019)

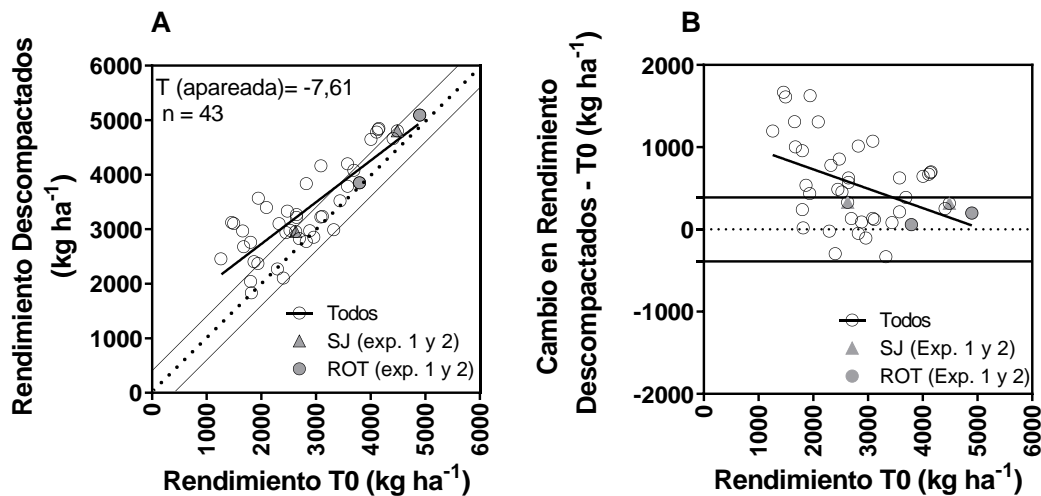
1 **6.2.2.7. Análisis estadístico de los ensayos de campo**

2 Se analizaron los efectos del factor “compactación” del horizonte antrópico (T0 =
3 testigo compactado vs PTILL = descompactado) a través de un análisis de varianza
4 (ANOVA), modelo de efectos fijos, para diseños en DBCA. Se realizaron ANOVAs
5 independientes para cada sitio (SJ o ROT), considerando las diferencias en historia
6 agrícola como sitios contrastantes donde se evaluaron los tratamientos, y no como un
7 factor adicional: de modo de evitar pseudo-replicación. La comparación de los efectos de
8 la rotación de cultivos excede los objetivos del presente trabajo. En los casos en los que
9 se analizaron variables a distintas profundidades, se incluyeron la profundidad de suelo y
10 sus interacciones se consideraron como factores anidados. En los casos en los que se
11 realizaron determinaciones en distintas fechas o estadios fenológicos, se realizó un
12 ANOVA para medidas repetidas en el tiempo, considerando la fecha de medición como
13 factor. Si se detectaron efectos de interacción entre la profundidad o fecha y algún otro
14 factor, se realizaron además ANOVAs independientes en cada profundidad o fecha para
15 analizar los efectos de los factores asociados a los tratamientos. Se realizaron pruebas de
16 comparaciones múltiples de Fisher para determinar la diferencia mínima significativa
17 (DMS) entre tratamientos ($P < 0,05$). Se utilizó el programa Infostat (Di Rienzo, 2011)
18 para realizar los ANOVA, pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, y
19 matrices de correlaciones, y el software GraphPad Prism (versión 6.01) para el ajuste de
20 curvas y modelos (estimaciones de extracción de agua, profundización de raíces,
21 profundidad máxima de enraizamiento).

1 **6.3. Resultados**

2 **6.3.1 Meta-análisis: respuesta de los rendimientos de soja a la descompactación en** 3 **Molisoles en SD**

4 Considerando los distintos ensayos y ambientes del meta-análisis, la
5 descompactación mecánica aumentó en promedio los rendimientos del T0 en 538 kg. ha⁻¹
6 ¹ ($P < 0,0001$; $y = 0,7760x + 1185$; $r^2 = 0,73$; Fig. 6.2 A), representando aproximadamente
7 un 25% de incremento. Se observaron respuestas positivas de hasta 1670 kg.ha⁻¹ y
8 reducciones de hasta 333 kg.ha⁻¹ (Fig. 6.2 B). En un 89% de los casos, los rendimientos
9 en suelos descompactados fueron iguales o mayores a los testigos, y en un 55% de los
10 casos los incrementos fueron mayores a la diferencia mínima estimada ($P = 0,05$, Fig. 6.2
11 A). La respuesta a los rendimientos a la descompactación fue mayor en aquellas
12 condiciones en las cuales los T0 presentaron menores rendimientos, aunque la tendencia
13 lineal presentó un bajo ajuste ($P = 0,0041$, $y = -0,2240x + 1185$; $r^2 = 0,19$; Fig. 6.2 B). La
14 descompactación produjo mayores incrementos en especial en ambientes o ensayos con
15 rendimientos menores a 2000 kg. ha⁻¹. En ambientes o ensayos de altos rendimientos,
16 superiores a los 4000 kg.ha⁻¹, no se observó respuesta a la descompactación en ningún
17 caso (Fig. 6.2 B).



1
 2 **Figura 6.2 (A):** Relación entre el rendimiento de soja en los T0 sin descompactar y en los
 3 tratamientos descompactados. Datos extraídos de 32 trabajos publicados para la región pampeana.
 4 La línea punteada indica la relación 1:1, las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa
 5 entre tratamientos (\pm DMS; $P=0,05$). **(B):** Cambio en rendimiento (Descompactados – T0) en
 6 relación al nivel de rendimiento del T0. La línea punteada indica la ausencia de cambios entre
 7 tratamientos y las líneas llenas indican la diferencia mínima significativa entre tratamientos
 8 (\pm DMS prueba t-apareada; $P=0,05$).

9

10 Las diferencias en rendimiento entre tratamientos descompactados y compactados
 11 estuvieron significativamente relacionadas al nivel de densidad aparente en los
 12 tratamientos T0, al contenido arcilla y materia orgánica, al nivel de precipitaciones
 13 promedio de la localidad más cercana, a los años en SD, y al índice de intensidad de la
 14 rotación estimado para el sitio de ensayo (Cuadro 6.2). La respuesta en los rendimientos
 15 al descompactar fue creciente en suelos más compactados de mayor densidad aparente en
 16 los T0, en suelos con mayores contenidos de arcilla y materia orgánica, y en sitios con
 17 más años en SD y rotaciones de mayor intensidad.

18 **Cuadro 6.2** Correlación entre la respuesta al rendimiento de soja (Δ = rendimientos tratamientos
 19 descompactados – rendimientos T0), y: la resistencia a la penetración (RP), densidad aparente
 20 (DAP) e infiltración (INF) en los tratamientos testigo (T0), en los cambios en estos indicadores
 21 (Δ = testigo - descompactados), y los parámetros de suelo (arena, arcilla y materia orgánica),
 22 clima (PP = precipitación promedio anual, T= temperatura promedio anual, de la localidad del
 23 ensayo); e historia agrícola (años en SD, % soja en la rotación, índice de intensidad de cultivos),

1 de todos los ensayos incluidos en el meta-análisis Los valores indican los coeficientes de
 2 correlación de Pearson y los asteriscos indican la significancia de la relación (* $P \leq 0,05$; ** $P \leq$
 3 $0,01$; *** $P \leq 0,001$, y ns = no significativa a $\alpha = 0,05$).

	Parámetro	Δ Rendimiento (kg.ha ⁻¹)
Suelo	RP T0	-0.08 ns
	DAP T0	0.68 *
	INF T0	0.34 ns
	% Arena	-0.22 ns
	% Arcilla	0.32 *
	% Limo	0.13 ns
	% Materia orgánica	0.39 *
	Δ RP	0.18 ns
	Δ DAP	0.14 ns
	Δ INF	0.49 ns
Clima	PP (mm)	0.53**
	T (°)	0.16 ns
Historia Agrícola	Años en SD	0.48**
	% Soja en la rotación	0.11 ns
	Índice de intensidad de cultivos	0.38*

4 **6.3.2. Ensayos de campo propios de esta tesis**

5 **6.3.2.1. Condiciones climáticas de cada experimento**

6 Las precipitaciones acumuladas en el ciclo (octubre-marzo) fueron elevadas en
 7 ambos años, superiores al promedio histórico (+ 140 mm en el año 1; y + 40 mm en el
 8 año 2). Sin embargo, en los experimentos del año 1, desde siembra al inicio del período
 9 crítico, los cultivos exploraron condiciones climáticas de menor pluviometría, mayor
 10 temperatura, mayor déficit de presión de vapor (DPV) y mayor evapotranspiración de
 11 referencia (E_{t0}) que en los experimentos del año 2 (Cuadro 6.3). Posteriormente, y en
 12 especial en R3-R6, los cultivos en el año 1 tuvieron condiciones con mayor pluviometría,
 13 y niveles de DPV y E_{t0} similares a los del año 2. Las condiciones de temperatura media
 14 resultaron superiores en el año 1, a excepción del período R6-R8.

15 **Cuadro 6.3.** Temperatura media diaria (TM), precipitaciones acumuladas (PP), radiación global
 16 incidente diaria (RAD), déficit de presión de vapor diario (DPV) y evapotranspiración de

1 referencia diaria (ET_0), promedios para las etapas de siembra – fijación de vainas (S-R3), fijación
 2 de vainas-llenado de grano (R3-R6), y llenado de grano-madurez fisiológica (R6-R8); durante los
 3 experimentos de los años 1 y 2.

	Etapa	Duración Días	TM °C	PP mm	RAD MJ.m ⁻² .día ⁻¹	DPV Kpa	ET₀ mm.día ⁻¹
Año 1	S-R3	76	22,3	172	19,6	1,6	5,2
	R3-R6	48	22,7	479	12,0	1,1	4,1
	R6-R8	34	18,4	124	14,2	1,0	3,4
Año 2	S-R3	73	21,4	319	20,7	1,4	4,7
	R3-R6	39	20,7	117	19,6	1,2	3,9
	R6-R8	26	20,0	126	17,5	1,2	3,2

4

5 **6.3.2.2. Efectos de la descompactación mecánica sobre el crecimiento aéreo:**

6 **rendimiento, biomasa total y biomasa vegetativa**

7 En el año 1, la producción de grano promedio fue de 4657 kg.ha⁻¹ en los sitios de
 8 menor índice de intensificación (SJ) y 5081 kg.ha⁻¹ en los sitios de mayor índice de
 9 intensificación (ROT). No se observaron diferencias significativas entre tratamientos
 10 compactados y descompactados, ni en el experimento en el sitio de SJ (P=0,332), ni en el
 11 de ROT (P= 0,377), (Cuadro 6.4). Sin embargo, en los suelos compactados (T0) se
 12 observó una mayor variabilidad de rendimientos, en especial en el sitio SJ (Cuadro 6.4).
 13 En este sitio, los rendimientos de todas las muestras de los tratamientos descompactados
 14 (PTILL) superaron los 4500 kg.ha⁻¹, mientras que en los suelos compactados (T0) se
 15 registraron valores inferiores incluso a los 3500 kg.ha⁻¹. En los experimentos del año 2,
 16 con mayor pluviometría, pero fechas de siembra retrasadas respecto al año 1, los
 17 rendimientos fueron en promedio 31% menores (2793 en SJ y 3822 kg.ha⁻¹ en ROT). Al
 18 igual que en el año 1, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos
 19 compactados y descompactados (P =0,126 en SJ y P= 0,654 en ROT), (Cuadro 6.4).

1 Tampoco se observaron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre tratamientos
 2 compactados y descompactados en la biomasa aérea total y biomasa vegetativa (Cuadro
 3 6.4), ni en los experimentos del año 1 ni en los del año 2. Al igual que en el caso del
 4 rendimiento, la biomasa aérea total promedio fue un 12% inferior en el año 2 respecto de
 5 lo observado en los experimentos del año 1. La biomasa vegetativa se mantuvo en niveles
 6 similares entre años. El índice de cosecha y el número de plantas logradas a cosecha
 7 también resultaron similares entre tratamientos.

8 **Cuadro 6.4.** Número de plantas a cosecha, Biomasa aérea total (BAT), Biomasa aérea vegetativa
 9 (BAV), rendimiento en grano (R), e índice de cosecha (IC), para el tratamiento testigo (T0) y el
 10 tratamiento descompactado (PTILL), en sitios de monocultura de soja (SJ) y rotados (ROT), de
 11 los experimentos de descompactación del año 1 y 2. Se indica el error estándar en cada caso.

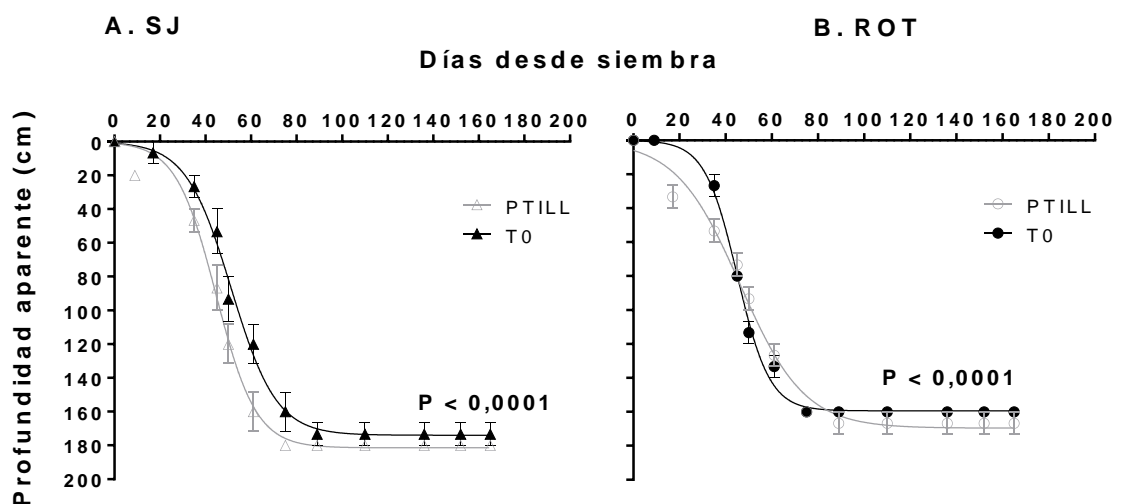
	Sitio	Trat.	Variable				
			Plantas (pl.m ⁻²)	BAT (kg.ha ⁻¹)	BAV (kg.ha ⁻¹)	R (kg.ha ⁻¹)	IC
Año 1	SJ	T0	35,0±0,8	11246 ± 1089	6736 ± 319	4510 ± 514	0,40±0,01
		PTILL	35,6±0,7	11578 ± 699	6773 ± 192	4804 ± 293	0,42±0,01
		DMS	3,7	2090	1114	996	0,02
	ROT	T0	35,6±1,2	11578 ± 263	6648 ± 123	4919 ± 586	0,48±0,01
		PTILL	33,1±1,1	10872 ± 386	5662 ± 248	5209 ± 635	0,52±0,01
		DMS	8,35	1011	1916	1110	0,07
Año 2	SJ	T0	40,7±1,8	9016 ± 364	6387 ± 262	2628 ± 166	0,29±0,01
		PTILL	37,3±1,2	9683 ± 368	6725 ± 272	2957 ± 148	0,31±0,01
		DMS	7,1	1306	952	564	0,03
	ROT	T0	36,7±1,7	10592 ± 355	6797 ± 244	3794 ± 124	0,36±0,01
		PTILL	33,9±1,4	10226 ± 524	6414 ± 458	3851 ± 230	0,38±0,02
		DMS	5,1	1126	667	471	0,02

12 6.3.2.3. Efectos de la descompactación sobre la dinámica de extracción y 13 productividad del agua (PA)

14 6.3.2.3.1. Velocidad del frente de extracción de agua

15 Las condiciones de baja pluviometría (al menos hasta R2) y elevados contenidos
 16 de humedad iniciales de los experimentos del año 1 permitieron analizar la dinámica de
 17 extracción de agua en el perfil, y por ende la profundización aparente de las raíces, a

1 través del ajuste de modelos sigmoideos ($r^2 > 0,96$) y lineales ($r^2 > 0,93$), los cuales
 2 difirieron significativamente entre tratamientos ($P < 0,0001$). En el sitio de SJ (Fig. 6.3 A),
 3 las plantas creciendo en suelos compactados y descompactados alcanzaron una
 4 profundidad máxima similar (181 vs 174 cm, $P > 0,05$), y la velocidad promedio de avance
 5 en profundidad del frente de extracción resultó semejante entre tratamientos ($P > 0,05$;
 6 Cuadro 6.5). Sin embargo, las condiciones de mayor compactación en T0 generaron un
 7 retraso inicial en la profundización ($P < 0,05$; parámetro “m” en la ecuación 6.4; Cuadro
 8 6.5). En el sitio ROT el comportamiento fue diferente (Fig. 6.3 B): si bien se observó un
 9 retraso inicial en la profundización del frente de extracción de agua en los suelos T0
 10 compactados, las tasas de profundización posteriores resultaron mayores ($P < 0,05$;
 11 parámetro “b”, Cuadro 6.5) que en los suelos descompactados (PTILL). De este modo,
 12 para el período reproductivo se alcanzaron profundidades similares entre tratamientos.
 13 No se observaron tampoco diferencias significativas en la profundidad máxima
 14 alcanzada.



15
 16 **Figura 6.3** Evolución de la profundidad aparente de enraizamiento (profundidad del frente de
 17 extracción de agua) observada en los experimentos del año 1 (± 1 error estándar), y ajustada a

1 través de modelos sigmoideos (líneas llenas), para los tratamientos testigo (T0) y descompactados
 2 con para-till (PTILL), en dos sitios: A) monocultura de soja (SJ) y B) rotado (ROT). Se indica el
 3 valor P de la diferencia entre tratamientos.

4

5 El análisis por modelos bilineales mostró una tendencia similar: la compactación
 6 generó un retraso inicial en la profundización de raíces en los T0 de ambos sitios (Cuadro
 7 6.5; parámetro “a” u ordenada al origen), que no fue compensado por la tasa de
 8 profundización posterior en SJ, pero sí en ROT (parámetro “b” de la ecuación 6.5; Cuadro
 9 6.5). Las condiciones de elevada frecuencia de precipitaciones desde siembra hasta R3 en
 10 los experimentos del año 2, y una extracción de agua predominante en los horizontes
 11 superficial y subsuperficial, impidieron estimar adecuadamente diferencias en la
 12 velocidad del frente de extracción de agua entre suelos compactados y descompactados
 13 en los distintos sitios.

14 **Cuadro 6.5** Valores estimados para los parámetros del modelo sigmoideo de profundización
 15 aparente de raíces $y = a + \frac{(p-a)}{1+10^{(m-t).b}}$, y del modelo bilineal $y = a + b.t$, para los tratamientos
 16 testigo (T0) y descompactado con para-till (PTILL) en los experimentos del año 1, en sitios de
 17 monocultura de soja (SJ) y rotado (ROT). Se indica el error estándar de la estimación. Los
 18 asteriscos indican diferencias estadísticas significativas en la estimación entre tratamientos dentro
 19 de un mismo sitio (*, ** ; para $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$, y ns = no significativa).

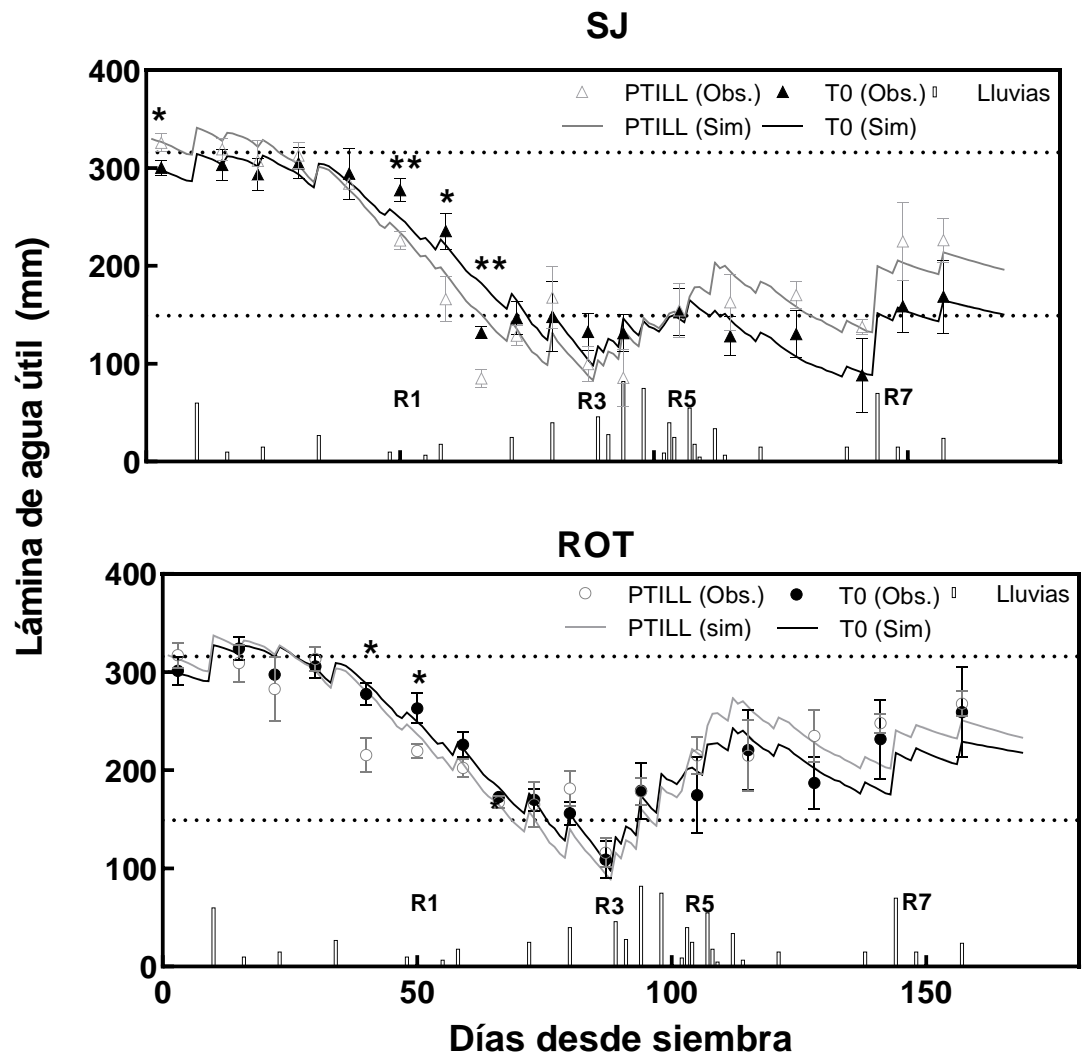
Sitio	Tratamiento	Modelo sigmoideo Parámetros			Modelo bilineal Parámetros	
		“p” (Prof. Máxima) cm	“m” (Días a p/2) días	“b” (Tasa) 0-1	“b” (Tasa) cm.día ⁻¹	“a” (Ordenada al origen) días
SJ	T0	173,9±3,7 _{ns}	51,2±1,2 _{**}	0,04±0,05 _{ns}	2,82±0,22 _{ns}	-56,2±10,9 _*
	PTILL	181,4± 2,7	44,6±0,8	0,05±0,005	2,67±0,23	-20,1±10,2
ROT	T0	159,4± 1,5 _{ns}	45,1±0,5 _{ns}	0,03±0,003 _{**}	4,2±,28 _*	-110,7±13 _{***}
	PTILL	169,6± 3,1	46,2±1,2	0,06±0,004	2,3±0,15	-17,8±7,6

20

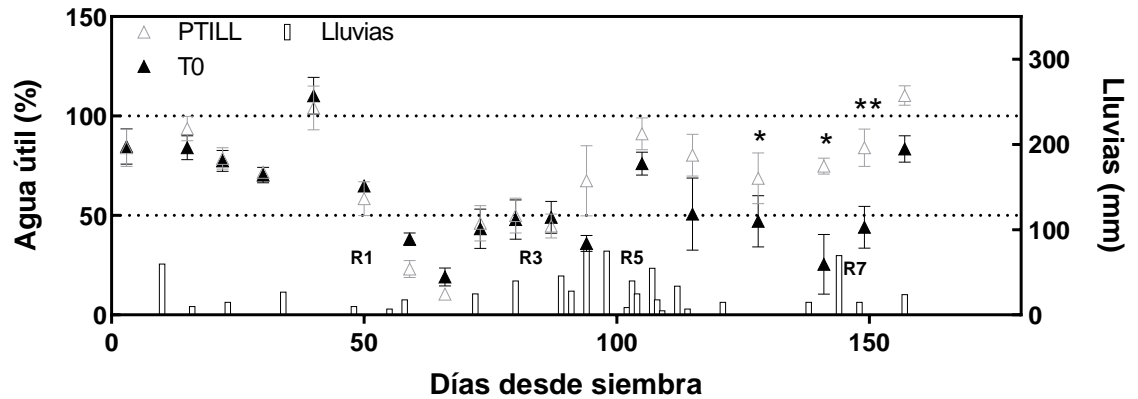
21 6.3.2.3.2 Balance hídrico del suelo

1 El balance hídrico edáfico estuvo influenciado por las condiciones climáticas de la
2 campaña, los sitios y los tratamientos. En todos los tratamientos y sitios, en el año 1 los
3 perfiles se encontraron cercanos al punto de capacidad de campo (CC) al momento de la
4 siembra, aunque el agua inicial en los tratamientos descompactados fue alrededor de 30
5 mm mayor que la de los T0 ($P < 0,05$) en el sitio de SJ (Fig. 6.4). Los niveles de humedad
6 descendieron durante los estadios vegetativos y reproductivos previos a R6. Durante esta
7 etapa de menores precipitaciones, se observó un descenso más pronunciado en los niveles
8 de humedad en los suelos descompactados respecto de T0, tanto en SJ como en ROT
9 (menores niveles de humedad en PTILL, tanto en sitio SJ como ROT; $P > 0,05$).
10 Posteriormente, las lluvias durante el período reproductivo recargaron parcialmente el
11 perfil en todos los casos. Sin embargo, la descompactación favoreció el ingreso de agua
12 hacia el final del ciclo (R5-R7): en PTILL el aumento en los contenidos de humedad en
13 los horizontes superiores fue mayor que en T0 en especial en el sitio SJ (Fig. 6.5; $P < 0,05$).

Año 1



1
 2 **Figura 6.4** Evolución en el ciclo de la lámina de agua útil acumulada a 2 m de profundidad en
 3 los experimentos del año 1, para los tratamientos testigo (T0) y descompactado con para-till
 4 (PTILL), en dos sitios: monocultura de soja (SJ, arriba) y rotado (ROT, abajo). Los círculos
 5 indican los valores de humedad observados por gravimetría (± 1 error estándar) y las líneas llenas
 6 muestran la simulación diaria promedio para cada tratamiento. Los asteriscos indican diferencias
 7 estadísticas significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio y fecha de medición (*, **;
 8 para $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$). Las líneas punteadas indican las láminas correspondientes al 100 y 50%
 9 de agua útil a 2 m.

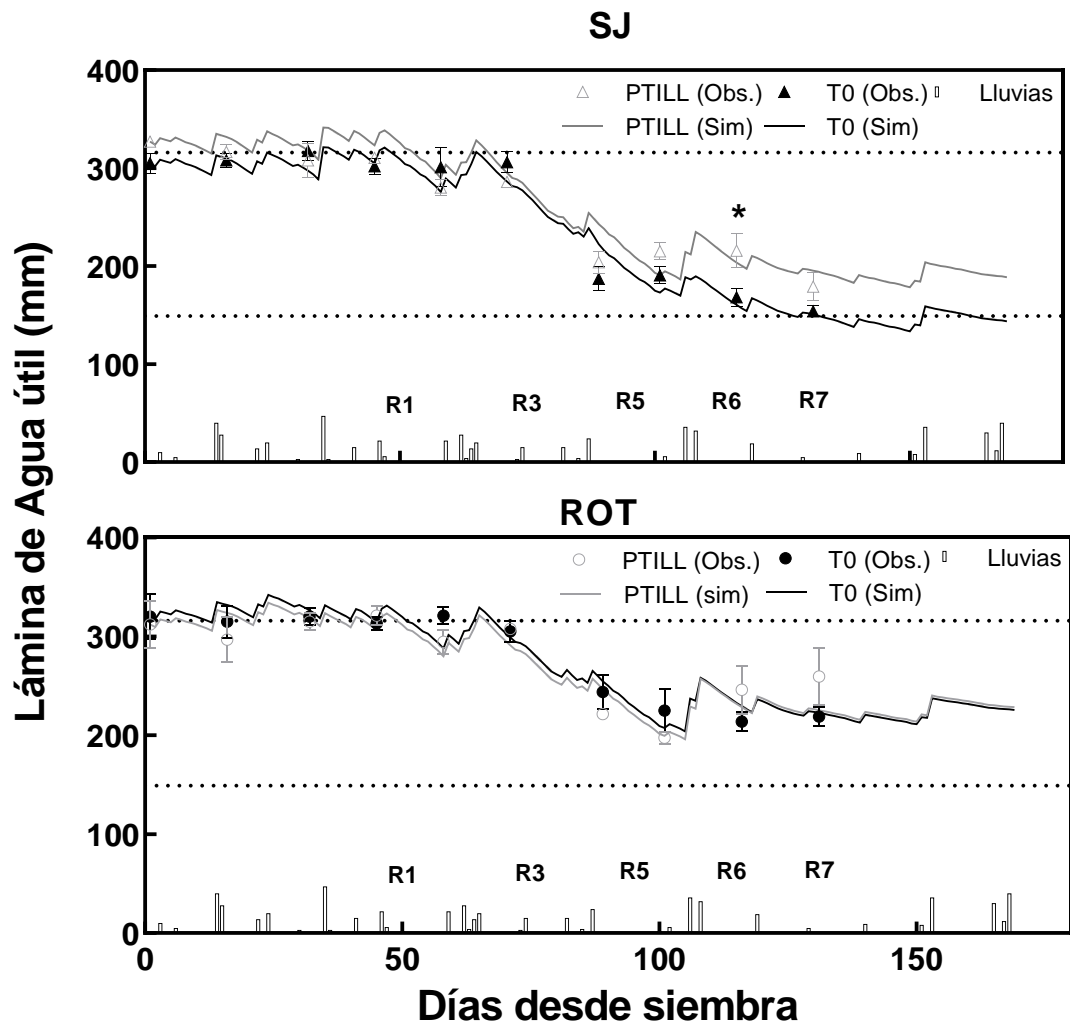


1
 2 **Figura 6.5** Evolución en el ciclo del contenido de humedad (% de agua útil) en los 0,2-0,4 m
 3 durante el año 1, para los tratamientos testigo (T0) y descompactado con para-till (PTILL), en el
 4 experimento del sitio de monocultura de soja. Los círculos indican los valores de humedad
 5 observados por gravimetría (± 1 error estándar). Los asteriscos indican diferencias estadísticas
 6 significativas entre tratamientos dentro de una misma fecha de medición (*, **; para $P \leq 0,05$, P
 7 $\leq 0,01$). Las líneas punteadas indican el 100 y 50% de agua útil de la capa.

8 En los experimentos del año 2, los perfiles partieron también con niveles de agua
 9 útil cercanos a capacidad de campo, y recién al comenzar el período reproductivo se
 10 evidenciaron disminuciones en el contenido de agua, sin que se registraran diferencias
 11 entre tratamientos compactados y descompactados en ninguno de los sitios. Únicamente
 12 se observaron superiores niveles de humedad edáfica ($P < 0,05$) en PTILL en el sitio SJ,
 13 luego de las precipitaciones entre R5 y R6 (Fig. 6.6).

14

Año 2



1
 2 **Figura 6.6** Evolución en el ciclo de la lámina de agua útil acumulada a 2 m de profundidad en
 3 los experimentos del año 2, para los tratamientos testigo (T0) y descompactados con para-till
 4 (PTILL), en dos sitios: monocultura de soja (SJ, arriba) y rotado (ROT, abajo). Los círculos
 5 indican los valores de humedad observados por gravimetría (± 1 error estándar) y las líneas llenas
 6 muestran la simulación diaria promedio para cada tratamiento. Los asteriscos indican diferencias
 7 estadísticas significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio y fecha de medición (*, **
 8 ; para $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$). Las líneas punteadas indican las láminas correspondientes al 100 y 50%
 9 de agua útil a 2 m.

10

11

12

1 *6.3.2.3.3 Productividad del Agua y sus componentes:*

2 La descompactación mecánica incrementó significativamente ($P < 0,05$) la oferta
3 total de agua disponible para el cultivo en el sitio de SJ (año 1), a partir de mayores niveles
4 de agua en el suelo en el momento de la siembra (Cuadro 6.6). A su vez, incrementó
5 significativamente la evapotranspiración total del ciclo del cultivo en ambos sitios
6 ($P < 0,05$; en el sitio ROT en el año 1, y en los sitios de SJ en años años); y aumentó
7 ($P < 0,05$) la proporción de agua consumida respecto de la oferta total (i.e. mayor eficiencia
8 de “captura” por el cultivo) en ambos sitios. Sin embargo, en ninguno de los experimentos
9 se observaron efectos significativos de la descompactación sobre la eficiencia de uso del
10 agua para producir biomasa (eficiencia de “conversión”). Esto se observó tanto al analizar
11 los cocientes entre la biomasa total aérea producida y el agua evapotranspirada (EUA,
12 Cuadro 6.6), como al analizar la evolución de la biomasa aérea total producida en el ciclo
13 y el agua evapotranspirada (las pendientes de los modelos lineales no difirieron
14 significativamente, $P = 0,8043$; Fig. 6.7).

15

16

17

18

19

20

21

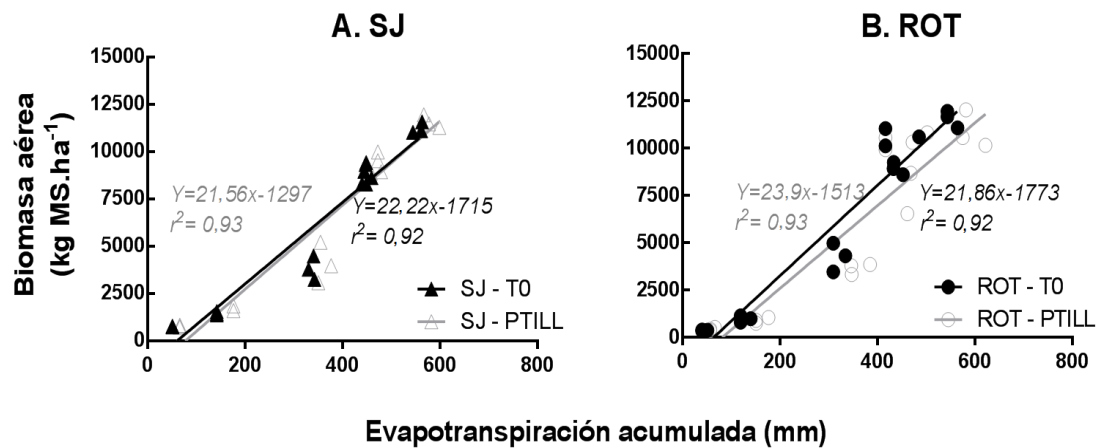
22

23

1 **Cuadro 6.6** Oferta total de agua en el ciclo precipitaciones y agua útil inicial ($PP + Ai$) ;
 2 evapotranspiración real (ETr); eficiencia de captura ($ETr/PP+Ai$); eficiencia de uso del agua
 3 evapotranspirada ($EUA=B/ETr$); Productividad del agua total ofertada en biomasa aérea (PA_B
 4 ; $B/(PP+Ai)$) o grano (PA_Y ; $Y/(PP+Ai)$); en los experimentos del año 1 y 2, para los tratamientos
 5 testigo (T0) y descompactado con para-till (PTILL), en sitios de monocultura de soja (SJ) y rotado
 6 (ROT). Los asteriscos indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos dentro de
 7 un mismo experimento y sitio (*, **, ***, ns; para $P \leq 0,05$; $P \leq 0,01$; $P \leq 0,001$; y ns = no
 8 significativa).

	Sitio	Trat	Oferta Total	Etr	Ef. Captura	EUA	PA_B	PA_Y
			(mm)	(mm)	(0-1)	($g.mm^{-1}.m^{-2}$)	($g.mm^{-1}.m^{-2}$)	($g.mm^{-1}.m^{-2}$)
Año 1	SJ	T0	1075±8	546±6	0,50±0,01	2,01±0,08	1,05±0,06	0,42±0,02
		PTILL	1105 ±1	581±10	0,53±0,01	1,99±0,05	1,05±0,01	0,43±0,01
	ROT	T0	1076±14	550±7	0,51±0,01	2,12±0,12	1,08±0,04	0,46±0,03
		PTILL	1092±14	591±15	0,54±0,01	1,77±0,18	0,96±0,09	0,47±0,05
Año 2	SJ	T0	900±4	447±1	0,50±0,01	2,02±0,08	1,00±0,05	0,29±0,03
		PTILL	922±10	470±4	0,52±0,01	2,06±0,03	1,05±0,02	0,32±0,02
	ROT	T0	915±23	439±23	0,48±0,01	2,43±0,13	1,16±0,05	0,41±0,01
		PTILL	907±25	434±19	0,48±0,02	2,37±0,10	1,13±0,02	0,42±0,01

9
10
11



12
13
14
15
16

Figura 6.7 Relación entre la evapotranspiración y biomasa aérea acumulada a lo largo del cultivo; para los tratamientos testigo (T0) y descompactados (PTILL), en sitios de monocultura de soja (SJ, izquierda) y rotados (ROT, derecha). Se muestra el ajuste por regresión lineal para los distintos tratamientos y sitios, y los coeficientes de ajuste en cada caso.

17
18
19

A pesar de las diferencias observadas entre tratamientos a nivel de captura de agua por el cultivo, no se encontraron diferencias significativas en la productividad del agua en base a biomasa (PA_B). La PA para producir grano (PA_Y) resultó también similar entre

1 T0 y PTILL en los distintos sitios y experimentos. Sin embargo, las PA_Y promedio
2 resultaron relativamente similares entre años en los sitios ROT (0,41-0,46 para el año 1 y
3 2 respectivamente), pero no en SJ (0,29 – 0,43 $g \cdot mm^{-1} \cdot m^{-2}$ para el año 1 y 2).

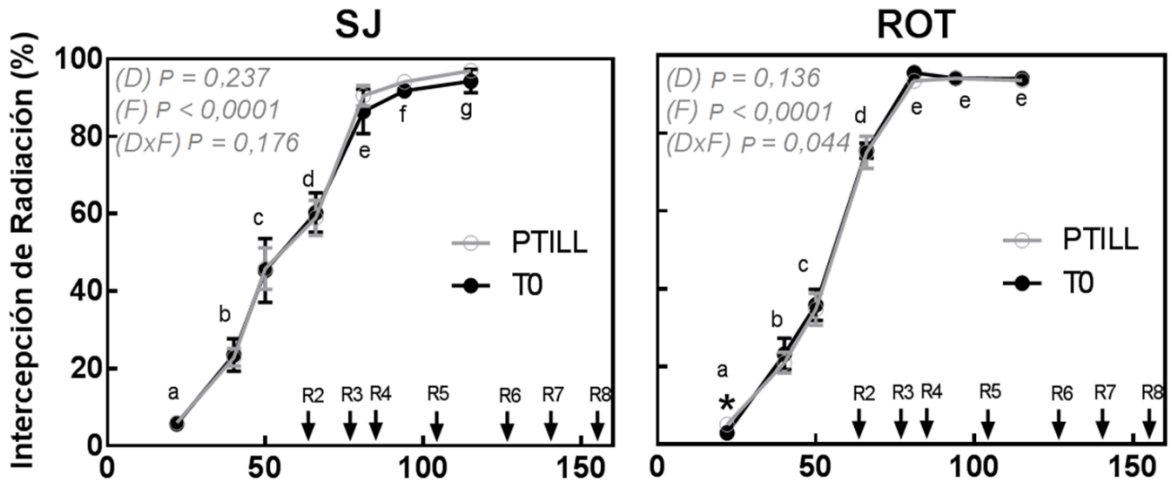
4 **6.3.2.4 Efectos de la descompactación mecánica sobre la dinámica de interceptación,** 5 **eficiencia de uso y productividad de la radiación**

6 *6.3.2.4.1 Radiación interceptada*

7 La cobertura del entresurco por el cultivo se incrementó en todos los casos a
8 medida que avanzó el ciclo del cultivo (Fig. 6.8), hasta alcanzar valores máximos,
9 superiores al 90% de interceptación de radiación. En líneas generales, no se advirtieron
10 efectos significativos asociados a la descompactación sobre la interceptación de radiación
11 en ninguno de los experimentos. Únicamente en el año 1, en el sitio ROT, se observaron
12 superiores niveles de interceptación en PTILL en los primeros estadios del cultivo (Fig. 6.8
13 A, derecha), pero posteriormente en el ciclo no se advirtieron mayores contrastes respecto
14 de T0.

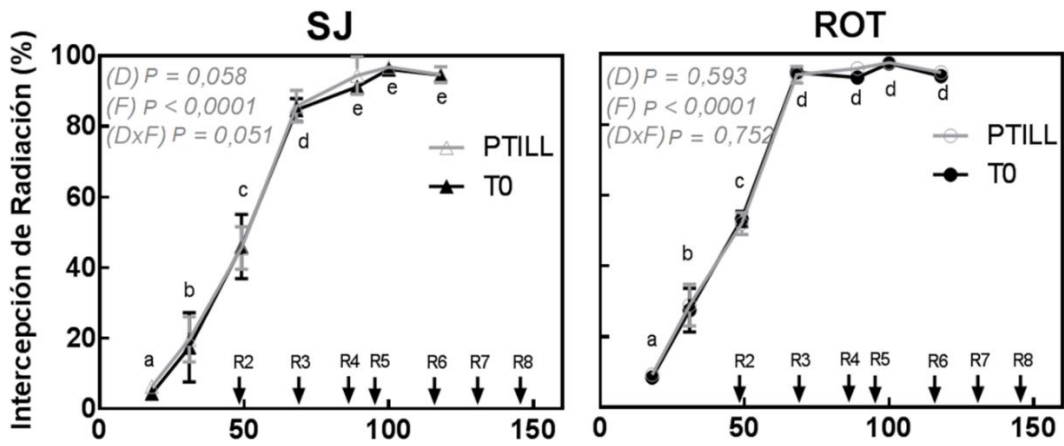
15

A. Año 1



1

B. Año 2



Días desde siembra

2

3 **Figura 6.8** Evolución en el ciclo de la intercepción de radiación incidente, en los experimentos
 4 del año 1 (A) y del año 2 (B), para los tratamientos testigo (T0) y descompactado con para-till
 5 (PTILL), en sitios de monocultura de soja (SJ) y rotados (ROT). Los asteriscos indican diferencias
 6 significativas entre tratamientos dentro de un mismo sitio y fecha (* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$). Letras
 7 distintas indican diferencias entre fechas ($P < 0,05$). Se indican los efectos de los factores:
 8 tratamiento de descompactación (D), fecha (F), y su interacción. Las flechas indican la ocurrencia
 9 de eventos de desarrollo.

10

La duración del ciclo resultó similar entre tratamientos y sitios dentro de un mismo

11

experimento. La radiación total incidente en el ciclo fue de 2663 MJ.m^{-2} en el año 1 y de

12

2711 MJ.m^{-2} en el año 2 (Cuadro 6.7). No se observaron diferencias significativas entre

13

T0 y PTILL en la radiación total interceptada en el ciclo.

1 *6.3.2.4.2 Productividad de la radiación y componentes*

2 En términos generales, la captura, eficiencia de uso y la productividad de radiación
3 estuvieron mayormente asociadas a las condiciones del experimento (año y sitio) más que
4 a las condiciones del horizonte antrópico. En el año 1, en el promedio de distintos
5 tratamientos y sitios, el cultivo interceptó alrededor de un 53% de la radiación incidente
6 (Cuadro 6.7), presentó una eficiencia de uso cercana a $0,81 \text{ g.MJ}^{-1}$ interceptado, y la PR
7 resultó de $0,42 \text{ g.MJ}^{-1}$ incidente (biomasa) y $0,175 \text{ g.MJ}^{-1}$ incidente (grano). En el año 2,
8 a pesar de haber conseguido una mayor interceptación (~62%), las eficiencias de uso de la
9 radiación (EUR) resultaron un 27% menores que las del año anterior, y las PR 12% y
10 26% más bajas (biomasa y grano respectivamente). No se observaron diferencias
11 significativas en la PR o sus componentes asociadas a la descompactación mecánica, en
12 ninguno de los experimentos o sitios.

13

14

15

16

17

18

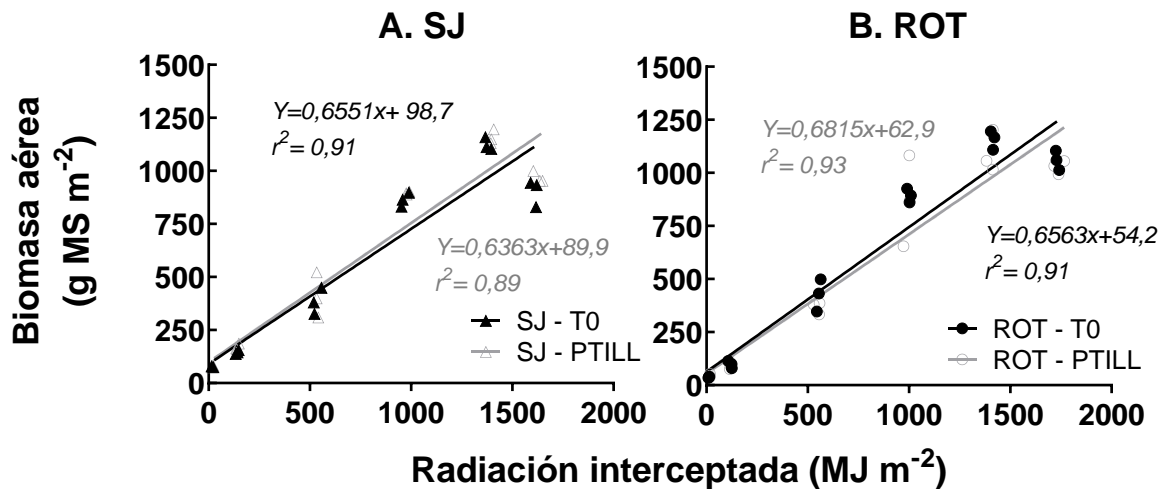
19

20

1 **Cuadro 6.7** Oferta total de radiación en el ciclo (R_s), Radiación interceptada (R_{int}); eficiencia
 2 de captura o intercepción de radiación (R_{int}/R_s); eficiencia de uso de la radiación ($EUR=B/R_{int}$);
 3 Productividad de la radiación en biomasa aérea ($PR_B ; B/R_s$) o grano ($PR_Y ; Y/R_s$); en los
 4 experimentos del año 1 y 2, para los tratamientos testigo (T0) y descompactado con para-till
 5 (PTILL), en sitios de monocultura de soja (SJ) y rotado (ROT). Los asteriscos indican diferencias
 6 significativas entre tratamientos dentro de un mismo experimento y sitio (*, **, ***, ns; para P
 7 $\leq 0,05$; $P \leq 0,01$; $P \leq 0,001$; y ns = no significativa).

Año	Sitio	Trat	R_s	R_{int}	Ef. Captura	EUR	PR_B	PR_Y
			(MJ.m ⁻²)	(MJ.m ⁻²)	(0-1)	(g.MJ ⁻¹)	(g.MJ ⁻¹)	(g.MJ ⁻¹)
Año 1	SJ	T0	2663	1379±9	0,52±0,01	0,82±0,05	0,42±0,02	0,17±0,01
		PTIL	2663	1399±4	0,53±0,01	0,83±0,01	0,43±0,01	0,18±0,01
		L	2663	1403±10	0,53±0,01	0,75±0,07	0,39±0,04	0,17±0,01
	ROT	T0	2663	1413±5	0,53±0,01	0,82±0,04	0,44±0,02	0,18±0,01
		PTIL	2663	1403±10	0,53±0,01	0,75±0,07	0,39±0,04	0,17±0,01
		L	2663	1403±10	0,53±0,01	0,75±0,07	0,39±0,04	0,17±0,01
Año 2	SJ	T0	2771	1609±10	0,59±0,01	0,56±0,02	0,33±0,01	0,10±0,01
		PTIL	2771	1629±13	0,60±0,01	0,59±0,01	0,36±0,01	0,11±0,01
		L	2771	1629±13	0,60±0,01	0,59±0,01	0,36±0,01	0,11±0,01
	ROT	T0	2771	1731±5	0,64±0,01	0,61±0,02	0,39±0,01	0,14±0,01
		PTIL	2771	1740±14	0,64±0,01	0,82±0,05	0,42±0,02	0,17±0,01
		L	2771	1740±14	0,64±0,01	0,82±0,05	0,42±0,02	0,17±0,01

8
 9 Tampoco se encontraron diferencias en la eficiencia de utilización de radiación al
 10 analizar la evolución de la biomasa en función de la radiación interceptada a lo largo del
 11 ciclo (sin diferencias en las pendientes de las rectas, $P > 0,05$; Fig. 6.9): considerando todos
 12 los sitios y tratamientos, la eficiencia de conversión fue en promedio de 0,65 g.MJ⁻¹.

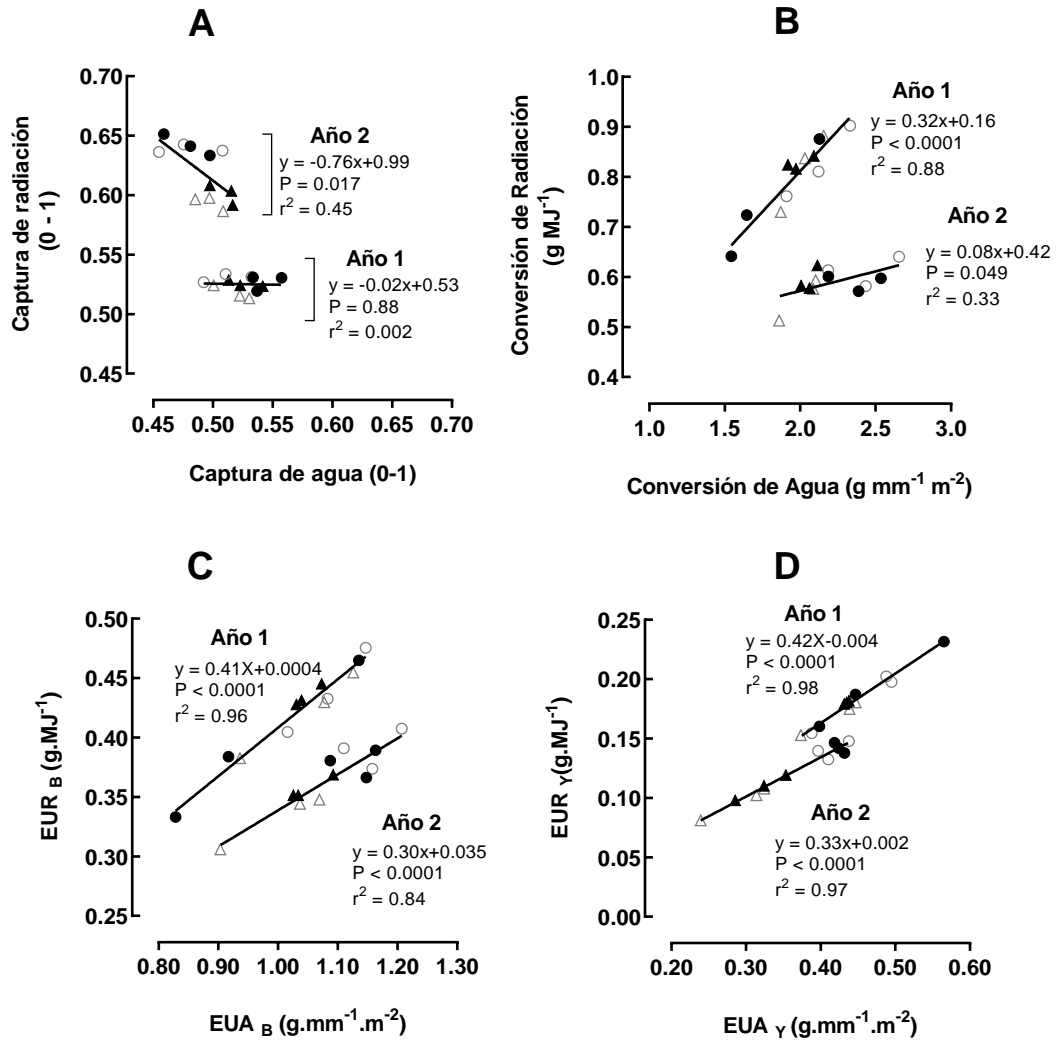


13
 14 **Figura 6.9** Relación entre la radiación interceptada a lo largo del ciclo del cultivo, con la

1 producción de materia seca; para los tratamientos testigo (T0) y descompactados (PTILL), en
2 sitios de monocultura de soja (SJ, izquierda) y rotados (ROT, derecha). Se muestra el ajuste por
3 regresión lineal para los distintos tratamientos y sitios, y los coeficientes de ajuste en cada caso.
4

5 **6.3.2.5. Relaciones entre PR, PA y sus componentes**

6 Las productividades de la radiación y agua (grano o biomasa) estuvieron positiva
7 y estrechamente relacionadas (Fig. 6.10 A y B). Sin embargo, en consonancia con las
8 diferentes EUR observadas entre años (Cuadro 6.7), los ajustes difirieron entre
9 experimentos. Estas tendencias estuvieron más asociadas a las condiciones del año y sitios
10 que a la descompactación. Los cultivos que mostraron una mayor eficiencia de conversión
11 de agua a biomasa mostraron a su vez una mayor eficiencia de conversión de radiación a
12 biomasa (Fig. 6.10 C). Sin embargo, una mayor captura de agua por el cultivo no
13 necesariamente se tradujo en una mayor captura o intercepción de radiación (Fig. 6.10
14 D). El crecimiento de la parte aérea del cultivo estuvo más relacionado con la oferta y
15 cantidad de agua consumida que de radiación. La biomasa aérea a cosecha mostró una
16 asociación positiva con la oferta total de agua en el ciclo ($r = 0,62$, $P < 0,0001$) y el agua
17 total evapotranspirada ($r = 0,51$, $P = 0,01$). La relación entre el rendimiento en grano y el
18 agua total disponible y evapotranspirada resultó aún más estrecha ($r = 0,80$ $P < 0,0001$; r
19 $= 0,73$ $P < 0,0001$, respectivamente). Las relaciones entre la biomasa aérea y el
20 rendimiento, y la radiación total incidente o la radiación interceptada resultaron menos
21 claras.



1
 2 **Figura 6.10** Relación entre: (A) productividad del agua y productividad de la radiación para la
 3 generación de grano (PA_Y-PR_Y); (B) productividad del agua y productividad de la radiación para
 4 la generación de biomasa (PA_B-PR_B); (C) eficiencia uso (conversión) del agua y eficiencia de uso
 5 (conversión) de la radiación (EUA-EUR); y (D) eficiencia de captura de agua (Et/Oferita Total) y
 6 eficiencia de captura de radiación (R int/Rs). Los símbolos vacíos representan los tratamientos
 7 descompactados con para-till (PTILL) en sitios de monocultura de soja (SJ, Δ) o rotados (ROT,
 8 ○); y los símbolos llenos los tratamientos T0, en SJ (▲) o en ROT (●), de los experimentos del
 9 año 1 y 2. Se indica la recta de regresión lineal para cada experimento, y sus respectivos
 10 coeficientes de ajuste.

11

12 6.4. Discusión

13 6.4.1. Respuesta del rendimiento a la descompactación

14

1 Los resultados del meta-análisis indican que a pesar de las múltiples ventajas de la
2 SD sobre la estructura y la matriz porosa del suelo (Strudley et al., 2008; Calonego y
3 Rosolem, 2010), la compactación del suelo puede estar actuando como una limitante para
4 los rendimientos del cultivo de soja en Molisoles de la región pampeana. El estado físico
5 superficial del suelo debería ser entonces considerado como un factor clave dentro de los
6 múltiples factores que contribuyen a la brecha a nivel nacional del 32% observada entre
7 los rendimientos alcanzables y los rendimientos actuales en el cultivo de soja (Aramburu
8 Merlos et al., 2015).

9 Del análisis regional surge que la descompactación mecánica permite incrementar
10 estos rendimientos (~25%; ~500 kg.ha⁻¹) en estos suelos en SD con elevado contenido de
11 limo en superficie. Estos niveles de respuesta son coincidentes con las respuestas al
12 subsolado de suelos documentadas en la revisión de Schneider et al. (2017) a nivel global
13 para suelos con restricciones al crecimiento de raíces (incrementos en el rendimiento
14 cercanos al 20%). Sin embargo, estos mismos autores han destacado el alto riesgo de
15 reducciones en rendimiento que presenta la descompactación de suelos con alto contenido
16 de limo. De acuerdo con estos autores, la descompactación en estos suelos de escasa
17 resiliencia colapsa la matriz porosa, favoreciendo procesos de re-compactación en el corto
18 plazo, menor infiltración de agua y restricciones en el crecimiento de raíces, afectando
19 los rendimientos de los cultivos posteriores a la labor. El meta-análisis de este capítulo
20 no coincide con este elevado riesgo: sólo un 8% de los casos descompactados presentaron
21 valores de rendimiento inferiores a los tratamientos T0. Posiblemente estas diferencias se
22 deban a los sistemas de producción analizados en la revisión de Schneider et al. (2017),
23 en los cuales predominan claramente suelos laboreados en forma continua, mientras que

1 el meta-análisis de este capítulo se centró en cambio en suelos en SD. La mayor
2 estabilidad de los agregados observados generalmente en estos sistemas (Álvarez y
3 Steinbach, 2009) respecto de suelos laboreados pudo haber otorgado mayor resiliencia a
4 los suelos con alto contenido de limo de la región pampeana, evitando el colapso de la
5 matriz porosa al menos en el ciclo del cultivo posterior a la labor.

6 Llamativamente, la respuesta a la descompactación en soja en los estudios analizados
7 resultó igual o superior a la de cultivos con metabolismo C4 y elevada eficiencia de uso
8 de recursos como el maíz (Mbava et al., 2020). Para este cultivo se han documentado
9 incrementos en el rendimiento asociados a la descompactación cercanos al 8% en suelos
10 de la región pampeana (revisión de Álvarez et al., 2019), y de entre 3-12% en otras
11 regiones productivas (Reeder et al. 1993; Sun et al. 2017; Feng et al. 2018; Wang et al.
12 2019; Zhou et al. 2019). En el meta-análisis de este capítulo, aún sin considerar los
13 experimentos de mayor respuesta al subsolado (Tesouro et al., 2006, con compactaciones
14 generadas por tráfico de maquinaria y densidad aparente entre 1.39-1.58 Mg.m⁻³ en
15 Argiudoles Vérticos de Buenos Aires), la descompactación mecánica aumentó en
16 promedio los rendimientos de soja en 368 kg. ha⁻¹ (P<0,0001), representando
17 aproximadamente un 12% de incremento promedio. Estas diferencias pueden deberse por
18 un lado al distinto sistema de raíces de ambos cultivos. La soja se caracteriza por un
19 sistema de raíz principal pivotante, mientras que el maíz tiene un sistema de raíces
20 fibrosas de distinto diámetro (Colombi et al, 2017). Esto le conferiría al maíz y a otras
21 gramíneas una mayor capacidad para colonizar y atravesar macro-poros en suelos
22 compactados (Colombi et al., 2017). Por otro lado, como mostraran los resultados del
23 Capítulo 3 y 4, la compactación puede afectar el crecimiento de raíces subsuperficiales,

1 así como la nodulación y actividad de los nódulos en soja, volviéndolo un cultivo sensible
2 a la presencia de impedancias físicas. Otros autores también han destacado la mayor
3 sensibilidad de otras leguminosas como poroto y arveja frente a distintos tipos de estrés
4 en el suelo respecto de gramíneas, dado su menor profundidad de enraizamiento, menor
5 densidad de raíces, y dependencia del proceso de FBN para la adquisición de nitrógeno
6 (Gregory et al., 1988). Una mayor profundidad de enraizamiento y mayor densidad de
7 raíces les permitiría a gramíneas como el maíz una mayor capacidad de aprovechar
8 recursos del subsuelo en suelos compactados respecto de la soja, y por lo tanto una menor
9 sensibilidad a la compactación y menor respuesta al subsolado.

10 Por otro lado, algunos estudios en cultivos como trigo (Sadras et al., 2005) han
11 observado que la descompactación puede aumentar a su vez la calidad de grano producido
12 (a partir de mayores contenidos de nitrógeno y proteína en grano). El contenido de
13 proteína en el grano de soja no fue analizado en los ensayos de descompactación de esta
14 tesis, pero los resultados de los ensayos controlados del Capítulo 4 sobre la nodulación y
15 actividad de nódulos hacen suponer que la compactación podría limitar la disponibilidad
16 de nitrógeno para el cultivo y por ende afectar la calidad de grano. La descompactación
17 mecánica podría entonces influir sobre la calidad del grano de soja. Se requieren estudios
18 que permitan analizar en mayor detalle los efectos de la compactación sobre la calidad de
19 grano de soja, así como los efectos sobre el contenido de proteína de grano por acción del
20 subsolado en suelos compactados.

21 De acuerdo con la segunda hipótesis planteada, y como se observa en la Figura 6.2,
22 la respuesta a la descompactación resultó más pronunciada en ambientes o condiciones
23 más restrictivas, en especial con rendimientos por debajo de 3000 kg ha^{-1} . Si bien las

1 causas de los menores rendimientos pueden ser múltiples y diferentes entre ambientes, es
2 probable que una característica general asociada a ambientes de baja productividad sea la
3 limitación a la expresión de la plasticidad vegetativa y reproductiva de soja. En los
4 capítulos anteriores se encontró que, aun cuando la compactación puede ejercer efectos
5 locales y temporales que restringen el crecimiento aéreo y subterráneo, muchos de estos
6 efectos se compensan al avanzar el ciclo cuando existe una adecuada disponibilidad y uso
7 de los recursos. Es esperable, entonces, que en los ambientes de bajos rendimientos estas
8 respuestas compensatorias se vean reducidas y, por lo tanto, el efecto de la
9 descompactación resulte en un significativo aumento del rendimiento. De la misma
10 manera se encontraron mayores respuestas a la descompactación con mayores niveles de
11 compactación inicial medida a través de la DAP (Cuadro 6.2). Esto sugiere que podría
12 encontrarse un nivel umbral de DAP que justifique la implementación de la práctica de
13 descompactación para obtener respuestas económicas en el rendimiento.

14 Sin embargo, y al contrario de lo esperado, la respuesta a la descompactación no fue
15 superior en suelos con menor contenido de arcilla (hipótesis b.2) y menores
16 precipitaciones (hipótesis b.4), sino en aquellos con mayor contenido de arcilla, asociados
17 a ambientes de mayor pluviometría (Cuadro 6.2). Es posible que bajo esas condiciones
18 en las que la porosidad de aireación es naturalmente reducida (Taboada y Micucci, 2006),
19 los cultivos se vean frecuentemente expuestos a eventos de anegamiento y anoxia, y la
20 descompactación haya permitido incrementar al menos temporalmente la macro-
21 porosidad, reducir estos efectos, y generar una mayor respuesta en los rendimientos
22 respecto de otros ambientes. Estos resultados siguen la línea de los estudios de
23 Bacigaluppo et al (2011), quienes observaron que los efectos del estado físico del suelo

1 sobre los rendimientos están fuertemente asociados por ejemplo a los niveles de
2 pluviometría de la campaña, y pueden resultar más pronunciados en años de excesos
3 hídricos. A su vez, las bajas pluviometrías y baja capacidad de retención de agua de suelos
4 con menor contenido de arcilla, pueden haber limitado los rendimientos tanto en suelos
5 compactados como descompactados en localidades de menor oferta hídrica, y explicar la
6 menor respuesta a la descompactación bajo esas condiciones. Estos resultados son
7 coincidentes con los estudios de Chamen et al. (2015), donde se observaron mayores
8 respuestas a estrategias orientadas a revertir los efectos de la compactación en suelos con
9 mayor contenido de arcilla. A su vez, y al contrario de lo esperado (hipótesis b.3), la
10 respuesta a la descompactación resultó mayor en los suelos con más materia orgánica.
11 Estos ambientes coincidieron con los suelos con mayor contenido de arcilla y mayor
12 pluviometría, aspectos que, como se mencionara anteriormente, podrían estar
13 condicionando la respuesta a la descompactación. El disturbio generado por la
14 descompactación puede también haber generado una mayor mineralización de la materia
15 orgánica, y una mayor disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno, necesario para
16 complementar la FBN, y de este modo favorecer la respuesta a la descompactación en
17 suelos con altos contenidos de materia orgánica. Los resultados del Capítulo 5 no
18 mostraron diferencias en los ensayos propios en cuanto a los niveles de nitrato a siembra
19 luego de descompactar, pero esta situación puede haber sido diferente en los otros ensayos
20 incluidos en el meta-análisis.

21 Las respuestas fueron también mayores frente a una historia de mayor intensidad de
22 cultivos previo a la labor de descompactación (Cuadro 6.2), rechazando lo propuesto en
23 la correspondiente hipótesis (b.5). Si bien el Capítulo 5 mostró menores cambios en las

1 propiedades físicas en sistemas más intensos, es posible que estas condiciones hayan
2 contado con una mayor estabilidad estructural, que le hayan conferido al suelo una mayor
3 resiliencia a estos suelos frente a la disrupción del sistema poroso y re-compactación
4 posterior observables luego del subsolado en suelos limosos (Schneider et al, 2017). Es
5 posible también que la respuesta se deba a posibles diferencias en los niveles de rastrojo
6 previo a las labores entre rotaciones de mayor y menor intensidad. Los resultados del
7 Capítulo 5, coincidentes con lo observado también por Díaz-Zorita (2000), mostraron que
8 las labores de descompactación pueden reducir la cobertura de rastrojo entre un 12-22%,
9 especialmente en sitios con menores niveles de cobertura de rastrojo inicial (coincidentes
10 a su vez con sitios de menor intensidad de rotaciones). La reducción de los niveles de
11 cobertura del suelo puede propiciar la formación de costras superficiales, favorecer
12 pérdidas de agua por escurrimiento y por evaporación directa desde el suelo, y esto podría
13 estar limitando la respuesta a la descompactación. Esto puede haber explicado una
14 respuesta limitada en sitios de menor intensidad, los cuales posiblemente hayan contado
15 con una menor cobertura de rastrojo previo a las labores. En cambio, condiciones de
16 mayor intensidad pueden haber mantenido elevados niveles de rastrojo aún luego de la
17 descompactación, y esto puede haber favorecido la mayor respuesta en esos sitios.

18 En el caso de los experimentos propios, no se observaron diferencias significativas
19 en el rendimiento al descompactar. La respuesta de las plantas a la compactación está
20 fuertemente asociada a la dinámica de humedad del suelo en el ciclo y al grado de
21 compactación experimentado (Håkansson y Lipiec, 2000; Lipiec y Hatano, 2003). Las
22 condiciones de adecuada oferta hídrica en ambos experimentos, particularmente durante
23 las etapas reproductivas, posiblemente evitaron que hubiese una mayor respuesta del

1 rendimiento y biomasa del cultivo a la descompactación del suelo, como observaron otros
2 autores en condiciones de elevada pluviometría (Andersen et al., 2013; Vallejos et al.,
3 2014). Las condiciones de siembra retrasada de los experimentos del año 2 y menor
4 duración del ciclo, en especial de la etapa R3-R6, pudieron haber contribuido también a
5 enmascarar aún más la respuesta del rendimiento a la descompactación en este
6 experimento.

7 Es posible también que las condiciones favorables de oferta hídrica en el período
8 reproductivo en el año 1 hayan permitido expresar la plasticidad fenotípica que
9 caracteriza a este cultivo en cuanto a su capacidad para compensar efectos de
10 desuniformidad espacial, temporal, retrasos en el establecimiento o disminuciones en la
11 producción de grano por planta sobre el rendimiento del cultivo (Egli, 1993; Vega y
12 Sadras, 2003; Andrade y Abbate, 2005). No obstante, la compactación generó una elevada
13 variabilidad de rendimientos en los sitios con mayor proporción de estructuras laminares
14 y menor cobertura inicial de rastrojo (sitios de SJ), que es necesario considerar. Las
15 plantas que crecieron en estas condiciones presentaron jerarquías más marcadas entre
16 plantas (observaciones visuales), y con frecuencia menores producciones individuales,
17 que generaron rendimientos mínimos más bajos a nivel de cultivo (Cuadro. 6.2) que en
18 otros tratamientos y sitios. Esta variabilidad puede, sin embargo, haber enmascarado la
19 significancia de los efectos asociados a la descompactación, observables al considerar un
20 mayor número de casos mediante el estudio de meta-análisis.

21

22 **6.4.2. Respuesta en la productividad del agua y radiación a la descompactación**

23

1 Distintos estudios han demostrado que la compactación y la formación de
2 estructuras masivas y laminares en especial en sistemas de escasa intensidad y
3 diversificación puede conducir a una menor infiltración (Lipiec y Hatano, 2003; Sasal et
4 al., 2006, 2010; Taboada et al., 2008; Álvarez et al., 2009 b), a un predominio de flujos
5 laterales en desmedro los flujos verticales de agua (Soracco et al., 2010) y a alteraciones
6 en los patrones de drenaje y dinámica del agua durante el ciclo de los cultivos (Sasal,
7 2012). La descompactación mecánica permitió reducir estos efectos. Esto se apreció
8 especialmente en la mayor recarga hídrica del perfil durante el período de abundantes
9 precipitaciones a partir de R4 en los experimentos del año 1 (Fig. 6.5 A), o a partir de las
10 precipitaciones de R5 en los experimentos del año 2 (Fig. 6.7 A). En los sitios de mayor
11 índice de intensificación (ROT), la menor presencia de estructuras laminares, los mayores
12 niveles de cobertura de rastrojo, y una posible mayor presencia de bioporos y canales
13 continuos y estables generados por raíces de gramíneas en la rotación, pueden haber
14 limitado los efectos de la compactación sobre el ingreso de agua, como han observado
15 otros autores (Calonego y Rosolem, 2010; Calonego et al., 2017), y generado menores
16 diferencias la recarga del perfil entre tratamientos compactados y descompactados .

17 Los experimentos también mostraron que a pesar de los elevados valores de
18 resistencia a la penetración en el horizonte superficial en los tratamientos compactados
19 ($> 1,5-1,6$ MPa, Sección 5.3, Resultados, Capítulo 5), las raíces extrajeron agua más allá
20 de 1,6 m en todos los tratamientos y sitios (Fig. 6.4). Aunque generalmente se considera
21 que valores de resistencia a la penetración de entre 1,5-2 MPa limitan la tasa de
22 elongación radical de la mayoría de los cultivos (Bengough et al., 2011), las raíces
23 presumiblemente atravesaron las capas compactadas a través de vías preferenciales como

1 bioporos y canales continuos característicos de la SD (Calonego y Rosolem, 2010). Aún
2 en los sitios de mayor compactación inicial, las plantas accedieron a los recursos de
3 estratos más profundos como se observó en otros estudios (Williams y Weill, 2004;
4 Colombi et al., 2016, 2017).

5 Aunque la compactación no limitó la exploración de horizontes más allá de los
6 estratos afectados, sí retrasó el avance del frente de extracción de agua, y presumiblemente
7 la profundización y proliferación de raíces en estratos profundos, como se observara en el
8 Capítulo 3. La descompactación permitió reducir estos efectos, y acelerar la
9 profundización de raíces. Uno de los principales hallazgos de este trabajo fue que este
10 retraso en la profundización puede mantenerse en el ciclo, y así para el inicio de las etapas
11 reproductivas, la profundidad de extracción de agua en suelos compactados fue por
12 ejemplo 40 cm menor que la de los tratamientos descompactados (Fig. 6.3). Una mayor
13 profundidad de enraizamiento en suelos descompactados puede implicar entonces un
14 mayor volumen de suelo explorado y, en principio, una mayor disponibilidad de agua para
15 el cultivo, particularmente en el período de elevada demanda hídrica y de mayor
16 relevancia para el rendimiento (R3-R6). Esa diferencia observada de hasta 40 cm de
17 profundización puede representar entre 50-70 mm de agua útil adicional para el cultivo
18 (considerando un rango medio de 0.13-0.17 mm agua útil.mm suelo⁻¹; según las
19 estimaciones de Damiano y Taboada, 2000; para distintos suelos de la región pampeana).
20 Los efectos de esta mayor exploración radical pueden ser mayores por ejemplo en
21 condiciones de régimen ústico o mayores restricciones de agua en el período crítico. Sin
22 embargo, como se discutiera también en el Capítulo 3, el efecto que pueda tener esta
23 mayor profundización y un acceso anticipado a los recursos del subsuelo sobre el

1 rendimiento en condiciones de producción, dependerá de las condiciones edafo-climáticas
2 exploradas por el cultivo (Vadez, 2014). En este sentido, el uso de modelos de simulación
3 que incorporen estos efectos (p.ej. CROPGRO, Boote et al., 1998; APSIM, McCown et
4 al., 1996) puede resultar una herramienta útil para identificar posibles ventajas o
5 desventajas de una mayor velocidad de profundización y exploración radical, de acuerdo
6 con las características ambientales.

7 Hasta donde podemos conocer, no existían hasta ahora estudios sobre el impacto
8 de la descompactación del suelo en SD en el cultivo de soja desde una perspectiva de
9 eficiencia de uso de recursos. De acuerdo con lo planteado, la descompactación permitió
10 aumentar no sólo el ingreso de agua, sino también la extracción de agua, y aumentó la
11 eficiencia de captura por el cultivo (hipótesis c.1). Estos hallazgos coinciden con lo
12 observado por Sadras et al. (2005) en trigo, y con los resultados del Capítulo 3, pero hasta
13 estos estudios no había evidencias de estos efectos en el cultivo de soja en SD en
14 condiciones de campo. Los resultados muestran que la compactación puede estar
15 limitando la profundización, el crecimiento o la capacidad de extracción de agua de las
16 raíces de soja en estratos subsuperficiales más allá del horizonte antrópico afectado, y que
17 estos efectos pueden ser aliviados a través de la descompactación mecánica.

18 Al contrario de lo esperado (hipótesis c.2), la radiación interceptada en el ciclo
19 y durante el período crítico resultó similar entre tratamientos compactados y
20 descompactados en los distintos experimentos. Si bien se esperaba que la compactación
21 restringiera la captura de radiación como se observara en algunos estudios en trigo (Sadras
22 et al., 2005; Andersen et al., 2013), y que esto actuase como limitante para la conversión
23 de agua evapotranspirada a biomasa, sólo se observaron reducciones en la eficiencia de

1 intercepción de luz muy temprano en el ciclo (Fig. 6.8). La elevada capacidad del cultivo
2 para generar ramificaciones, asegurar un índice de área foliar óptimo y compensar
3 estreses (Hintz et al., 1991; Haile et al., 1998), junto con los espaciamientos y densidades
4 utilizadas en los experimentos (0,35 m entre hileras, > 35 pl. m⁻²), podrían haber
5 contribuido a que la captura de radiación no resultase limitante para el crecimiento.

6 Al contrario de lo esperado (hipótesis c.3), la descompactación no alteró la
7 eficiencia de conversión de agua a biomasa (EUA), la eficiencia de conversión de
8 radiación (EUR), ni la partición a grano (IC). A partir de los resultados en estudios en
9 trigo en Molisoles de Dinamarca., Andersen et al. (2013) han hipotetizado que la
10 compactación puede posiblemente generar señales químicas desde las raíces, que limiten
11 la eficiencia de conversión de radiación en sus estudios. Otros estudios han informado
12 también que la compactación puede restringir en forma directa el crecimiento aéreo,
13 independientemente del nivel de humedad o crecimiento de raíces (Masle y Passioura,
14 1987; Beemster y Masle, 1996; Stirzaker et al., 1992; Whalley et al., 2006). En los
15 ensayos de campo de este capítulo no se encontraron evidencias de este efecto directo,
16 que podría haber limitado el crecimiento aéreo y la eficiencia de conversión aún con
17 adecuada disponibilidad hídrica en los suelos con impedancias físicas respecto de las
18 situaciones descompactadas. En concordancia con lo discutido por Sadras et al. (2005)
19 para trigo, en nuestras condiciones de campo en SD, donde las capas compactadas no
20 representaron más del 15% del volumen total de suelo aparentemente explorado por las
21 raíces, el rol de estos mecanismos directos parece tener escasa incidencia sobre la
22 producción de biomasa vegetativa o grano, o la eficiencia de conversión de recursos. El
23 crecimiento y rendimiento del cultivo de soja estuvieron, en líneas generales, más

1 relacionadas con la disponibilidad y captura de agua que con limitantes en la captura de
2 radiación, u otros posibles efectos directos. Sin embargo, se requieren estudios más
3 detallados que permitan descartar o no la importancia de estos posibles efectos directos o
4 señales en el cultivo de soja a lo largo de las distintas etapas del ciclo.

5 La productividad del agua y la productividad de la radiación estuvieron estrecha y
6 positivamente relacionadas, tanto para la producción de biomasa como para la producción
7 de grano. Los cultivos que aprovecharon de forma más eficiente el agua ofertada durante
8 la estación de crecimiento aprovecharon también de forma más eficiente la radiación
9 incidente, coincidiendo con lo observado en otros estudios entre estos factores (Caviglia
10 et al., 2004 b; 2013; Coll et al., 2012). Una mayor eficiencia de conversión de agua se
11 asoció a mayores eficiencias de conversión de radiación como se viera en otros estudios
12 (Caviglia et al., 2001; 2004 b). Sin embargo, estas tendencias estuvieron más asociadas
13 al sitio y experimento (Fig. 6.10) que a diferencias generadas por la descompactación
14 mecánica. Una menor captura de agua no necesariamente se tradujo en una menor captura
15 de radiación en los tratamientos compactados. Un menor ingreso de agua y una menor
16 evapotranspiración (i.e. menor eficiencia de captura de agua) podrían haber limitado el
17 área foliar y generado una menor intercepción de radiación, como observaran Sadras et
18 al. (2005) y Andersen et al. (2013) en trigo. Pero como se discutiera en el punto anterior,
19 la elevada oferta hídrica de ambos experimentos, la plasticidad aérea de la soja, sumado
20 al arreglo espacial del cultivo pudieron haber limitado los efectos sobre la intercepción
21 de radiación, a pesar de verse limitada la captura de agua.

22 Los experimentos permitieron también identificar algunos aspectos relevantes
23 para el manejo agronómico. En nuestras condiciones, la descompactación mecánica

1 generó grietas que: a) favorecieron la infiltración de agua por vías “preferenciales”
2 (Capítulo 5) y permitieron un mayor ingreso de agua pre-siembra y hacia el final del ciclo
3 (Fig. 6.5), y b) posibilitaron un crecimiento de raíces temprano en el ciclo por estas vías,
4 una mayor profundización de raíces y un mayor consumo de agua en estratos profundos.
5 Sin embargo, si bien al descompactar se fragmentaron estructuras masivas en unidades de
6 menor tamaño, no se mejoró la porosidad interna o densidad de los bloques fragmentados
7 (Capítulo 5), y parte del agua o nutrientes en el interior de los agregados pudieron haber
8 permanecido inaccesibles para el cultivo. A su vez, la descompactación generó
9 condiciones de falta de piso para el ingreso de maquinaria de siembra, en especial en el
10 año 2, de abundantes precipitaciones en octubre-noviembre. Estos efectos, sumados a la
11 remoción de cobertura de rastrojo, a la escasa residualidad de la práctica y a la tendencia
12 en algunas condiciones a la re-compactación posterior (Capítulo 5; Hamza y Anderson,
13 2005; Álvarez et al., 2009; Calonego et al., 2017), pueden limitar la adopción de la
14 descompactación mecánica en esquemas en SD continua sin otras prácticas
15 acompañantes. Algunos estudios de 10 años de duración han mostrado que, si bien el
16 subsolado puede mejorar las propiedades físicas y los rendimientos en los primeros años,
17 la estructura y los rendimientos de soja en el mediano y largo plazo tienden a presentar
18 mejores resultados en suelos en rotaciones de mayor diversidad e intensidad de cultivos e
19 inclusión de cultivos de cobertura (Calonego y Rosolem, 2010; Calonego et al., 2017).

20 Como se discutiera en el capítulo anterior, y destacaran también otros autores
21 (Hamza y Anderson, 2005; Álvarez, 2013), difícilmente sea posible solucionar el
22 problema de la compactación de suelos y el aumento en los rendimientos del cultivo de
23 soja, mediante una única estrategia. Para optimizar los resultados sobre suelos y cultivos,

1 las estrategias de corrección como la descompactación mecánica deberían contemplar los
2 factores edafo-climáticos analizados a lo largo de este y del anterior capítulo, y
3 posiblemente combinarse con prácticas de prevención de la compactación (Chamen et al.,
4 2015), como la inclusión de cultivos de altos aportes de residuos, el mantenimiento de la
5 cobertura del suelo, el control de tráfico agrícola y la minimización de la presión ejercida
6 sobre el suelo.

7 **6.4.Conclusiones**

8 De acuerdo con la primera hipótesis planteada (a), la descompactación mecánica
9 permite aumentar los rendimientos de soja en Molisoles compactados con alto contenido
10 de limo superficial en SD en un amplio rango de ambientes, principalmente en aquellos
11 sitios con menores rendimientos promedio. La magnitud de estos efectos estuvo
12 influenciada por el estado de compactación inicial, ambiente climático, características
13 texturales e historia agrícola previa a la labor. De acuerdo a lo esperado, la respuesta del
14 rendimiento a la descompactación resultó mayor en suelos con mayores niveles de
15 compactación inicial (hipótesis b.1). Sin embargo, y al contrario de lo planteado en las
16 siguientes hipótesis, la respuesta resultó menor en ambientes de menor contenido de
17 arcilla (hipótesis b.2), menor contenido de materia orgánica (b.3.), ambientes de menores
18 precipitaciones (b.4.) e historia agrícola previa de menor intensidad (b.5).

19 La descompactación permitió aumentar la disponibilidad de agua para el cultivo a
20 partir de un mayor ingreso de agua pre-siembra y durante el ciclo, aumentó el consumo
21 de agua especialmente en etapas vegetativas, y por ende su eficiencia de captura por parte
22 del cultivo (corroborando la hipótesis c.1). Sin embargo, la descompactación no aumentó

1 la intercepción de radiación (hipótesis c.2) ni la eficiencia de conversión de agua o
2 radiación a biomasa o su partición a grano (hipótesis c.3), por lo que se rechazan estas
3 hipótesis. Las mejoras en la captura de agua no se tradujeron directamente en un aumento
4 en la productividad del agua y radiación, por lo que se rechaza la hipótesis planteada
5 (hipótesis c.4).

6

Capítulo 7

Discusión y Conclusiones Generales

7. Discusión y Conclusiones Generales

7.1. Esquema racional de la Tesis

La SD es un componente clave para el desarrollo de modelos agrícolas sustentables (Huggins y Reganold, 2008; Kassam et al., 2015; Lal, 2015), a partir de sus efectos sobre el control de la erosión, conservación de la humedad edáfica, mejora de la estabilidad de los agregados del suelo, desarrollo y mantenimiento de porosidad vertical, disminución de escurrimientos y aumento de la infiltración de agua, atenuación de cambios en la temperatura, y fomento de la actividad microbiológica y de la meso-fauna del suelo, entre otros (Díaz-Zorita et al., 2002 a; Thomas et al., 2007; Lal et al., 2007; Cavalieri et al., 2009; Álvarez y Steinbach, 2009; Soane et al., 2012). A pesar de estas múltiples ventajas, existen múltiples evidencias de la ocurrencia de procesos de compactación en suelos en SD (Botta et al., 2006 a y b; Tolón-Becerra et al., 2011; Sasal, 2012; Álvarez et al., 2014; Fernández et al., 2015; Guimarães et al., 2017; Sasal et al., 2017; Sivarajan et al., 2018). Si bien se acepta que esta alteración de la estructura del suelo puede reducir los rendimientos de los cultivos (Sadras et al., 2005; Siczek y Lipiec, 2011), al presente, ha resultado incierto predecir el impacto de las compactaciones sobre el cultivo de soja en SD, o tomar decisiones tendientes a reducirlo.

La presencia y el grado de los procesos de compactación pueden estar asociados a las diferentes intervenciones antrópicas que atravesaron los suelos desde su ingreso al sistema de SD, y esto puede influir sobre los efectos sobre el cultivo. Es por ello, que el primer interrogante de esta tesis fue:

- *¿Cuál es el estado de la estructura en suelos en SD, de acuerdo con la historia agrícola, y particularmente cuán extendidos se encuentran los procesos de compactación?*

1 A partir de relevamientos de suelo a nivel regional en lotes de producción de la
2 Pampa Ondulada (Capítulo 2), se caracterizó el estado de la estructura del horizonte
3 antrópico, y en particular la presencia de compactaciones, de acuerdo con su historia
4 agrícola reciente en SD. Esta evaluación permitió contar con un diagnóstico de la
5 problemática de la compactación en SD bajo distintos manejos (Figura 7.1).

6 Realizado este diagnóstico, se avanzó a responder el segundo interrogante de la
7 tesis, que fue:

8 • *¿Cómo afecta la compactación de suelos en SD a los rendimientos y utilización*
9 *de agua en el cultivo de soja?*

10 La respuesta a esta pregunta se centró en el estudio de procesos determinantes del
11 crecimiento, del rendimiento y del aprovechamiento de recursos. De esta forma, el
12 análisis de los efectos sobre el cultivo (Figura 7.1) se basó en evaluar la profundización,
13 crecimiento, y patrones de extracción de agua de las raíces (Capítulo 3), y sobre la
14 nodulación y actividad de esos nódulos (Capítulo 4), mediante experimentos controlados
15 con estudios a nivel de planta y de tejidos.

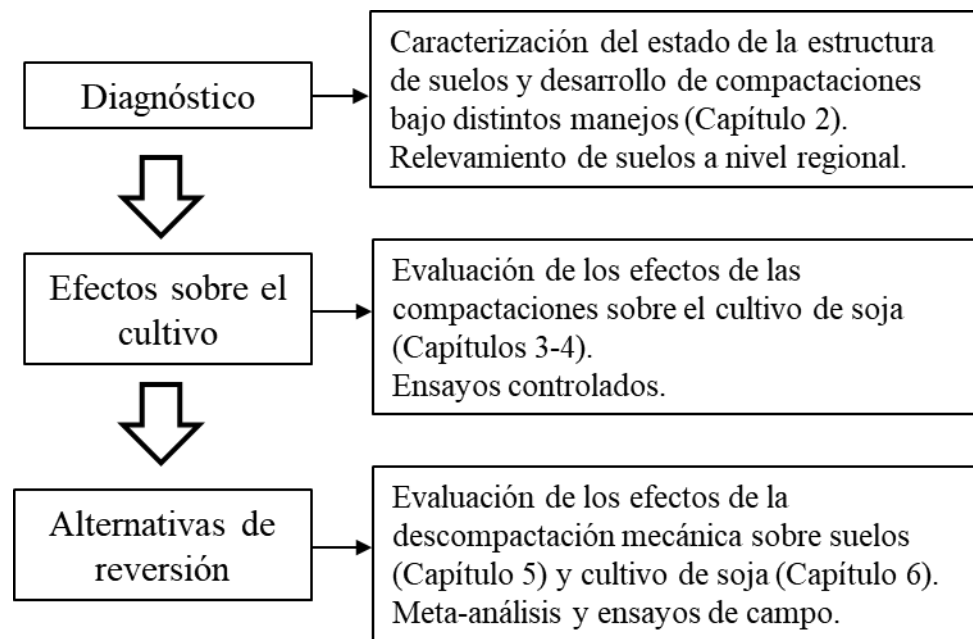
16 Finalmente, y frente a la evidencia de que existen efectos adversos de la
17 compactación sobre la utilización de agua y el crecimiento en el cultivo de soja, se avanzó
18 sobre el tercer interrogante de la tesis:

19 • *¿Cómo pueden remediarse los efectos de la compactación sobre el cultivo de*
20 *soja?*

21 Mediante un meta-análisis a nivel regional, y experimentos de campo a nivel de
22 cultivo, se analizó la efectividad de intervenciones mecánicas (descompactación) sobre
23 su reversión (Figura 7.1). Se analizaron los cambios que éstas generaron sobre las
24 propiedades físicas de los suelos (Capítulo 5), y sobre el rendimiento y aprovechamiento

1 de agua por el cultivo de soja (Capítulo 6), identificando los factores ambientales que
 2 pueden estar condicionando estas respuestas.

3 Este esquema racional de la tesis (Figura 7.1) será la base para la integración y
 4 discusión de resultados desarrolladas en este capítulo.



5

6

Figura 7.1 Esquema racional de esta tesis

7 7.2. Contraste de hipótesis y análisis integral

8 7.2.1. Diagnóstico del problema

9 El Capítulo 2 mostró que la compactación de suelos, en especial a nivel
 10 subsuperficial, parece ser un proceso generalizado en suelos agrícolas en SD con elevado
 11 contenido de limo como los de la Pampa Ondulada. Los resultados de esta tesis
 12 coincidieron con lo observado por Novelli et al. (2011; 2013) y Miglerina et al. (2000) en
 13 otros Molisoles en SD, en cuanto a que secuencias de cultivos más intensas y diversas
 14 favorecieron una mayor acumulación superficial del C, y una mayor estratificación del
 15 COS. También coincidieron con lo observado por Sasal (2012) y Sasal et al. (2017) en
 16 cuanto a la disminución de tipos estructurales laminares asociada a rotaciones más

1 intensas. Sin embargo, la intensidad de cultivos no evitó el desarrollo de compactaciones
2 a nivel subsuperficial, en contraste con las reducciones en la resistencia mecánica o
3 densidad aparente observadas en sistemas bajo labranza (Chan y Heenan, 1993) o en SD
4 en suelos tropicales (Calonego y Rosolem, 2010) a partir de la inclusión de rotaciones
5 más intensas o con cultivos de cobertura. Esto implica que las características
6 mineralógicas de los suelos analizados en este capítulo, con alto contenido de limo, les
7 confieren una elevada susceptibilidad a la compactación como observaran otros estudios
8 (Hamblin y Davies, 1977; Alakukku 1998; Díaz Zorita y Grosso, 2000; Álvarez et al.
9 2014; Sasal et al., 2017 a y b; Boizard et al., 2017) que no parece ser compensado ni
10 modulado por el mayor aporte de carbono de una secuencia agrícola más intensa.

11 De este modo, la hipótesis planteada en el Capítulo 2, proponiendo que “*Una mayor*
12 *intensidad de cultivos en la rotación (i.e. mayor tiempo de ocupación) permite aumentar*
13 *los aportes de carbono, aumentar los niveles de carbono orgánico total y particulado del*
14 *suelo, disminuir la proporción de estructuras laminares y masivas; y evitar el desarrollo*
15 *de compactaciones*”, no puede ser aceptada.

16 Únicamente las situaciones con pasturas presentaron condiciones físicas distintivas
17 con respecto a otras rotaciones, y más cercanas las observadas en las condiciones cuasi-
18 prístinas de referencia, en cuanto a los tipos estructurales presentes y parámetros como la
19 resistencia a la penetración. Una actividad radical continua como la que se produce en
20 ciclos de pasturas perennes puede promover la agregación a través de la acción directa de
21 las raíces (fenómeno de “*binding*” o “enredado”, Oades, 1984; Jastrow et al., 1998), de la
22 ocurrencia de ciclos de humedecimiento y secado más frecuentes (Reid y Goss, 1982;
23 Taboada et al., 2004), o de mayores aportes de rizodeposiciones y exudados (Poeplau,
24 2016) que favorecen la unión de agregados y partículas de menor tamaño (proceso de

1 “pegado” o “*bonding*”, Oades, 1984; Gregory et al., 2013), y de este modo revertir o
2 aliviar los procesos de compactación en estos suelos limosos.

3 **7.2.2. Efectos de la compactación sobre el cultivo de soja**

4 Las compactaciones superficiales pueden afectar el crecimiento de raíces, la
5 extracción de agua y la producción de biomasa aérea y grano en el cultivo de soja
6 creciendo en suelos sin limitaciones físicas en profundidad (Capítulo 3). Uno de los
7 principales hallazgos de esta tesis fue que la compactación afectó no sólo a las raíces
8 directamente expuestas, sino al crecimiento y extracción de agua del sistema radical en su
9 conjunto. El crecimiento de raíces de soja puede ser aún más sensible que el de otras
10 especies frente a la presencia de impedancias físicas, habiéndose observado en este
11 capítulo restricciones en el crecimiento radical a niveles de resistencia a la penetración
12 (1,5-1,75 MPa) inferiores a los de cultivos como maní (umbral de 1,91-2,0 MPa; Dexter,
13 1987; Bengough et al., 2011), arveja (umbral de 2,03 MPa; Dexter, 1987), o maíz (umbral
14 de 2,0 MPa; Veen y Boone, 1990; Bengough et al., 2011). Si bien no se encontró un
15 crecimiento compensatorio de las raíces de las capas no afectadas por la compactación,
16 como en otras especies (Mirleau-Thebaud et al., 2016; Bingham y Bengough, 2003;
17 Pfeifer et al. 2014; Montagu et al., 2001), se observó un incremento en la capacidad de
18 absorción de agua por unidad de densidad de longitud de raíz. Mecanismos
19 compensatorios en la capacidad de absorción de agua o nutrientes frente a reducciones en
20 la cantidad de raíces, han sido documentados en cultivos como arroz (Hasegawa et al.,
21 1982), poroto (Guo et al., 2007) y trigo (Nosalewicz y Lipiec, 2014), o en frutales bajo
22 riego deficitario (Chai et al., 2016; Dara et al., 2015; Leib et al., 2006), pero no habían
23 sido observados en soja. Estos mecanismos parecen tener limitaciones y no consiguieron
24 mantener niveles óptimos de absorción de agua cuando la densidad de raíces disminuyó
25 por debajo de determinados valores ($< 0,1 \text{ cm raíz cm}^{-3}$ de suelo). Por lo tanto, puede

1 especularse que factores que limiten el tiempo de crecimiento del sistema de raíces, como
2 la duración del ciclo (Dardanelli et al., 2004) o condiciones ambientales más limitantes
3 (p.ej. elevada demanda atmosférica como en el experimento 2), pueden reducir la
4 expresión de esta compensación, incrementando, consiguientemente, el impacto de la
5 compactación superficial sobre la absorción de agua.

6 De este modo, la primera hipótesis planteada en el Capítulo 3, proponiendo que “*La*
7 *compactación del horizonte superficial reduce la extracción de agua por alteraciones en*
8 *el crecimiento de raíces, no sólo del horizonte afectado sino también en el resto del perfil*
9 *de suelo subyacente, y esto reduce el crecimiento aéreo de las plantas que crecen en*
10 *suelos compactados*”, es aceptada.

11 Bajo condiciones de subsuelos arcillosos, con limitaciones físicas en profundidad,
12 el crecimiento de raíces resultó restringido, independientemente del nivel de
13 compactación superficial, posiblemente debido a niveles subóptimos de macro-porosidad
14 y difusión de oxígeno hacia las raíces en los estratos del subsuelo (Mc Kenzie y Mc
15 Bratney, 2001; Lapen et al., 2004; Wilson et al., 2013). Aún en las situaciones sin
16 compactación, las plantas que crecieron con subsuelos arcillosos tuvieron una densidad
17 de longitud de raíces inferior al umbral de $0,1 \text{ cm raíz cm}^{-3}$ de suelo y, por lo tanto, estos
18 subsuelos resultaron una limitante generalizada, enmascarando, aun si se hubieran
19 producido, los efectos de la compactación superficial.

20 Por lo tanto, la segunda hipótesis de este capítulo, proponiendo que “*Los efectos de*
21 *la compactación sobre el crecimiento de raíces, extracción de agua, y crecimiento aéreo*
22 *serán mayores en suelos con limitaciones en profundidad*”, no puede ser aceptada a la luz
23 de los resultados.

24 Esta tesis también permitió explorar otros efectos de la compactación en el cultivo
25 de soja, vinculados a la nutrición nitrogenada: la nodulación y actividad de nódulos

1 (Capítulo 4.) La compactación superficial redujo la cantidad y la masa de nódulos totales
2 por planta en suelos sin limitaciones en profundidad, coincidiendo con lo encontrado en
3 otros estudios (Buttery et al., 1998; Paredes et al., 2008; Siczec y Lipiec, 2011). Pero estas
4 respuestas se observaron no solo en la región afectada por la compactación sino también
5 en raíces no expuestas directamente. De manera similar, la compactación afectó la
6 actividad de los nódulos de las raíces superficiales directamente afectadas, como
7 observaron otros estudios (Siczec y Lipiec, 2011), pero también se redujo el contenido de
8 leghemoglobina de los nódulos de las raíces subsuperficiales, no expuestas directamente
9 a las impedancias físicas.

10 Estos resultados dan indicios de que las impedancias físicas pueden generar una
11 respuesta de tipo sistémica en el sistema de fijación simbiótica. Se ha propuesto que las
12 condiciones de estrés a corto plazo, como por ejemplo una sequía transitoria, produce una
13 inhibición local de la FBN mientras que un estrés prolongado o condiciones permanentes
14 del suelo, como acidez o salinidad, conducen a respuestas generalizadas o sistémicas
15 (Larrainzar et al., 2014). Por lo tanto, siendo la compactación superficial una restricción
16 permanente a lo largo del ciclo, parece esperable una respuesta sistémica sobre la
17 cantidad, tamaño y actividad de los nódulos. No obstante, estas respuestas no habían sido
18 documentadas hasta el presente.

19 Finalmente, al igual que lo observado para el crecimiento de raíces, la presencia de
20 subsuelos arcillosos en profundidad enmascaró posibles diferencias en nodulación
21 asociadas a la compactación. Los resultados permitieron entonces aceptar la primera
22 hipótesis planteada en este capítulo: *“La compactación del horizonte superficial reduce
23 la nodulación no sólo del horizonte afectado sino también en el resto del perfil de suelo”*.
24 Sin embargo, debe rechazarse la segunda hipótesis, *“los efectos de la compactación sobre*

1 *la nodulación superficial y subsuperficial fueron menos marcados en suelos con*
2 *restricciones en profundidad”.*

3 **7.2.3. Alternativas de reversión: descompactación mecánica**

4 Frente a la evidencia de los efectos negativos de la compactación sobre el cultivo de soja,
5 en esta tesis se evaluó cómo estrategias de manejo como la descompactación mecánica
6 podrían revertir los impactos negativos de la compactación sobre las propiedades físicas
7 del suelo (Capítulo 5) y sobre el rendimiento del cultivo y aprovechamiento de agua
8 (Capítulo 6).

9 En los experimentos y situaciones evaluadas en el Capítulo 5 se encontró que la
10 descompactación mecánica con para-till fue capaz de remover en el corto plazo las
11 impedancias ubicadas entre los 0,1 y los 0,2 m de profundidad, disminuyendo los valores
12 de resistencia a la penetración por debajo de los umbrales que limitan el crecimiento de
13 raíces (Bengough et al., 2011; Hakansson y Lipiec, 2000; Hamza y Anderson, 2005). La
14 magnitud de estos cambios resultó mayor cuanto más elevados fuesen los niveles de
15 resistencia a la penetración iniciales. Estos resultados permiten aceptar la primera
16 hipótesis del Capítulo 5 (“*La descompactación mecánica permite reducir los niveles de*
17 *resistencia a la penetración, y aumentar la infiltración y la capacidad de aireación en*
18 *suelos previamente compactados*”). También permiten aceptar la hipótesis referente a
19 que “*La magnitud de estos será mayor en ambientes restrictivos y/o con mayor*
20 *susceptibilidad a la compactación, incluyendo suelos con mayores niveles de*
21 *compactación inicial*”. Sin embargo, se esperaba que la respuesta a la descompactación
22 fuera mayor en suelos con mayor contenido de limo, dada la elevada susceptibilidad de
23 estos suelos a compactarse (Alakukku 1998; Díaz Zorita y Grosso, 2000). Los resultados
24 mostraron que la respuesta en las propiedades físicas estuvo más relacionada a los
25 contenidos de arena y arcilla que a los contenidos de limo. Como se explicara en el

1 Capítulo 5, en los casos analizados en el meta-análisis, las variaciones relativas en los
2 niveles de arcilla y arena fueron mayores que en los contenidos de limo. Los suelos con
3 mayor contenido de arcilla y menor contenido de arena fueron los que presentaron
4 menores respuestas en las propiedades físicas a la descompactación. La menor
5 susceptibilidad de este tipo de suelos debe aún explorarse, pero es posible que sea un
6 efecto indirecto, asociado a su mayor contenido de materia orgánica (Quiroga et al., 1999;
7 Díaz-Zorita y Grosso, 2002; Spoor et al., 2003). La mayor capacidad de expansión-
8 contracción, y por lo tanto reestructuración, de los suelos con mayor contenido de arcilla
9 pueden también haber generado una menor susceptibilidad a compactarse (Cerisola et al.,
10 2005) y estar explicando parte de esta respuesta a la descompactación. Por lo tanto, la
11 hipótesis referente a que *“La magnitud de estos será mayor en ambientes restrictivos y/o*
12 *con mayor susceptibilidad a la compactación, incluyendo suelos con mayor contenido de*
13 *limo superficial”*, no puede ser aceptada.

14 A su vez, la respuesta a la descompactación mecánica estuvo inversamente
15 relacionada a los niveles de materia orgánica, y al nivel de intensificación de la rotación
16 previo a la labor: a mayor nivel de materia orgánica, y a mayor intensidad de cultivos,
17 menor respuesta. Mayores niveles de materia orgánica y mayores aportes de residuos
18 como los que se observan en sistemas más intensos pueden reducir la susceptibilidad de
19 los suelos a la compactación, a partir de los efectos de los materiales orgánicos lábiles
20 sobre la estabilidad de los agregados (Zhang, 1994; Ball et al., 2000; Hamza y Anderson,
21 2005; Chamen et al., 2015) y a los efectos protectores que confieren mayores niveles de
22 residuos en superficie sobre la presión ejercida por el tráfico de maquinaria (Li et al.,
23 2001; Alakukku et al., 2003; Chamen et al., 2003). Por lo tanto, estos resultados permiten
24 aceptar las hipótesis referentes a que *“La magnitud de estos será mayor en ambientes*
25 *restrictivos y/o con mayor susceptibilidad a la compactación, incluyendo suelos con*

1 *menor contenido de materia orgánica (hipótesis b.3); y condiciones de menor intensidad*
2 *agrícola” (hipótesis b.4).*

3 Los experimentos de campo de esta tesis encontraron que la resistencia a la
4 penetración en los tratamientos descompactados regresó a los valores iniciales entre los
5 12 y los 18 meses de realizada la práctica. Esta respuesta era esperable de acuerdo con
6 evidencias previas (Spoor et al., 2003; Bonel et al., 2004; Hamza y Anderson, 2005;
7 Spoor, 2006; Álvarez et al., 2009 a), pero se esperaba que la perdurabilidad de la práctica
8 fuera mayor en situaciones con mayor intensidad agrícola. A través de los mecanismos
9 antes mencionados, los mayores aportes de residuos y compuestos orgánicos lábiles
10 podrían haber evitado o retrasado la re-compactación del suelo. Sin embargo, la
11 perdurabilidad de los efectos de la descompactación no estuvo asociada a la historia
12 agrícola previa (ensayos propios). Esto coincide, en términos generales, con lo discutido
13 en la sección de 7.2.1. en cuanto a que la historia agrícola por sí sola no evita el desarrollo
14 de compactaciones. De manera similar, parecería que estos efectos superficiales tampoco
15 influyen en la perdurabilidad de la descompactación física, al no influir de manera
16 significativa en estabilizar las propiedades del suelo. Al menos con los niveles de
17 intensidad de rotaciones analizados, en secuencias puramente agrícolas. Por lo tanto, la
18 tercera hipótesis del Capítulo 5 (*“La historia agrícola previa a la labor afecta la*
19 *respuesta en las propiedades físicas del suelo a la descompactación mecánica, así como*
20 *la perdurabilidad de estos efectos; la perdurabilidad de la práctica será mayor en*
21 *esquemas de mayor intensidad, al disminuir la susceptibilidad a la re-compactación*
22 *posterior a la labor”*) no puede ser aceptada.

23 En el análisis regional descrito en el Capítulo 6, se encontró que la descompactación
24 mecánica incrementó los rendimientos lográndose mejoras, en promedio, de 500 kg.ha⁻¹.
25 lo que representa aproximadamente un 25% de incremento. Si bien estos niveles de

1 respuesta son coincidentes con estudios previos (Schneider et al., 2017), esta tesis
2 permitió, además, caracterizar los factores asociados a la variabilidad de la respuesta, que
3 estuvo entre 1670 kg.ha⁻¹ de incremento y 333 kg.ha⁻¹ de reducción. Por un lado, se
4 encontró que el incremento en rendimiento ante descompactación fue mayor en ambientes
5 más restrictivos, caracterizados por rendimientos inferiores a 3000 kg ha⁻¹. Si bien las
6 causas de los menores rendimientos pueden ser múltiples y diferentes entre ambientes, es
7 probable que la compactación alivie la limitación a la expresión de la plasticidad
8 vegetativa y reproductiva de soja en ambientes de baja productividad. De alguna manera,
9 es posible que en estos ambientes la descompactación haya mejorado la tasa de
10 crecimiento del cultivo que define el número y el peso de los granos de soja (Kantolic et
11 al., 2013). Incluso en el caso de los experimentos propios, con elevada oferta de recursos
12 en el período crítico, se observó una menor desuniformidad del stand al descompactar
13 que generó una menor variabilidad y rendimientos mínimos más altos a nivel de cultivo.
14 Por lo tanto, la primera hipótesis del Capítulo 6 referente a que “*La descompactación
15 mecánica permite aumentar los rendimientos de soja en Molisoles compactados en SD*”
16 puede ser aceptada.

17 De la misma manera que se encontraron mayores respuestas a la descompactación en
18 los ambientes con menores rendimientos, se encontraron mayores respuestas en sitios con
19 mayores niveles de compactación inicial (mayor DAP). Los niveles de compactación
20 pueden haber estado actuando como limitantes al crecimiento y generación de granos en
21 esos ambientes a través de los mecanismos observados en los Capítulo 3 y 4. La
22 descompactación permitiría aliviar estos efectos en esos casos y aumentar los
23 rendimientos. La hipótesis planteada referente a que “*La respuesta del rendimiento de
24 soja a la descompactación mecánica de será mayor en ambientes restrictivos y/o con
25 mayor susceptibilidad a la compactación, incluyendo suelos con mayores niveles de*

1 *compactación inicial*” (hipótesis b.1) es por lo tanto aceptada. Sin embargo, y al contrario
2 de lo que ocurrió con las propiedades físicas del suelo estudiadas en el Capítulo 5, las
3 respuestas en rendimiento fueron más pronunciadas en los cultivos creciendo en suelos
4 arcillosos, con altos niveles de materia orgánica, en ambientes de mayores
5 precipitaciones, y de mayor intensidad de rotaciones. Es posible que bajo condiciones en
6 las que la porosidad de aireación es naturalmente reducida como en suelos arcillosos
7 (Taboada y Micucci, 2006), en especial en ambientes de alta pluviometría, los cultivos se
8 vean frecuentemente expuestos a eventos de anegamiento y anoxia. La descompactación
9 puede haber incrementado al menos temporalmente la macro-porosidad por encima de
10 niveles críticos ($>10\%$), reducir estos efectos, y generar una mayor respuesta en los
11 rendimientos respecto de otros ambientes. Los resultados sugieren entonces que las
12 respuestas del rendimiento a la descompactación no resultan directamente de los cambios
13 en las condiciones edáficas sino en las consecuencias que éstos tienen sobre el
14 crecimiento de las plantas de acuerdo a las características ambientales. En particular, los
15 resultados ponen en evidencia que estas consecuencias están relacionadas con la
16 utilización del agua. Por un lado, los suelos con mayor contenido de arcilla y materia
17 orgánica estuvieron asociados a ambientes de mayor pluviometría y, por lo tanto, el
18 impacto de la descompactación en favorecer el ingreso del agua al perfil puede tener un
19 cambio sustancial en estos casos. En cambio, las menores pluviometrías y baja capacidad
20 de retención asociadas con los suelos con mayor contenido de arena y menor contenido
21 de arcilla, pueden haber limitado los rendimientos tanto en suelos compactados como
22 descompactados. De manera similar, una mayor intensificación agrícola podría estar
23 relacionada a mayores niveles de rastrojo, y un mejor ingreso del agua en el perfil, al
24 fomentar la acumulación de carbono y la agregación del suelo (Novelli et al, 2017). Estos

1 efectos pueden haberse sumado a los efectos favorables de la descompactación sobre el
2 ingreso de agua, explicando la mayor respuesta en estas condiciones.

3 A su vez, el disturbio generado por la descompactación puede también favorecido
4 una mayor mineralización de la materia orgánica, y una mayor disponibilidad de
5 nutrientes como el nitrógeno, necesario para complementar la FBN, y de este modo haber
6 favorecido la respuesta a la descompactación en suelos con altos contenidos de materia
7 orgánica. Por lo tanto, las hipótesis referentes a que “*La respuesta del rendimiento a la*
8 *descompactación será mayor en suelos menor contenido de arcilla (hipótesis b.2), menor*
9 *contenido de carbono orgánico (hipótesis b.3), ambientes de menores precipitaciones*
10 *(hipótesis b.4) e historia agrícola previa de menor intensidad (hipótesis b.5)”* no son
11 aceptadas.

12 El rol clave del agua como modulador de las respuestas a la descompactación quedó
13 evidenciado a través de las determinaciones que se hicieron en los experimentos propios
14 del Capítulo 6. La descompactación de suelos aumentó la recarga hídrica del perfil
15 posiblemente a través de la eliminación de estructuras laminares y masivas que restringen
16 el ingreso de agua al suelo (Sasal, 2012). A su vez, los suelos compactados retrasaron la
17 profundización de raíces y la extracción de agua a profundidad; la descompactación
18 permitió reducir este efecto, permitiendo un mayor volumen de suelo explorado que
19 representó una mayor captura de agua por parte del cultivo, particularmente en el período
20 de elevada demanda hídrica y de mayor relevancia para el rendimiento (R3-R6). Estos
21 resultados son coincidentes con lo observado por Sadras et al. (2005) en trigo. Si bien
22 estas mejoras no repercutieron en los rendimientos de los experimentos de esta tesis, con
23 elevada oferta hídrica durante el período crítico, es de esperar que su impacto sea decisivo
24 en ambientes con mayores limitaciones hídricas durante este período, en los que se torna
25 relevante capturar la mayor parte del agua provista por precipitaciones, y aprovechar agua

1 almacenada en estratos profundos. La hipótesis referente a que “*La descompactación*
2 *mecánica de suelos en SD permite un aumento en la disponibilidad de agua para el*
3 *cultivo, y de la eficiencia de captura de este recurso por el cultivo*” (hipótesis c.1), es
4 aceptada.

5 Si bien la descompactación modificó el crecimiento de las raíces y, por lo tanto,
6 la captura de agua, no se observaron mejoras en la eficiencia de conversión de agua a
7 biomasa (EUA) ni la partición a grano (IC), ni se modificaron la captura y uso de la
8 radiación. Estos resultados coinciden con lo hallado en el experimento realizado bajo
9 condiciones controladas (Capítulos 3 y 4) donde se encontró el crecimiento de las raíces
10 se afecta más que el de la parte aérea frente a cambios en la compactación. En el caso de
11 los cultivos de los experimentos del Capítulo 6, sólo se observaron reducciones en la
12 eficiencia de intercepción de luz muy temprano en el ciclo, mientras que la radiación
13 interceptada durante el período crítico resultó similar entre tratamientos compactados y
14 descompactados. La elevada capacidad del cultivo de soja para generar ramificaciones,
15 asegurar un índice de área foliar óptimo y compensar estreses (Hintz et al., 1991; Haile
16 et al., 1998), junto con los espaciamientos y densidades utilizadas en los experimentos
17 (0,35 m entre hileras, > 35 pl. m⁻²), podrían haber contribuido a que la captura de
18 radiación no resultase limitante para el crecimiento aéreo y el rendimiento. De esta forma,
19 no pueden aceptarse las hipótesis referentes a que “*La descompactación mecánica de*
20 *suelos en SD permite un aumento en la captura o intercepción de radiación por el cultivo*
21 *(hipótesis c.2); un aumento en la eficiencia de conversión de agua a biomasa y grano a*
22 *partir de una mayor radiación interceptada*” (hipótesis c.3). Como se mencionara antes,
23 en las condiciones de elevada oferta hídrica y óptima intercepción en el período crítico,
24 los aumentos en la captura de agua no necesariamente se tradujeron en mayores
25 rendimientos o una mayor productividad del agua y radiación. Por lo tanto, si bien se

1 puede aceptar uno de los mecanismos propuestos para comprender el efecto de la
2 descompactación sobre el cultivo (un aumento en la disponibilidad de agua para el
3 cultivo, y de la eficiencia de captura de este recurso por el cultivo; hipótesis c.1), a partir
4 de los resultados bajo las condiciones estudiadas, no puede aceptarse la hipótesis de que
5 *“La descompactación permite aumentar la productividad del agua y radiación en el*
6 *cultivo de soja en condiciones de campo”* (hipótesis c.4).

7 **7.3. Integración: Modelo general de la compactación**

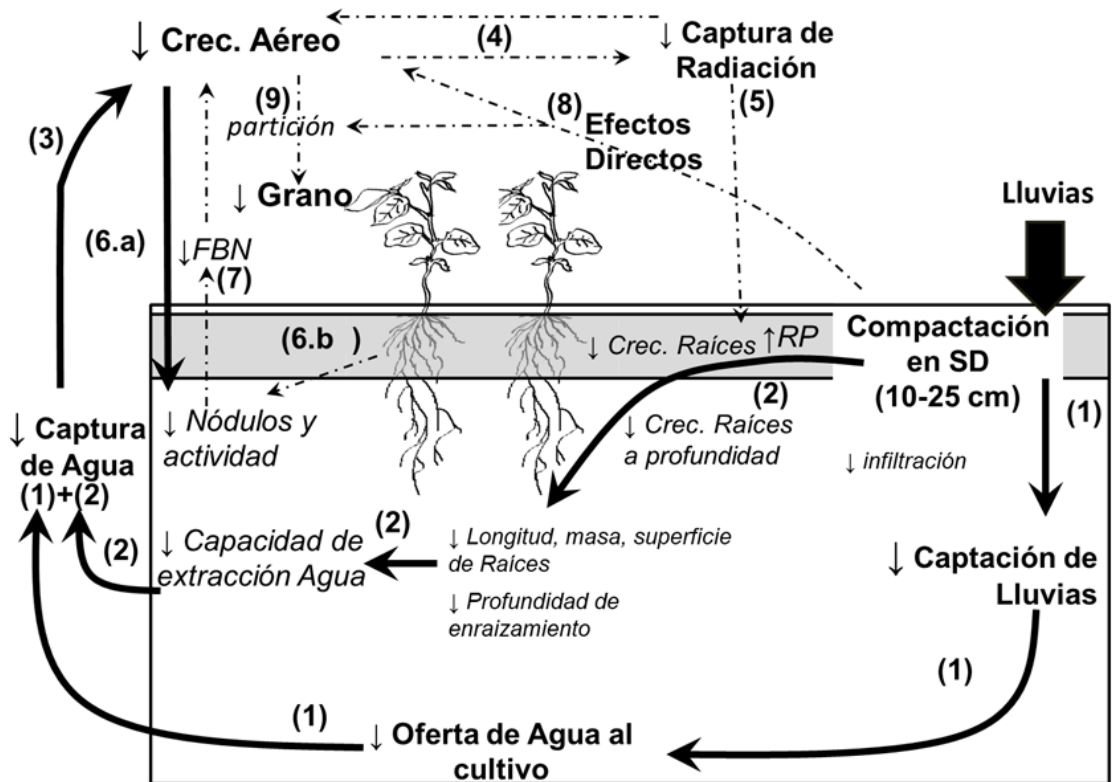
8 Integrando los resultados de los ensayos de campo y controlados, y del meta-
9 análisis, esta tesis permitió avanzar el entendimiento de los mecanismos mediante los
10 cuales la compactación de suelos en SD puede restringir el aprovechamiento de agua en
11 el cultivo de soja. Estos distintos mecanismos están representados en la Figura 7.2. Por
12 un lado, al reducir la velocidad de infiltración, reduce también la captación de lluvias
13 antes y durante el ciclo del cultivo, y por ende la oferta total de agua capaz de ser utilizada
14 (mecanismo 1 en la Figura 7.2). Por otro lado, la compactación incrementa la resistencia
15 a la penetración (RP), y por ende altera la capacidad de las raíces para crecer y atravesar
16 los estratos subsuperficiales del suelo; esto genera una menor proliferación en el horizonte
17 antrópico, un retraso en la profundización, y también una menor proliferación en los
18 estratos más profundos que, incluso puede limitar la profundidad máxima de
19 enraizamiento (vía 2 Fig. 7.2).

20 Estos efectos repercuten sobre la capacidad de extracción de agua del cultivo.
21 Una menor transpiración de agua asociada a una menor disponibilidad en el perfil de
22 suelo y a una menor capacidad de absorberla por las raíces, puede entonces limitar el
23 crecimiento aéreo de las plantas (vía 3 Fig. 7.21). La presencia de un mecanismo de
24 compensación, asociada a la capacidad de incrementar la absorción de agua por unidad
25 de raíz, influye en que los efectos de la compactación sobre el crecimiento aéreo de las

1 plantas y, por lo tanto, de su rendimiento, sea menor que el efecto sobre el crecimiento de
2 las raíces. Este mecanismo de compensación puede ser total o parcial, dependiendo de la
3 demanda atmosférica y, probablemente, de la cantidad de agua en el subsuelo.

4 Un menor crecimiento aéreo podría limitar el área foliar para interceptar radiación,
5 y esto a su vez limitar la disponibilidad de foto-asimilados para continuar el crecimiento
6 aéreo (vía 4, Fig. 7.21) y el crecimiento de raíces (vía 5 Fig. 7.21). Sin embargo, en
7 condiciones de campo, y con condiciones de oferta de agua relativamente favorables
8 como los ensayos de esta tesis, existen mecanismos compensatorios en parte aérea que
9 pueden permitir que la compactación no restrinja significativamente la interceptación de
10 radiación durante el ciclo, en especial en período en el que se define su rendimiento. La
11 compactación, además, afecta la cantidad y actividad del sistema de nódulos, no sólo en
12 la región afectada por la compactación sino también en profundidad (vía 6, Fig. 7.2). Esto
13 parece ser una respuesta de tipo sistémica, generada por una menor disponibilidad de
14 asimilados (menor crecimiento parte aérea y subterránea),(vía 6.a, Fig. 7.2), o por otros
15 tipos de mecanismos de señalización (vía 6.b, Fig. 7.2) que requerirán estudios
16 específicos (p.ej. Larrainzar et al., 2014). Independientemente del mecanismo detrás de
17 esta respuesta, la compactación generó efectos sobre la nodulación, crecimiento y
18 actividad de los nódulos. La menor cantidad y actividad de nódulos podrían afectar la
19 capacidad de fijar nitrógeno (FBN), y esto a su vez limitar el crecimiento aéreo (vía 7,
20 Fig. 7.2). Este efecto puede estar condicionado por la dinámica de la oferta de N por otras
21 vías y la demanda de este nutriente por parte del cultivo a lo largo del ciclo. Se requieren
22 también estudios específicos que permitan analizar los efectos de la compactación sobre
23 la FBN, nutrición nitrogenada y crecimiento aéreo. En condiciones de campo o en
24 nuestros ensayos controlados, cuando las compactaciones representan una pequeña
25 fracción del perfil de suelo, tampoco hubo evidencias de efectos directos sobre la parte

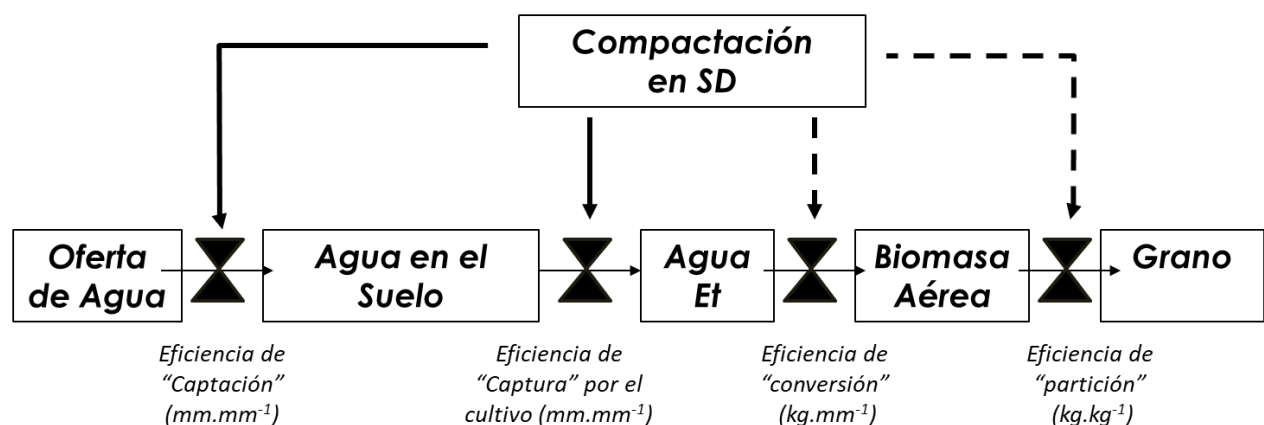
1 aérea, como las sugeridas por Beemster y Masle (1996), Andersen et al. (2013), o Tracy
 2 et al. (2015) en otros cultivos, que pudieran limitar directamente la capacidad fotosintética
 3 o la expansión foliar y el crecimiento de la parte aérea o partición a grano (vía 8, Fig. 7.1).
 4 Este tipo de respuestas, que usualmente promueven un efecto directo sobre el cierre
 5 estomático o sobre la expansión foliar, tendrían que haber generado incrementos en la
 6 temperatura del canopeo en los ensayos controlados, menores eficiencias de intercepción,
 7 de radiación, o menores eficiencias de conversión de agua a biomasa (p.ej. Andersen et
 8 al., 2013) tanto en los ensayos controlados como en los ensayos de campo. Pero los
 9 resultados de esta tesis no permitieron corroborar este mecanismo. Tampoco se
 10 observaron efectos directos sobre la partición de biomasa a grano (vía 9, Fig. 7.1)



11
 12 **Figura 7.2** Mecanismos por los cuales la compactación de suelos en SD (determinada a través
 13 del nivel de resistencia a la penetración-RP), puede afectar la producción de biomasa y grano en
 14 el cultivo de soja. Las líneas llenas indican efectos observados en los ensayos de campo y
 15 controlados. Las líneas punteadas indican posibles efectos, no comprobados a lo largo de esta
 16 tesis.

17

1 Retomando entonces el modelo planteado en la Introducción General (ecuación
 2 1.1), la compactación de suelos en SD demostró limitar dos componentes clave de la
 3 productividad del agua cultivo (Fig. 7.3): por un lado, redujo la eficiencia de captación
 4 de agua por el suelo (Capítulo 6), y por otro redujo la eficiencia de captura de agua por
 5 las raíces (Capítulos 3 y 6). Los experimentos del Capítulo 3, en los cuales el ingreso de
 6 agua al perfil no se vio restringido, demostraron que estos efectos pueden generarse en
 7 forma independiente. En cambio, los efectos sobre la eficiencia de conversión de agua a
 8 biomasa, o su partición a grano no resultaron evidentes, aun cuando existieron efectos
 9 sobre la cantidad y actividad de nódulos fijadores de nitrógeno que podrían limitar la
 10 disponibilidad de este recurso. En línea con los resultados de Sadras et al. (2005) en trigo
 11 en ambientes semiáridos de Australia, la disponibilidad de agua (regulada por la eficiencia
 12 de captación del suelo) y su utilización (regulada por la eficiencia de captura por el
 13 cultivo) serían entonces los efectos predominantes de la compactación superficial del
 14 suelo sobre el aprovechamiento de este recurso, y sobre la producción de biomasa y de
 15 grano.



16

17 **Figura 7.3** Efectos de la compactación de suelos en SD sobre la Productividad del agua y sus
 18 componentes parciales. Las líneas llenas indican efectos observados en los ensayos de campo y
 19 controlados. Las líneas punteadas indican posibles efectos, no comprobados a lo largo de esta
 20 tesis.

1

2 **7.4. Principales contribuciones y aportes originales de esta tesis**

3 La presente tesis se propuso conocer el grado de extensión y magnitud de la
4 compactación de suelos mediante un abordaje a través de distintas escalas de estudio:
5 relevamientos y meta-análisis a nivel regional, experimentos de campo a nivel de cultivo,
6 y experimentos controlados con estudios a nivel de planta y de tejidos. Además, integró
7 las variables edáficas con los mecanismos a nivel de cultivo y de planta que determinan
8 los rendimientos de soja. De esta manera, se ha logrado comprender no sólo cuáles son
9 los principales mecanismos involucrados en la respuesta a la compactación (Figuras 7.2
10 y 7.3), sino también elaborar respuestas para revertir o mitigar un problema cuya
11 variabilidad regional y ambiental hace dificultoso su abordaje. Entre las principales
12 contribuciones de esta tesis podemos mencionar:

- 13 • **La intensificación agrícola modifica poco los niveles de compactación, pero**
14 **genera otras mejoras a nivel de estructura de suelo y mejora las respuestas del**
15 **cultivo a la descompactación.**

16 En esta tesis se encontró que la compactación es un proceso generalizado en
17 secuencias puramente agrícolas en suelos con alto contenido de limo superficial en SD,
18 independientemente de la intensidad de la rotación y los niveles de aportes de
19 carbono, lo cual no había sido estudiado. Como aspecto positivo de la intensidad de
20 cultivos, también demostró que, a pesar de una mayor intensidad de tránsito, tampoco
21 se generan incrementos más marcados en los niveles de compactación respecto de
22 otras secuencias, pero sí mejoran algunas propiedades como la disminución en la
23 formación de estructuras de tipo laminar. Tampoco la intensificación favorece la
24 perdurabilidad de los efectos de la descompactación mecánica sobre las propiedades
25 del suelo, lo cual al momento no había sido analizado. Sin embargo, al analizar las

1 respuestas en el rendimiento del cultivo se encontró que en los suelos de secuencias
2 agrícolas más intensas presentarían una mayor respuesta a la descompactación
3 mecánica, al menos en el corto plazo, aspecto sobre el cual tampoco se tenían
4 evidencias.

- 5 • **El crecimiento de las raíces y la absorción de agua se reduce por la compactación**
6 **no solo en la zona del suelo compactada. El cultivo de soja presenta mecanismos**
7 **compensatorios a nivel de funcionalidad de las raíces.**

8 Esta tesis corroboró que los suelos compactados pueden restringir la oferta total
9 de agua para el cultivo a partir de un menor ingreso de agua de precipitaciones durante
10 el ciclo del cultivo. Más aún, se observaron efectos en la capacidad de captura del
11 agua por parte de las raíces que no habían sido documentados en el cultivo de soja.
12 Cuando la compactación afecta sólo una porción del suelo y en esa zona, además,
13 existen poros y canales, las raíces pueden crecer y atravesar las impedancias físicas,
14 pero se produce una demora en su crecimiento. Este retraso en la profundización
15 puede mantenerse durante el ciclo, y así para el inicio de las etapas reproductivas, la
16 profundidad de extracción de agua en suelos compactados resulta menor que la de
17 condiciones no compactadas. Como consecuencia, la compactación reduce el
18 crecimiento y la capacidad de extracción de agua de las raíces de soja en estratos
19 subsuperficiales más allá del horizonte antrópico afectado. No se observó un
20 crecimiento compensatorio de las raíces no expuestas a la compactación, pero en
21 cambio sí se observaron mecanismos compensatorios parciales a nivel de tasas de
22 absorción específicas de agua en subsuelos no limitantes. Cabe destacar que hasta
23 ahora este tipo de compensaciones tampoco habían sido documentadas en el cultivo.

- 24 • **La sensibilidad a la compactación difiere entre los órganos de la planta y entre**
25 **los procesos relacionados con el crecimiento**

1 Uno de los hallazgos de esta tesis que fue consistente en las diferentes
2 aproximaciones realizadas fue la reducción en el crecimiento de las raíces y, con ella, la
3 reducción en la cantidad de agua absorbida por el cultivo, en especial en estratos más
4 profundos. No obstante, los estudios realizados bajo condiciones controladas sugieren
5 que la nodulación y la actividad de los nódulos son procesos aún más sensibles que el
6 crecimiento de las raíces. Esta sensibilidad mayor de la nodulación comparada con el
7 crecimiento del resto de la planta, había sido documentada para otras limitaciones (como
8 sequía), pero no había sido explorada frente a compactaciones. Por el contrario, a nivel
9 de planta entera, la biomasa aérea y el rendimiento fueron menos afectadas que las raíces
10 por la presencia de zonas compactadas en el suelo, resultando una consecuencia directa
11 de la menor cantidad de agua absorbida más que de efectos directos de la compactación
12 en sí. Esta sensibilidad de los distintos procesos a la compactación, para los cuales no
13 había antecedentes en el cultivo, podría resumirse de la siguiente manera: nodulación >
14 crecimiento de raíces > producción de grano > producción de biomasa aérea.

15 • **La compactación afecta procesos ligados a la fijación simbiótica de Nitrógeno**
16 **más allá de la región compactada**

17 Si bien existían algunas evidencias acerca de los efectos de las compactaciones
18 sobre la nodulación en soja, los estudios de esta tesis mostraron por primera vez que los
19 efectos de las impedancias pueden generar una reducción en la cantidad y actividad de
20 nódulos en las raíces directamente expuestas, así como también en las raíces presentes en
21 capas subyacentes no compactadas. Los resultados sugieren que la restricción en la
22 cantidad, tamaño y actividad de los nódulos ante la compactación de los suelos parece
23 responder a una respuesta de tipo sistémica. Este tipo de efectos de la compactación sobre
24 los procesos ligados a la FBN en soja hasta el momento no habían sido documentados.

1 • **Las alternativas de reversión ejercen efectos diferentes sobre el suelo y sobre el**
2 **cultivo de acuerdo a las características ambientales**

3 Si bien existían evidencias acerca de los factores que inciden en la susceptibilidad de
4 los suelos a la compactación, esta tesis permitió avanzar en la comprensión de los factores
5 que regulan la respuesta a la descompactación mecánica, tanto en suelos como en el
6 rendimiento del cultivo. Esta tesis mostró además que los factores que inciden sobre la
7 respuesta en las propiedades del suelo el suelo no necesariamente siguen el mismo patrón
8 que en la respuesta en los rendimientos. Llamativamente, los suelos con mayor respuesta
9 a la descompactación en las propiedades físicas como la resistencia mecánica, no fueron
10 los de mayor respuesta en rendimiento. Así, por ejemplo, se observaron mayores
11 respuestas en las propiedades del suelo en ambientes de texturas de menor contenido de
12 arcilla y materia orgánica, mientras que se observaron mayores respuestas en los
13 rendimientos en ambientes con mayor contenido de arcilla y materia orgánica. Como se
14 comentó anteriormente, los cambios en el crecimiento y rendimiento del cultivo
15 estuvieron más asociados al impacto de la descompactación sobre la disponibilidad y
16 captura de agua, procesos que fueron positivamente afectados por la descompactación
17 mecánica, al menos en el corto plazo

18 • **La descompactación mecánica como única alternativa no revierte el problema**
19 **de compactación de suelos**

20 La integración de distintas experiencias mostró que la descompactación mecánica
21 través del uso de escarificadores redujo el nivel de impedancias mecánicas
22 subsuperficiales en el corto plazo, pero sus efectos no perduran más allá de los 12-18
23 meses de realizada la labor. Se observaron también reducciones significativas en los
24 niveles de rastrojo coincidentes con otros estudios (Díaz-Zorita, 2000) que merecen ser
25 contempladas. La reducción en la capacidad portante de los suelos y en los niveles de

1 cobertura de rastrojo, sumado a las características de escasa resiliencia de los suelos de la
2 región (Taboada et al., 2008), generaron procesos de re-compactación posterior en
3 algunos casos, incluso a niveles superiores a los originales. Todo ello, analizado de forma
4 integral, hace pensar en que la descompactación como única estrategia no sería una
5 alternativa aconsejable para revertir los problemas de impedancias subsuperficiales del
6 suelo.

7 **7.5. Implicancias agronómicas**

8 Los resultados de los distintos capítulos mostraron que para disminuir los efectos
9 de la compactación sobre el cultivo de soja posiblemente sea necesario combinar
10 estrategias de manejo que podríamos denominarlas estrategias de adaptación, reversión y
11 prevención (Hamza y Anderson, 2005; Chamen al., 2015).

12 A nivel de manejo del cultivo, conociendo los mecanismos por los cuales la
13 compactación afecta al cultivo, es posible plantear alternativas que permitan disminuir el
14 impacto de las compactaciones sobre los rendimientos y el aprovechamiento de agua
15 (estrategias de adaptación). Considerando los mecanismos de compensación que poseen
16 las raíces y parte aérea de soja descritos anteriormente, parecería central favorecer su
17 expresión tratando, por ejemplo, de evitar en suelos compactados la utilización de
18 cultivares de ciclo corto que, además de tiempo de crecimiento y menor profundización
19 de raíces (Dardanelli et al., 2004), tienden a ubicar los períodos más críticos para la
20 definición del rendimiento en condiciones de elevada demanda atmosférica.

21 Los resultados Capítulo 6 mostraron que temprano en el ciclo pueden generarse
22 efectos sobre la cobertura del entresurco e intercepción de radiación, que fueron
23 compensados en las condiciones de manejo y ambientes analizados. Pero es posible que
24 esta compensación no necesariamente se produzca en otros ambientes o manejos (p.ej.

1 espaciamientos entre hileras de 52 cm). En este sentido, la elección de genotipos de
2 elevado potencial de ramificación y el uso de espaciamientos entre hileras que favorezcan
3 una rápida cobertura del entresurco (p.ej. 35 cm o inferiores), pueden limitar posibles
4 efectos reductores de la compactación sobre la interceptación de radiación.

5 Los efectos observados sobre la nodulación y actividad de nódulos mostraron que
6 es posible que la compactación genere efectos adversos sobre la FBN. Los efectos finales
7 sobre la nutrición nitrogenada del cultivo dependerán de otros factores, como por ejemplo
8 la disponibilidad de nitratos en el suelo a través del ciclo y la capacidad de compensar
9 reducciones en la FBN a través de la absorción de N por las raíces. Aun así, en suelos
10 compactados con bajos niveles de materia orgánica, y baja disponibilidad de Nitrógeno,
11 en los que la nodulación y actividad de nódulos se pueda ver restringida, es posible
12 plantear estrategias orientadas a asegurar una mayor provisión de nitrógeno en el ciclo
13 del cultivo que compensen una menor FBN, como por ejemplo la incorporación de
14 cultivos de cobertura leguminosas (p.ej. *Vicia villosa*) como antecesor. En esta línea, el
15 uso de cultivos de cobertura, no como estrategia de reversión de la compactación sino
16 orientados a aumentar los niveles de infiltración (Álvarez et al., 2017) y disminuir la
17 evaporación de agua en las etapas iniciales del cultivo de soja, podría también constituir
18 una estrategia de adaptación de manejo, al favorecer mayores niveles de humedad en
19 superficie, reducir los niveles de resistencia mecánica, y atenuar los efectos de la
20 compactación sobre el cultivo en las primeras etapas.

21 En cuanto a las estrategias de reversión, los resultados de los capítulos de
22 descompactación mecánica (Capítulos 5-6) mostraron que es necesario contemplar
23 posibles efectos adversos de la práctica, para evitar impactos negativos sobre los cultivos
24 y evitar procesos de re-compactación posterior. La remoción de los niveles de rastrojo
25 plantea la necesidad de combinar la descompactación con prácticas que aseguren una

1 mayor cobertura de residuos al inicio del cultivo de soja, como la inclusión de cultivos de
2 cobertura luego de intervención mecánica. Para minimizar la re-compactación posterior,
3 posiblemente sea necesario combinar la descompactación mecánica con estrategias de
4 control de tráfico agrícola y de minimización de la presión ejercida sobre el suelo (p.ej.
5 Botta et al., 2007), en especial en las labores de cosecha posteriores a la intervención.

6 Por último, si bien una mayor intensidad de cultivos no pareció limitar la ocurrencia
7 de procesos de compactación, se observaron efectos favorables de la inclusión de ciclos
8 con pasturas en las rotaciones. La incorporación de ciclos con pasturas perennes,
9 independientemente del destino de la biomasa aérea generada (pastoreo, reservas, o
10 incluso destinos industriales, p.ej. Fowler et al., 2003), debería contemplarse como una
11 posible estrategia mejoradora de los niveles de compactación y propiedades físicas, en
12 especial en suelos con alta susceptibilidad a la compactación. Planteos que incluyan
13 ciclos de especies perennes en las rotaciones agrícolas pueden presentar además otras
14 ventajas, como la reducción de los procesos erosivos, o la reducción en el consumo de
15 combustibles y agroquímicos (García-Préchac, 2004). Debería contemplarse también la
16 inclusión de otras especies con sistemas radicales pivotantes vigorosos que permitan una
17 mejora gradual de las propiedades físicas de suelos compactados (p.ej. Chen y Weil, 2010;
18 Calonego y Rosolem, 2010; Chen et al., 2014). Resultará clave entonces avanzar en el
19 diseño de sistemas productivos que reduzcan, progresivamente, la compactación a través
20 de los procesos biológicos antes mencionados, minimicen la compactación a través del
21 control del tránsito agrícola, y simultáneamente atenúen los efectos de la compactación a
22 través del manejo del cultivo de soja.

1 **7.6.Futuras líneas de trabajo**

2 Esta tesis también identificó “vacíos de información” y posibles líneas de trabajo
3 que contribuirán a mejorar la comprensión sobre los efectos de la compactación y el
4 desarrollo de alternativas de manejo mejoradoras. Entre éstas podemos mencionar:

5 • **Límites de los mecanismos de compensación a la compactación de suelos**

6 Con relación a los estudios a nivel de planta, los estudios de esta tesis abren el
7 interrogante sobre qué ocurriría si la provisión de agua en el subsuelo no fuera tan elevada
8 como la que se describe en los experimentos de los Capítulos 3-6. Reproducir el estudio
9 bajo combinaciones de contenido hídrico variables en el subsuelo, situando a su vez a las
10 plantas a un gradiente de demandas atmosféricas, permitiría estimar los límites del
11 mecanismo de compensación observados a nivel de absorción por unidad de raíz. De esta
12 manera, se podrá predecir el impacto de la compactación en diferentes escenarios de
13 disponibilidad hídrica, intentando identificar indicadores que asistan a la toma de
14 decisiones de manejo. A su vez, es pertinente preguntarse si estos mecanismos presentan
15 una variabilidad genética. La incorporación de distintos genotipos de soja en
16 experimentos de este tipo permitirá dar respuesta a este interrogante.

17 • **Compactación de suelos y economía del nitrógeno**

18 En esta tesis sólo se evaluó la nodulación en situaciones en las cuales se manejó
19 la fertilidad del suelo, incluida la nitrogenada, de manera que no hubiera limitaciones
20 apreciables. No obstante, en los sistemas naturales existe una variabilidad marcada en la
21 disponibilidad de nutrientes. Estudiar en qué medida los efectos de la compactación sobre
22 la nodulación y actividad de nódulos limitan la oferta de nitrógeno del cultivo permitiría
23 avanzar en un aspecto escasamente estudiado en el cultivo de soja. Para ello, pueden
24 hacerse estudios que analicen la nodulación, actividad de nódulos y estado de nutrición
25 nitrogenada de los tejidos, tanto en condiciones de campo como controladas, en suelos

1 con distinta disponibilidad de nitrógeno. En estos casos, además de analizar el
2 crecimiento y rendimiento de los cultivos, resultaría de interés cuantificar la dinámica de
3 acumulación y removilización del N en órganos vegetativos y la concentración final en
4 los granos. Asimismo, a fines de profundizar los conocimientos sobre los mecanismos
5 subyacentes en la respuesta de los nódulos a la compactación, podrían realizarse
6 experimentos controlados con separación de raíces (tipo “*Split-root*”, similares a los
7 descritos por Larrainzar et al., 2014), de modo de separar efectos locales y sistémicos de
8 la compactación.

9 • **Predicción de los efectos de la compactación sobre el rendimiento**

10 Los resultados de esta tesis, sumados a estudios como los mencionados más arriba,
11 permitirían incorporar los efectos de la compactación modelos de simulación para
12 predecir el rendimiento (p.ej. CROPGRO, Boote et al., 1998; APSIM, McCown et al.,
13 1996), que actualmente no son considerados. Estos modelos son particularmente útiles
14 para estimar las brechas entre los rendimientos actuales y los limitados por la oferta y
15 utilización de recursos (Grassini et al., 2009; Monzón et al., 2012; Aramburu Merlos et
16 al., 2015). El uso de modelos de simulación puede resultar una herramienta útil para
17 identificar posibles ventajas o desventajas de algunos de los aspectos observados en esta
18 tesis, como una menor velocidad de profundización y exploración radical en suelos
19 compactados, o extracción de agua, de acuerdo a las características ambientales. Poder
20 mejorar su capacidad predictiva en relación a los efectos de la compactación, incorporando
21 los resultados observados en los Capítulos 3 y 6, echaría luz sobre las posibles estrategias
22 para mejorar y estabilizar los rendimientos en distintos ambientes, por ejemplo, mediante
23 modificaciones en la fecha de siembra o la longitud del ciclo de los cultivares. La gran
24 difusión de las compactaciones en la región pampeana permite suponer que el impacto en

1 esta mejora en la predicción podría repercutir en un gran número de sistemas de
2 producción.

3 • **Estrategias agronómicas de reversión o mitigación de la compactación**

4 Como se mencionó anteriormente, resultará clave avanzar en el diseño de
5 estrategias de manejo orientadas a prevenir, revertir y mitigar los efectos de la
6 compactación de suelos. Estudios similares a los descritos en los Capítulos 5 y 6, pero
7 que incorporen estrategias de manejo adicionales a la descompactación mecánica, como
8 el uso de cultivos de sistemas radicales vigorosos, sistemas de tránsito controlado, y su
9 combinación, permitiría evaluar el éxito de estas prácticas en cuanto al crecimiento de las
10 raíces y aprovechamiento de recursos por parte de los cultivos. Será clave también generar
11 información respecto a los costos y beneficios económicos de estas prácticas (p.ej.
12 Chamen et al., 2015), de modo de analizar en mayor detalle la factibilidad de su adopción
13 a escala.

14 **7.7. Consideraciones finales**

15 Al presente, se carecía de una visión clara acerca de la influencia de la
16 compactación de suelos sobre uno de los principales cultivos en los sistemas en SD en
17 Argentina y a nivel mundial como la soja. Esta tesis abrió nuevos interrogantes, pero a su
18 vez permitió avanzar en el entendimiento de los factores que favorecen la compactación
19 de suelos en SD, de los mecanismos por los cuales las compactaciones afectan la
20 productividad de un recurso clave como el agua en los sistemas de producción actuales,
21 y analizar la efectividad de intervenciones mecánicas sobre su reversión.

22

8. Bibliografía

- AAPRESID, 2019. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. Informe Bianual: Relevamiento de superficie agrícola bajo siembra directa en las Campañas 77/78 – 18/19. 6pp. Disponible Online: <http://www.aapresid.org.ar/blog/evolucion-de-siembra-directa-en-argentina-campana-2018-19/>. Acceso 13-08-2020.
- Abdollahi, L., Munkholm, L.J., Garbout, A., 2014. Tillage System and Cover Crop Effects on Soil Quality: II. Pore Characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 271.
- Acosta-Martínez, V., Mikha, M.M., Vigil, M.F., 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat–fallow for the Central Great Plains. *Appl. soil Ecol.* 37, 41–52.
- Agosti, M.B., Peralta, G.E., Gil, R.C., 2014. Vicia villosa como cultivo de cobertura en el sur de Santa Fe. En actas: XXIV Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. 24. Reunión Nacional de Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. 5 a 9 de mayo 2014. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Alakukku, L., 1998. Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. *Soil Tillage Res.* 47(1-2), 83-89.
- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W.C.T., Tijink, F.G.J., Van Der Linden, J.P., Pires, S., Spoor, G., 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Tillage Res.* 73(1-2), 145-160.
- Alaoui, A., Lipiec, J., Gerke, H.H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Tillage Res.* 115–116, 1–15.
- Albalasmeh, A.A., Ghezzehei, T.A., 2014. Interplay between soil drying and root exudation in rhizosheath development. *Plant Soil* 374, 739–751.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Guidelines for computing crop water requirements. FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Irrigation and drainage paper 56, 300pp.
- Álvarez, C.R., 2012. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. 193 pp.
- Álvarez, C.R., Duggan, M.T., Chamorro, E.R., D'ambrosio, D., Taboada, M.A., 2009 a. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: Efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Cienc. del Suelo* 27, 159–169.
- Álvarez, C.R., Fernández, P.L., Taboada, M.A., 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la región Pampeana. *Cienc. del Suelo* 30, 173–178.
- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Bustingorri, C., Gutiérrez, B., Flavio, H., 2006. Descompactación De Suelos En Siembra Directa: Efectos Sobre Las Propiedades Físicas Y El Cultivo De Maíz. *Cienc. del suelo* 24, 1–10.
- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Costantini, A.O., 2016. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo. En: Amaral Sobrinho, Chagas, C., Zonta, E. (eds). Impactos Ambientales Provenientes da Produção Agrícola Experiências Argentinas e Brasileiras. Ed. Livre Expressão, São Paulo, Rio de Janeiro, Brasil. Pp. 15-51.
- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutierrez Boem, F.H., Bono, A., Fernández, P.L., Prystupa, P., 2009 b. Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 1242.
- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Perelman, S., Morrás, H.J.M., 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *Soil Res.* 52, 533–542.

- Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Torres Duggan, M., Bustingorri, C., Chamorro, E., 2010. Uso de descompactadores de planteos de siembra directa en la Pampa Ondulada: efecto sobre el suelo y el cultivo de maíz. En: Resúmenes. Manejo y conservación de suelos y aguas. Riego y drenaje. Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. 31 de Mayo a 4 de Junio de 2010, Rosario, Santa Fé, Argentina.
- Álvarez, R., Steinbach, H., 2006. Valor agronómico de la materia orgánica. Mater. Orgánica. Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos 1, 13–29.
- Álvarez, R., Steinbach, H.S., 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Tillage Res.* 104, 1–15.
- Álvarez, R., Steinbach, H.S., De Paepe, J.L., 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil Tillage Res.* 170, 53-65.
- Álvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., Gracia, R., López, M. V, 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145, 390–396.
- Alves, B.J.R., Boddey, R.M., Urquiaga, S., 2003. The success of BNF in soybean in Brazil. *Plant Soil* 252, 1–9.
- Amato, M., Ritchie, J.T., 2002. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Sci* 42, 773–780.
- Andersen, M.N., Munkholm, L.J., Nielsen, A.L., 2013. Soil compaction limits root development, radiation-use efficiency and yield of three winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Acta Agric. Scand. Sect. B - Soil Plant Sci.* 63, 409–419.
- Andrade, F.H., Abbate, P.E., 2005. Response of maize and soybean to variability in stand uniformity. *Agron. J.* 97, 1263–1269.
- Antille, D.L., Bennett, J.M., Jensen, T.A., 2016. Soil compaction and controlled traffic considerations in Australian cotton-farming systems. *Crop Pasture Sci.* 67, 1–28.
- Aparicio, V., Costa, J.L., 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 96, 155–165.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercau, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *F. Crop. Res.* 184, 145–154.
- Arolfo, V. A., & Basigalup, D., 2012. Efficiency of biological nitrogen fixation in alfalfa by introduced and native rhizobia. En *Actas: 2012 Joint Conference North American Alfalfa Improvement Conference [NAAIC], Trifolium, & Grass Breeders.* July 10-12, 2012. Ithaca, New York. US.
- Arrese-Igor, C., González, E., 2011. Physiological responses of legume nodules to drought. *Plant Stress* 5, 24–31.
- Arvidsson, J., Håkansson, I., 2014. Response of different crops to soil compaction—Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil Tillage Res.* 138, 56–63.
- Bacanamwo, M., Purcell, L.C., 1999. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. *J. Exp. Bot.* 50, 689–696.
- Bacigaluppo, S., Bodrero, M., Salvagiotti, F., 2009. Producción de soja en rotación vs monocultivo en suelos con historia agrícola prolongada. *INTA: Para Mejorar la Producción* 42, 53–55.
- Bacigaluppo, S., Bodrero, M.L., Balzarini, M., Gerster, G.R., Andriani, J.M., Enrico, J.M., Dardanelli, J.L., 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Eur. J. Agron.* 35, 247–254.
- Baize, D, van Oort, F., 2013. Structures et porosités - Importance pour le fonctionnement des sols - Naissance et destruction des agrégats.(Chapter 2). Pp. 21-38. En: Baize, D., Duval, O., Richard, G. (Eds.). *Les sols et leurs structures. Observations à différentes échelles.* Editorial Quae, Versailles, FRA

- Balestrasse, K.B., Gallego, S.M., Tomaro, M.L., 2004. Cadmium-induced senescence in nodules of soybean (*Glycine max* L.) plants. *Plant Soil* 262, 373–381.
- Balestrasse, K.B., Gardey, L., Gallego, S.M., Tomaro, M.L., 2001. Response of antioxidant defence system in soybean nodules and roots subjected to cadmium stress. *Funct. Plant Biol.* 28, 497–504.
- Ball, B.C., Campbell, D.J., Hunter, E.A., 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Tillage Res.* 57(1-2), 83-91.
- Ball, B.C., Munkholm, L.J., Batey, T., 2013. Applications of visual soil evaluation *Soil Tillage Res.* 127(1-2), 1-2.
- Ball-Coelho, B.R., Roy, R.C., Swanton, C.J., 1998. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil Tillage Res.* 45, 237–249.
- Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management - A review. *Soil Use Manag.* 25, 335–345.
- Beemster, G.T.S., Masle, J., 1996. Effects of soil resistance to root penetration on leaf expansion in wheat (*Triticum aestivum* L.): composition, number and size of epidermal cells in mature blades. *J. Exp. Bot.* 47, 1651–1662.
- Bellaloui, N., Gillen, A.M., Mengistu, A., Kebede, H., Fisher, D.K., Smith, J.R., Reddy, K.N., 2013. Responses of nitrogen metabolism and seed nutrition to drought stress in soybean genotypes differing in slow-wilting phenotype. *Front. Plant Sci.* 4, 498.
- Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hans, J., McKenna, S.J., Roberts, T.J., Valentine, T.A., 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J. Exp. Bot.* 57, 437–447.
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68.
- Bengough, A.G., Mullins, C.E. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. soil Sci.* 41, 341–358.
- Bengough, A.G., Young, I.M., 1993. Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances. *Plant Soil* 149, 129–139.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Centurion, M.A.P.D.C., Freddi, O.D.S., Sousa Neto, E.L. De, Leonel, C.L., Silva, Á.P. Da, 2007. Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. *Sci. Agric.* 64, 1–8.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Silva, A.P. Da, Centurion, M.A.P.D.C., Leonel, C.L., Freddi, O.D.S., 2008. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 43, 1591–1600.
- Bingham, I.J., Bengough, A.G., 2003. Morphological plasticity of wheat and barley roots in response to spatial variation in soil strength. *Plant Soil* 250, 273–282.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. p. 363–375. En: Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* Agron. Monogr. ASA and SSSA, Madison, Wisc., US.
- Böhm, W., 1979. *Methods of studying root systems.* Editorial Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. 188 pp.
- Boizard, H., Peigné, J., Sasal, M.C., de Fátima Guimarães, M., Piron, D., Tomis, V., Vian, J.F., Cadoux, S., Ralisch, R., Tavares Filho, J., Heddadj, D., De Battista, J., Duparque, A., Franchini, J.C., Roger-Estrade, J., 2017. Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. *Soil Tillage Res.* 173, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.007>
- Bonel, B. A., Morrás, H. J. M., Bisaro, V. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Cienc. del Suelo* 23(1), 1-12.
- Bonel, B.A., Denoia, J., Costanzo, M., Giubileo G., Zerpa, G. 2004. Paratill effect on a Vertic Argiudol under continued no-tillage systems. *Cien. Inv. Agr.* 31(3): 187-196.

- Boote, K. J., Jones, J. W., Hoogenboom, G., Pickering, N. B., 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. *Agricultural systems modeling and simulation*, 18, 651-692.
- Botta, G.F., Jorajuria, D., Balbuena, R., Ressia, M., Ferrero, C., Rosatto, H., Tourn, M., 2006 a. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil Tillage Res.* 91, 164–172.
- Botta, G.F., Jorajuria, D., Rosatto, H., Ferrero, C., 2006 b. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Tillage Res.* 86, 9–14.
- Botta, G.F., Pozzolo, O., Bomben, M., Rosatto, H., Rivero, D., Ressia, M., Tourn, M., Soza, E., Vazquez, J., 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil Tillage Res.* 96, 145–154.
- Botta, G.F., Rivero, D., Tourn, M., Melcon, F.B., Pozzolo, O., Nardon, G., Balbuena, R., Becerra, A.T., Rosatto, H., Stadler, S., 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil Tillage Res.* 101, 44–51.
- Botta, G.F., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., Tourn, M., 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil Tillage Res.* 110, 167–174.
- Botta, G.F., Tolón-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., Tourn, M., Balbuena, R., Rivero, D., 2013. Continuous application of direct sowing: Traffic effect on subsoil compaction and maize (*Zea mays* L.) yields in Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 134, 111–120.
- Botta, G.F., Tolón-Becerra, A., Rivero, D., Laureda, D., Ramírez-Roman, M., Lastra-Bravo, X., Agnes, D., Flores-Parra, I.M., Pelizzari, F., Martiren, V., 2016. Compaction produced by combine harvest traffic: Effect on soil and soybean (*Glycine max* L.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. *Eur. J. Agron.* 74, 155–163.
- Bouwman, L. A., Arts, W. B. M., 2000. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. *Applied Soil Ecology* 14(3), 213-222.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agron. J.* 54, 464–465.
- Bowen, G.D., Rovira, A.D., 1999. The rhizosphere and its management to improve plant growth. *Advances in Agronomy* 66, 1–102.
- Bradford, J.M., 1986. Penetrability. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Am. Soc. of Agron. Soil Sci. Soc. Am. Publisher, Madison, WI, USA, pp. 463–478.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma* 124, 3–22.
- Brown, D.A., Scott, H.D., 1984. Dependence of Crop Growth and Yield on Root Development and Activity 1. Roots, Nutr. water influx, plant growth 101–136.
- Bushamuka, V.N., Zobel, R.W., 1998. Differential genotypic and root type penetration of compacted soil layers. *Crop Sci.* 38, 776–781.
- Busscher, W.J., Bauer, P.J., Frederick, J.R., 2002. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil Tillage Res.* 68, 49–57.
- Buttery, B.R., Tan, C.S., Drury, C.F., Park, S.J., Armstrong, R.J., Park, K.Y., 1998. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean. *Can. J. Plant Sci.* 78, 571–576.
- Caetano-Anollés, G., Gresshoff, P.M., 1993. Nodule distribution on the roots of soybean and a supernodulating mutant in sand-vermiculite. *Plant Soil* 148(2), 265-270.
- Cafaro La Menza, N., Monzon, J.P., Specht, J.E., Grassini, P., 2017. Is soybean yield limited by nitrogen supply? *F. Crop. Res.* 213, 204–212.

- Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur. J. Agron.* 85, 31–37
- Calonego, J.C., 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.
- Calviño, P., Monzón, J.P., 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. *Crop Physiol. Appl. Genet. Improv. Agron.* 55–70.
- Cambardella, C. A., Elliott, T.E. 1992. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783.
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T., 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma* 1, 449–457.
- Camobreco, V.J., Richards, B.K., Steenhuis, T.S., Peverly, J.H., McBride, M.B., 1996. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. *Soil Sci.* 161, 740–750.
- Cárcova, J., Maddonni, G.A., Ghersa, C.M., 2000. Long-term cropping effects on maize: Crop evapotranspiration and grain yield. *Agron. J.* 92, 1256–1265.
- Cárcova, J., Maddonni, G.A., Ghersa, C.M.M., 1998. Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality. *F. Crop. Res.* 55, 165–174.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., Yang, H., 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28, 315–358.
- Cavaliere, K.M.V., da Silva, A.P., Tormena, C.A., Leão, T.P., Dexter, A.R., Håkansson, I., 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil Tillage Res.* 103, 158–164.
- Caviglia, O.P., Andrade, F.H., 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol* 3, 1–8.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. *F. Crop. Res.* 69, 259–266.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2004a. Sustainable Intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *F. Crop. Res.* 87, 117–129.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2004b. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas: I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *F. Crop. Res.* 87, 117–129.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2011. Yield and quality of wheat and soybean in sole- and double-cropping. *Agron. J.* 103, 1081–1089.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *F. Crop. Res.* 149, 300–311.
- Cecagno, D., de Andrade, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 156, 54–62.
- Cerisola, C., Draghi, L., Collazo, D.J., 2014. Compactación en siembra directa. Consecuencias del tránsito durante la operación de siembra sobre la pérdida de porosidad libre al aire del suelo. *Rev. la Fac. Agron. La Plata* 113, 123–133.
- Cerisola, C.I., García, M.G., Filgueira, R.R., 2005. Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Cienc. del Suelo* 23(2), 167–178.

- Cerliani, C., G.P. Espósito, G.R. Balboa, C.A. Castillo, Balboa, R.G., 2012. Sistema radical de maíz y soja y descompactación subsuperficial del suelo. En actas: XIX Congreso Latinoamericano de Ciencia del Suelo, XXIII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Mar del Plata.
- Cerliani, C., Malatini, F., Balboa, G, Balboa, R., Cholaky, C, Espósito, G., 2014. Producción de soja y descompactación del suelo en el Sur de Córdoba. En actas: XXIV Congreso Argentino de Ciencia del Suelo II. Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”. Bahía Blanca, 5-9 May, 2014.
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H.-L., Waskom, R.M., Niu, Y., Siddique, K.H.M., 2016. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 3.
- Chamen, T., Alakukku, L., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F., Weisskopf, P., 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 2. Equipment and field practices. *Soil Tillage Res.* 73(1-2), 161-174.
- Chamen, W. T., Moxey, A.P., Towers, W., Balana, B., Hallett, P.D., 2015. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil Tillage Res.* 146, 10-25.
- Chan, K.Y., Heenan, D.P, 1996. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. *Soil Tillage Res.* 37(2-3), 113-125.
- Chen, G., Weil, R.R., 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil* 331(1-2), 31-43.
- Chen, G., Weil, R.R., Hill, R.L., 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Tillage Res.* 136, 61-69.
- Chenu, C., Guerif, J., 1991 Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55(4), 1076-1080.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(4), 1479-1486.
- Cholaky, C, Cisneros, J.M., Umberti, M., Vignolo, C., Giayetto, O., 2006. Degradación – Recuperación de la condición hidrofísica de haplustoles/udoles del sur cordobés manejados con siembra directa. En: Díaz Rossello, R., Rava C. (Eds). *Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono sur*. Montevideo: IICA, PROCISUR, 2006. Pp.97-108
- Cholaky, C., Cisneros, J.M., Balbuena, R., 2010. Field Performance of a Winged Scarifier as a Function of Soil Compaction and Water Content. *Chil. J. Agric. Res.* 70, 150–158.
- Cockroft, B., Olsson, K. A., 2000. Degradation of soil structure due to coalescence of aggregates in no-till, no-traffic beds in irrigated crops. *Soil Res.* 38(1), 61-70.
- Cohron, G.T., 1971. Forces causing soil compaction. En: Barnes, K.K., Carleton, W.M., Taylor, H.M., Throckmorton, R.I., Van den Berg G.G. (Eds.), *Compaction of agricultural soils*. ASAE- American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan. Pp.9-47.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1996. RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. En: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (eds) *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change), vol 38. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. Pp.237-246.
- Coll, L., Cerrudo, A., Rizzalli, R., Monzon, J.P., Andrade, F.H., 2012. Capture and use of water and radiation in summer intercrops in the south-east Pampas of Argentina. *F. Crop. Res.* 134, 105–113.
- Collino, D.J., Salvagiotti, F., Peticari, A., Piccinetti, C., Ovando, G., Urquiaga, S., Racca, R.W., 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392, 239–252.
- Colombi, T., Braun, S., Keller, T., Walter, A., 2017. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Sci. Total Environ.* 574, 1283–1293.
- Colombi, T., Walter, A., 2016. Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions. *Funct. Plant Biol.* 43, 114–128.

- Cosentino, D., Chenu, C., Le Bissonnais, Y., 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying–wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 38(8), 2053-2062.
- Cresswell, H.P., Kirkegaard, J.A., 1995. Subsoil amelioration by plant-roots-the process and the evidence. *Soil Res.* 33, 221–239.
- da Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775.
- Dam, R.F., Mehdi, B.B., Burgess, M.S.E., Madramootoo, C.A., Mehuys, G.R., Callum, I.R., 2005. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil Tillage Res.* 84, 41–53.
- Damiano, F., Taboada, M.A., 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Cienc. del Suelo* 18(2), 77-88.
- Dang, Y.P., Moody, P.W., Bell, M.J., Seymour, N.P., Dalal, R.C., Freebairn, D.M., Walker, S.R., 2015. Strategic tillage in no-till farming systems in Australia's northern grains-growing regions: II. Implications for agronomy, soil and environment. *Soil Tillage Res.* 152, 115-123.
- Danielson, R.E., Sutherland, P.L., 1986. Porosity. *Methods Soil Anal. Part 1—Physical Mineral. Methods* 443–461.
- Dara, A., Moradi, B.A., Vontobel, P., Oswald, S.E., 2015. Mapping compensating root water uptake in heterogeneous soil conditions via neutron radiography. *Plant Soil* 397, 273–287.
- Dardanelli, J.L., Bachmeier, O.A., Sereno, R., Gil, R., 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam haplustoll. *F. Crop. Res.* 54, 29–38.
- Dardanelli, J.L., Collino, D., Otegui, M.E., Sadras, V.O., 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano.
- Dardanelli, J.L., Ritchie, J.T., Calmon, M., Andriani, J.M., Collino, D.J., 2004. An empirical model for root water uptake. *F. Crop. Res.* 87, 59–71.
- Dardanelli, J.L., Severina, I., Andriani, J.M., 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo. su rol en la optimización del riego suplementario. *Semin. Int. Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas.* 17 y 18 agosto 2010, Paysandú, Uruguay.
- Day, D.A., Carroll, B.J., Delves, A.C., Gresshoff, P.M., 1989. Relationship between autoregulation and nitrate inhibition of nodulation in soybeans. *Physiologia plantarum* 75(1), 37-42.
- De Battista, J.J., Andriulo, A., Pecorari, C. 1993. El perfil cultural: un método para la evaluación de sistemas de cultivo. *Cia. Suelo*, 10: 89-93.
- de Moraes Sá, J.C., Tivet, F., Lal, R., Briedis, C., Hartman, D.C., dos Santos, J.Z., dos Santos, J.B., 2014. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Res.* 136, 38–50.
- de Oliveira Ferreira, A., Amado, T.J.C., da Silveira Nicoloso, R., de Moraes Sa, J.C., Fiorin, J.E., Hansel, D.S.S., Menefee, D., 2013. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 133, 65–74.
- Debosz, K., Petersen, S.O., Kure, L.K., Ambus, P., 2002. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Appl. Soil Ecol.* 19, 237–248.
- Denef, K., Six, J., Paustian, K., Merckx, R., 2001. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry–wet cycles. *Soil Biol. Biochem.* 33(15), 2145-2153.
- Devi, M.J., Sinclair, T.R., 2013. Fixation drought tolerance of the slow-wilting soybean PI 471938. *Crop Sci.* 53, 2072–2078.
- Dexter, A.R., 1987. Mechanics of root growth. *Plant Soil* 98(3), 303-312.

- Dexter, A.R., Horn, R., Kemper, W.D., 1988. Two mechanisms for age-hardening of soil. *Journal of Soil Science* 39(2), 163-175.
- Di Ciocco, C., Penón, E., Coviella, C., López, S., Díaz-Zorita, M., Momo, F., Álvarez, R., 2011. Nitrogen fixation by soybean in the Pampas: Relationship between yield and soil nitrogen balance. *Agrochimica* 55, 305–313.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Cuadro, M., Robledo, y C.W., 2011. InfoStat versión 2011. Grup. InfoStat, FCA, Univ. Nac. Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar> 8, 195–199.
- Díaz-Zorita, M., 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Tillage Res.* 54, 11–19.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G. A, Grove, J.H., 2002 a. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 65, 1–18.
- Díaz-Zorita, M., Grosso, G.A., 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil Tillage Res.* 54(1-2), 121-126.
- Díaz-Zorita, M., Perfect, E., Grove, J. H., 2002 b. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil Tillage Res.* 64(1-2), 3-22.
- Divito, G.A., Sadras, V.O., 2014. How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis. *F. Crop. Res.* 156, 161–171.
- Domínguez J., Rubio, G., 2019. Agriculture. En: Rubio, G., Lavado, R.S., Pereyra, F.X. (Eds.), *The Soils of Argentina*. Springer International Publisher. Pp. 209-238.
- Doran, J.W., 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 119–127.
- Draghi, L., Terminiello, A., Claverie, J., Palancar, T., Botta, G., Balnueba, R., Jorajuria, D. 2007. Tráfico y descompactación en siembra directa. Citado en: Vilche, M.S., Alzugaray, C., Montico, S., Di Leo, N., Falcone, R., 2010. La Incidencia de la Labor de Escarificado en el Ambiente Edáfico: Cultivo de Maíz (*Zea Mays* L.). FAVE Sección Ciencias Agrar. 9, 63–72. Online: www.inta.gov.ar/ir/info. Acceso 23-11-2018.
- Duval, M.E., Galantini, J.A., Capurro, J.E., Martínez, J.M., 2016. Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. *Soil Tillage Res.* 161, 95-105.
- Egli, D.B., 1993. Relationship of uniformity of soybean seedling emergence to yield. *J. Seed Technol.* 22–28.
- Elisei, J., Bonel, B., Irurtia C., Montico, S., Senigagliesi C, Mon R. 2012. Descompactación de un argiudol típico en siembra directa mediante el uso de escarificadores. INTA. (visited 10/9/2018). E: XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Mar del Plata, 16 -20 April, 2012. Online:<http://inta.gob.ar/documentos/descompactacion-de-un-argiudol-tipico-en-siembra-directamediante-el-uso-de-escarificadores/> Acceso 23-11-2018.
- Elisei, J., Bonel, B.A., González, N.C., Barbero, H., Senigagliesi, C., 2014. Efectos del escarificado de suelo sobre propiedades de cultivo en la secuencia maíz-soja. En: Congreso Nacional de Maíz. 3 a 5 de Septiembre 2014. Rosario, Santa Fe. Argentina.
- Elisei, J., González, N., Beribe, M.J., 2016. Impacto del tránsito agrícola sobre un suelo escarificado. *RTA : Revista Técnica Agropecuaria INTA Pergamino*. Vol. 10 (30), 66-69.
- Farahani, H.J., Peterson, G.A., Westfall, D.G., Sherrod, L.A., Ahuja, L.R., 1998. Soil water storage in dryland cropping systems: the significance of cropping intensification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 984–991.
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., 1977. Stages of soybean development. Special Report N80, Iowa Agric. Home Econ. Exp. Stn., Iowa State Univ., Ames, Iowa, US.
- Fereres, E., Gonzalez-Dugo, V., 2009. Improving productivity to face water scarcity in irrigated agriculture. In: Sadras, V., Calderini, D. (eds.). *Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy*. Elsevier Academic Press, San Diego. pp.123-143.

- Fernández, P.L., Álvarez, C.R., Taboada, M.A., 2011. Assessment of topsoil properties in integrated crop-livestock and continuous cropping systems under zero tillage. *Soil Res.* 49, 143–151.
- Fischer, R.A., Edmeades, G.O., 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50, 85–98.
- Flowers, M.D., Lal, R., 1998. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Tillage Res.* 48, 21–35.
- Franzluebbers, A.J., 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Tillage Res.* 66, 95–106.
- Franzluebbers, A.J., Doraiswamy, P.C., 2007. Carbon sequestration and land degradation. En: Sivakumar M.V.K., Ndegwa, N. (Eds.) *Climate and land degradation*. Springer, Berlin, pp 343–358.
- Franzluebbers, A.J., Sawchik, J., Taboada, M.A., 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 18–26.
- Franzluebbers, A.J., Stuedemann, J.A., 2009. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* 129, 28–36.
- French, R.J., Schultz, J.E., 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Aust. J. Agric. Res.* 35, 743–764.
- Galantini, J.A., Iglesias, J.O., Maneiro, C., Santiago, L., Kleine, C., 2006. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo. *RIA. Rev. Investig. Agropecu.* 35.
- Gameda, S., Raghavan, G.S. V, McKyes, E., Theriault, R., 1987. Subsoil compaction in a clay soil. II. Natural alleviation. *Soil tillage Res.* 10, 123–130.
- Gan, Y., Stulen, I., van Keulen, H., Kuiper, P.J.C., 2004. Low concentrations of nitrate and ammonium stimulate nodulation and N₂ fixation while inhibiting specific nodulation (nodule DW g⁻¹ root dry weight) and specific N₂ fixation (N₂ fixed g⁻¹ root dry weight) in soybean. *Plant Soil* 258, 281–292.
- Garbout, A., Munkholm, L.J., Hansen, S.B., 2013. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation. *Soil Tillage Res.* 128, 104–109.
- Gardner, B.R., Nielsen, D.C., Shock, C.C., 1992. Infrared thermometry and the crop water stress index. II. Sampling procedures and interpretation. *J. Prod. Agric.* 5, 466–475.
- Gerster, G., Bacigaluppo, S., Bodrero, M., Salvagiotti, F., 2010. Secuencia de cultivos, descompactación mecánica y rendimiento de soja en un suelo degradado de la región pampeana. *INTA: Para Mejorar la Producción*, 45, 59–61.
- Gil-Quintana, E., Larrainzar, E., Seminario, A., Díaz-Leal, J.L., Alamillo, J.M., Pineda, M., Arrese-Igor, C., Wienkoop, S., González, E.M., 2013. Local inhibition of nitrogen fixation and nodule metabolism in drought-stressed soybean. *J. Exp. Bot.* 64, 2171–2182.
- Grafton, R.Q., Williams, J., Jiang, Q., 2015. Food and water gaps to 2050: preliminary results from the global food and water system (GFWS) platform. *Food Secur.* 7, 209–220.
- Grassini, P., Hall, A.J., Mercau, J.L., 2009. Benchmarking sunflower water productivity in semiarid environments. *F. Crop. Res.* 110, 251–262.
- Gray, S.B., Strellner, R.S., Puthuval, K.K., Ng, C., Shulman, R.E., Siebers, M.H., Rogers, A., Leakey, A.D.B., 2013. Minirhizotron imaging reveals that nodulation of field-grown soybean is enhanced by free-air CO₂ enrichment only when combined with drought stress. *Funct. Plant Biol.* 40, 137–147.
- Gregory P.J. 1988. Root growth of chickpea, faba bean, lentil, and pea and effects of water and salt stresses. En: Summerfield, R.J. (ed) *World crops: Cool season food legumes*. Springer, Dordrecht, pp 857–867.
- Gregory, P.J., 2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *Eur. J. Soil Sci.* 57, 2–12.
- Gregory, P.J., Bengough, A.G., George, T.S., Hallett, P.D., 2013. Rhizosphere engineering by plants: quantifying soil–root interactions. *Enhancing Underst. Quantif. soil–root growth Interact.* 1–30.

- Grosso, J.A., Ressia, J.M., Bongiorno, C., Weinzettel, P., Mendivil, G., Lázaro, L., de Pablo, C. 2018. Dinámica hídrica en un suelo bajo descompactación mecánica. Respuesta en rendimiento y calidad del cultivo de trigo. En actas: XXVI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Tucuman, 15 a 18 May, 2018.
- Grubinger, V., Zobel, R., Vendeland, J., Cortes, P., Soil, Y., 1982. Nodule distribution on roots of field-grown soybeans in subsurface soil horizons. *Crop Sci*, 22, 153-155.
- Grzesiak, M.T., 2009. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings. *Plant Root* 3, 10–16.
- Guecaimburú, J.M., Introcaso, R., Vázquez, J.M., Rojo, V. Reposo, G. 2014. Persistence of soil loosening with bent leg subsoilers in no tillage systems. *Chilean J. Agric. Anim. Sci.*, 30(2):109-115.
- Guerif, J., 1994. Effects of compaction on soil strength parameters. En: B.D. Soane, C. van Ouwerkerk (Eds.). *Developments in Agricultural Engineering*, Elsevier, Volume 11. Pp. 191–214.
- Guimarães, R. M., Keller, T., Munkholm, L. J., Lamandé, M., 2017. Visual soil evaluation and soil compaction research. *Soil Tillage Res.* 173, 1-3.
- Guo, S.W., Shen, Q.R., Brueck, H., 2007. Effects of local nitrogen supply on water uptake of bean plants in a split root system. *J. Integr. Plant Biol.* 49, 472–480.
- Gupta, S. C., Sharma, P. P., DeFranchi, S. A., 1989. Compaction effects on soil structure. *Adv. Agron.* 42(3), 1.
- Gupta, S.C., Allmaras, R.R., 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction, En: Stewart B.A. (eds) *Advances in Soil Science*. vol 6. Springer, New York. pp.65-100.
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., Li, Y., 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Prog. Phys. Geogr.* 29, 189–217.
- Haile, F.J., Higley, L.G., Specht, J.E., Spomer, S.M., 1998. Soybean leaf morphology and defoliation tolerance. *Agron. J.* 90, 353–362.
- Håkansson, I., 2005. Machinery-Induced Compaction of Arable Soils Incidence Consequences Counter Measures. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Soil Science, Uppsala, pp. 153.
- Håkansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.* 53, 71–85.
- Håkansson, I., Reeder, R.C., 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* 29, 277–304.
- Hamblin, A. P., Davies, D. B., 1977. Influence of organic matter on the physical properties of some East Anglian soils of high silt content. *J. Soil Sci.* 28(1), 11-22.
- Hamblin, A.P., 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. *Adv. Agron.* 38, 95–158.
- Hammer, G.L., Wright, G.C., 1994. A theoretical analysis of nitrogen and radiation effects on radiation use efficiency in peanut. *Aust. J. Agric. Res.* 45, 575–589.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82, 121–145.
- Harris, L., 1971. The Soil Compaction Process. En: Barnes, K.K., Carleton, W.M., Taylor, H.M., Throckmorton, R.I., Van den Berg G.G. (Eds.), *Compaction of agricultural soils*. ASAE- American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan. Pp.9-47.
- Hasegawa, S., Yoshida, S., Hasegawa, S., 1982. Water uptake by dryland rice root system during soil drying cycle. *Soil Sci. Plant Nutr.* 28, 191–204.
- Hatfield, J.L., Sauer, T.J., Prueger, J.H., 2001. Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review. *Agron. J.* 93, 271–280.
- Haynes, R.J., Beare, M.H., 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* 29(11-12), 1647-1653.

- Henry, R.C., Engström, K., Olin, S., Alexander, P., Arneith, A., Rounsevell, M.D.A., 2018. Food supply and bioenergy production within the global cropland planetary boundary. *PLoS One* 13,3. Online: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194695>. Acceso: 23-05-2020.
- Hidayat, T. Koesmaryono, Y., Ghulamahdi, M., 2019. Intensifying of reflected radiation under oil palm canopy and its effect on growth and production of soybean. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 365.
- Hilbert, J.A., Mon, R., Iurtia, C.B., Mousegne, F.J., 2003. Subsulado y enmienda profunda en siembra directa. Campaña 2002/03. Proyecto Regional Agrícola. Pergamino. AR. 2003. pp. 65-72.
- Hintz, R.W., Beeghly, H.H., Fehr, W.R., Schneiter, A.A., Hicks, D.R., 1991. Soybean response to stem cutoff and defoliation during vegetative development. *J. Prod. Agric.* 4(4), 585-589.
- Hintz, R.W., Beeghly, H.H., Fehr, W.R., Schneiter, A.A., Hicks, D.R., 1991. Soybean response to stem cutoff and defoliation during vegetative development. *J. Prod. Agric.* 4, 585-589.
- Hirose, T., Bazzaz, F.A., 1998. Trade-off between light-and nitrogen-use efficiency in canopy photosynthesis. *Ann. Bot.* 82, 195-202.
- Hoogenboom, G., Huck, M.G., Peterson, C.M., 1987. Root Growth Rate of Soybean as Affected by Drought Stress 1. *Agron. J.* 79, 607-614.
- Horn, R., Domżzał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., Van Ouwerkerk, C., 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Res.* 35(1-2), 23-36.
- Horn, R., Lebert, M., 1994. Soil compactability and compressibility. En: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 45 - 69.
- Horn, R., Vossbrink, J., Becker, S., 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil Tillage Res.* 79, 207-219.
- Huggins, D.R., Reganold, J.P., 2008. No-till: the quiet revolution. *Sci. Am.* 299, 70-77.
- Hussain, A., Black, C., Taylor, I., Roberts, J., 1999. Soil compaction. A role for ethylene in regulating leaf expansion and shoot growth in tomato? *Plant Physiol.* 121, 1227-1238.
- Idso, S.B., 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27, 59-70.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24, 45-55.
- Iijima, M., Barlow, P.W., Bengough, A.G., 2003. Root cap structure and cell production rates of maize (*Zea mays*) roots in compacted sand. *New Phytol.* 160, 127-134.
- Imhoff, S., Kay, B.D., da Silva, A.P., Hajabbasi, M.A., 2010. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil Tillage Res.* 106, 303-310.
- Invinkelried, H. 2016. Relación entre la calidad del suelo y variables ecofisiológicas de los cultivos de trigo y soja. Tesis, Grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional del Litoral. 169 pp.
- Invinkelried, H; Pietrobón, M., Dellaferrera, I., Imhoff, S. 2018. Cambios en las propiedades físicas del suelo ante variaciones en la compactación. En *Actas: XXVI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo*. Tucuman, 15-18 May, 2018.
- INTA. 2018. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Carta de Suelos de la Región Pampeana. Escala 1: 50.000, Buenos Aires. Disponible en: <http://anterior.inta.gov.ar/>
- Irizar, A.B., Delaye, L.A.M., Andriulo, A.E., 2015. Projection of Soil Organic Carbon Reserves in the Argentine Rolling Pampa Under Different Agronomic Scenarios. Relationship of these Reserves with Some Soil Properties. *Open Agric. J.* 9, 30-41.
- Jastrow, J.D., Miller, R.M., Lussenhop, J., 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie1. *Soil Biol. Biochem.* 30, 905-916.

- Jeudy, C., Ruffel, S., Freixes, S., Tillard, P., Santoni, A.L., Morel, S., Journet, E., Duc, G., Gojon, A., Lepetit, M., 2010. Adaptation of *Medicago truncatula* to nitrogen limitation is modulated via local and systemic nodule developmental responses. *New Phytol.* 185, 817–828.
- Jones, D.L., Hodge, A., Kuzyakov, Y., 2004. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytol.* 163, 459–480.
- Justino, G.C., Sodek, L., 2013. Recovery of nitrogen fixation after short-term flooding of the nodulated root system of soybean. *J. Plant Physiol.* 170, 235–241.
- Kantolic, A.G., G.E. Peralta, G.A. Slafer, 2013. Seed number responses to extended photoperiod and shading during reproductive stages in indeterminate soybean. *Eur. J. Agron.* 51: 91–100
- Kashiwagi, J., Krishnamurthy, L., Crouch, J.H., Serraj, R., 2006. Variability of root length density and its contributions to seed yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought stress. *F. Crop. Res.* 95, 171–181.
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., Kienzle, J., 2015. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. *F. Actions Sci. Reports. J. F. Actions* 8.
- Kassam, A.H., Friedrich, T., Derpsch, R., 2010. Conservation agriculture in the 21st century: A paradigm of sustainable agriculture, En: European Congress on Conservation Agriculture. pp. 4–6.
- Kay, B.D., 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems, En: Stewart B.A. (eds) *Advances in Soil Science* 12. Springer, New York, NY, pp. 1–52.
- Kay, B.D., Silva, A.P. da, Baldock, J.A., 1997. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. *Can. J. Soil Sci.* 77, 655–667.
- Keeney, D.R., Nelson, D.W., 1982. Nitrogen—Inorganic Forms 1. Methods soil Anal. Part 2. *Chem. Microbiol. Prop.* 643–698.
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M.P., Rek, J., Stadelmann, V., Wunderli, H., Breitenstein, D., Reiser, R., Oberholzer, H., 2017. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. *Vadose Zo. J.* 16.
- King, C.A., Purcell, L.C., 2005. Inhibition of N₂ fixation in soybean is associated with elevated ureides and amino acids. *Plant Physiol.* 137, 1389–1396.
- Kirkegaard, J.A., Lilley, J.M., Howe, G.N., Graham, J.M., 2007. Impact of subsoil water use on wheat yield. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 303–315.
- Ladrera, R., Marino, D., Larrainzar, E., González, E.M., Arrese-Igor, C., 2007. Reduced carbon availability to bacteroids and elevated ureides in nodules, but not in shoots, are involved in the nitrogen fixation response to early drought in soybean. *Plant Physiol.* 145, 539–546.
- Laflen, J.M., Amemiya, M., Hintz, E.A., 1981. Measuring crop residue cover. *J. soil Water Conserv.* 36, 341–343.
- Laguerre, G., Heulin-Gotty, K., Brunel, B., Klonowska, A., Le Quéré, A., Tillard, P., Prin, Y., Cleyet-Marel, J., Lepetit, M., 2012. Local and systemic N signaling are involved in *Medicago truncatula* preference for the most efficient *Sinorhizobium* symbiotic partners. *New Phytol.* 195, 437–449.
- Lal, R., 2015. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *J. Soil Water Conserv.* 70, 55–62.
- Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D., 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res.* 93, 1–12.
- Lal, R., Shukla, M.K., 2004. Soil structure. En: Lal, R., Shukla, M.K (eds) *Principles of soil physics*, CRC Press, pp. 80-140.
- Lapen, D.R., Topp, G.C., Gregorich, E.G., Curnoe, W.E., 2004. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Tillage Res.* 78, 151–170.

- Larrainzar, E., Gil-Quintana, E., Arrese-Igor, C., González, E.M., Marino, D., 2014. Split-root systems applied to the study of the legume-rhizobial symbiosis: What have we learned? *J. Integr. Plant Biol* 56(12), 1118-1124.
- LaRue, T.A., Child, J.J., 1979. Sensitive fluorometric assay for leghemoglobin. *Anal. Biochem.* 92, 11–15.
- Lee, J., Hopmans, J.W., Rolston, D.E., Baer, S.G., Six, J., 2009. Determining soil carbon stock changes: simple bulk density corrections fail. *Agric. Ecosyst. Environ.* 134, 251–256.
- Leib, B.G., Caspari, H.W., Redulla, C.A., Andrews, P.K., Jabro, J.J., 2006. Partial rootzone drying and deficit irrigation of “Fuji” apples in a semi-arid climate. *Irrig. Sci.* 24, 85–99.
- Letey, J., 1991. The study of soil structure-science or art. *Soil Res.* 29, 699–707.
- Li, Y., Tullberg, J.N., Freebairn, D.M., 2001. Traffic and residue cover effects on infiltration. *Soil Res.* 39(2), 239-247.
- Libault, M., 2014. The carbon-nitrogen balance of the nodule and its regulation under elevated carbon dioxide concentration. *Biomed Res Int.* Disponible online en: <https://doi.org/10.1155/2014/507946>. Visitado:14/08/2020.
- Lin, M.-H., Gresshoff, P.M.M., Ferguson, B.J., 2012. Systemic regulation of soybean nodulation by acidic growth conditions. *Plant Physiol.* pp-112.
- Lipiec, J., Hatano, R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116, 107–136.
- Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., Siczek, A., 2012. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil Tillage Res.* 121, 74–81.
- Lozano, L.A., 2014. Desarrollo de estructura laminar del suelo en siembra directa. Factores predisponentes y efectos sobre las propiedades hidráulicas. Tesis presentada para optar al grado de Doctor de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata. 138 pp.
- Lozano, L.A., Soracco, C.G., Villarreal, R., Ressia, J.M., Sarli, G.O., Filgueira, R.R., 2016. Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. *Rev. Bras. Cienc. do Solo*, v40.
- Lynch, J.P., Brown, K.M., 2012. New roots for agriculture: exploiting the root phenome. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 367, 1598–1604.
- Maekawa, T., Shimamura, S., Shimada, S., 2011. Effects of short-term waterlogging on soybean nodule nitrogen fixation at different soil reductions and temperatures. *Plant Prod. Sci.* 14, 349–358.
- Manchanda, G., Garg, N., 2008. Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Acta Physiol. Plant.* 30, 595–618.
- 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. Netherlands
- Marino, D., Frendo, P., Ladrera, R., Zabalza, A., Puppo, A., Arrese-Igor, C., Gonzalez, E.M., 2007. Nitrogen Fixation Control under Drought Stress. Localized or Systemic? *Plant Physiol.* 143, 1968–1974.
- Martins, J.M.F., Majdalani, S., Vitorge, E., Desauay, A., Navel, A., Guiné, V., Dañan, J.F., Vince, E., Denis, H., Gaudet, J.P., 2013. Role of macropore flow in the transport of *Escherichia coli* cells in undisturbed cores of a brown leached soil. *Environ. Sci. Process. Impacts* 15, 347–356.
- Masle, J., 1998. Growth and stomatal responses of wheat seedlings to spatial and temporal variations in soil strength of bi-layered soils. *J. Exp. Bot.* 49, 1245–1257.
- Masle, J., Passioura, J.B., 1987. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Funct. Plant Biol.* 14, 643–656.
- Mattalia, M.L., Bongiovanni, M. D., Cholaky C.G. 2018. Cambios en las propiedades físicas del suelo ante variaciones en la compactación. En actas: XXVI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. 15-18 May, Tucuman, Argentina.

- McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., Freebairn, D.M., 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agric. Syst.* 50(3), 255-272.
- McDaniel, M.D., Tiemann, L.K., Grandy, A.S., 2014. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecol. Appl.* 24(3), 560-570.
- McKenzie, D.C., McBratney, A.B., 2001. Cotton root growth in a compacted Vertisol (Grey Vertosol). I. Prediction using strength measurements and “limiting water ranges.” *Soil Res.* 39, 1157–1168.
- Meade, B., Puricelli, E., McBride, W. D., Valdes, C., Hoffman, L., Foreman, L., Dohlman, E., 2016 Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States. USDA Economic Information Bulletin, 154. Disponible online en: <https://ssrn.com/abstract=2981675>. Visitado: 13/08/2020
- Milesi Delaye, L.A., Irizar, A.B., Andriulo, A.E., Mary, B., 2013. Effect of continuous agriculture of grassland soils of the Argentine Rolling Pampa on soil organic carbon and nitrogen. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2013.
- Mirleau-Thebaud, V., Dayde, J., Scheiner, J.D., 2016. The influence of soil compaction and conservation tillage on sunflower’s (*Helianthus annuus* L.) below ground system. *Phyton Int J Exp Bot* Vol 86:53-67.
- Mon, R., 2008. Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda cálcica profunda. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña, España. 163pp. Disponible online: <http://hdl.handle.net/2183/1175>. Acceso: 23-11-2018.
- Montagu, K.D., Conroy, J.P., Atwell, B.J., 2001. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. *J. Exp. Bot.* 52, 2127–33.
- Monteith, J.L., 1986. How do crops manipulate water supply and demand? *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 316, 245–259.
- Monzon, J.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2012. Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *F. Crop. Res.* 130, 8–18.
- Morrás, H., Bonel, B., Michelena, R., 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa, in: *Actas XIX Congreso Argentino de Ciencia del Suelo*. Paraná (CD-ROM).
- Morrás, H., Bonel, M., Moretti, L., Favret, E., Bressan, E. 2008. Porosidad y microestructura superficial de un Argiudol típico bajo siembra directa y labranza reducida. En: *Actas XXI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo*. Potrero de los Funes, San Luis (CD-ROM).
- Mortier, V., Holsters, M., Goormachtig, S., 2012. Never too many? How legumes control nodule numbers. *Plant Cell Environ.* 35(2), 245-258.
- Mueller, L., Kay, B.D., Hu, C., Li, Y., Schindler, U., Behrendt, A., Shepherd, T.G., Ball, B.C., 2009. Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany: Part I: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil Tillage Res.* 103, 178–187.
- Mueller, L., Shepherd, G., Schindler, U., Ball, B.C., Munkholm, L.J., Hennings, V., Smolentseva, E., Rukhovic, O., Lukin, S., Hu, C., 2013. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil Tillage Res.* 127, 74–84.
- Mulholland, B.J., Black, C.R., Taylor, I.B., Roberts, J.A., Lenton, J.R., 1996. Effect of soil compaction on barley (*Hordeum vulgare* L.) growth. *J. Exp. Bot.* 47, 539–549.
- Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods soil Anal. part 3—chemical methods* 961–1010.

- Nelson, G.C., Rosegrant, M.W., Palazzo, A., Gray, I., Ingersoll, C., Robertson, R., Tokgoz, S., Zhu, T., Sulser, T.B., Ringler, C., 2010. Food security, farming, and climate change to 2050: scenarios, results, policy options. (Ed.) Intl Food Policy Res Inst. 131 pp.
- Nielsen, D.C., 1990. Scheduling irrigation for soy beans with creep water stress index (CWSI). *F. Crop Res.* 23(2), 103-116.
- Nosalewicz, A., Lipiec, J., 2014. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. *Plant Soil* 375, 229–240.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Melchiori, R.J.M., 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167–168, 254–260.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Piñeiro, G., 2017. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil Tillage Res.* 165, 128–136.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson, M.G., Sasal, M.C., 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195–196, 260–267.
- O’Dea, J.K., Jones, C.A., Zabinski, C.A., Miller, P.R., Keren, I.N., 2015. Legume, cropping intensity, and N-fertilization effects on soil attributes and processes from an eight-year-old semiarid wheat system. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 102, 179–194.
- Oades, J.M., 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76, 319–337.
- Oka-Kira, E., Kawaguchi, M., 2006. Long-distance signaling to control root nodule number. *Curr. Opin. Plant Biol.* 9(5), 496-502.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Tillage Res.* 73, 119–129.
- Panigatti, J.L., Buschiazzo, D.E., Marelli, H.J., Gil, R.C., Garay, A., Andriulo, A.E., Sasal, C., Rivero, M.L., Zaccagnini, M.E., Calamari, N.C., 2001. Siembra directa II. Ed. INTA- Hemisferio 333 pp.
- Paredes, D., Roba, M., Damico, J.P., Romito, A., Florean, R., Cura, J., Tesouro, O., 2009. Labranza vertical: efecto sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de soja (*glycine max*) bajo diferentes grados de compactación. En: Congreso Argentino de Ingeniería Rural. 10 Congreso Del Mercosur. 1-4 de Septiembre de 2009. Rosario, Santa Fe. Argentina.
- Parton, W.J., Ojima, D.S., Cole, C.V., Schimel, D.S., 1994. A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. En: Bryant, R.B., Arnold, R. (Eds.), Quantitative modeling of soil forming processes. SSSA Spec. Publ. 39. SSSA, Madison, WI. pp. 147–167.
- Passioura, J.B., 1983. Roots and drought resistance. *Agric. Water Manag.* 7, 265–280.
- Passioura, J.B., 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell Environ.* 25, 311–318.
- Passioura, J.B., 2006. Increasing crop productivity when water is scarce - From breeding to field management. *Agric. Water Manag.* 80, 176–196.
- Peralta, G, Mórtoła, N., Bressán, E., Romaniuk, R., Laghi, J. 2018. Desarrollo de una metodología para evaluar a campo la calidad estructural de suelos bajo siembra directa. (Field method to assess Topsoil quality under no-till). En actas: XXVI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. 15-18 Mayo. Tucumán, Argentina.
- Perroux, K.M., White, I., 1988. Designs for Disc Permeameters 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1205–1215.
- Pfeifer, J., Faget, M., Walter, A., Blossfeld, S., Fiorani, F., Schurr, U., Nagel, K.A., 2014. Spring barley shows dynamic compensatory root and shoot growth responses when exposed to localised soil compaction and fertilisation. *Funct. Plant Biol.* 41, 581–597.
- Piccolo, A., 1996. Humus and soil conservation. In: A. Piccolo (Ed.), *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, pp. 225-264.

- Piccolo, A., Pietramellara, G., Mbagwu, J.S.C., 1997. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma* 75(3-4), 267-277.
- Pilatti, M.A., de Orellana, J.A., 2000. The ideal soil: II. Critical values of an "ideal soil," for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *J. Sustain. Agric.* 17, 89–112.
- Pilatti, M.A., de Orellana, J.A., 2012. Suelos ideales para agricultura sostenible. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias*, 11(1), 65-88.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., 2014. Linear and nonlinear mixed effects models. R Packag. version 3. <http://cran.r-project.org/web/packages/nlme/>.
- Poepflau, C., 2016. Estimating root: shoot ratio and soil carbon inputs in temperate grasslands with the RothC model. *Plant Soil* 407, 293–305.
- Ponce, M.J., Mur, M., Palancar, T.C., Vázquez, J.M., Guilino, F.D., Merani, V.H., Balbuena, R.H., 2017. Descompactadores angulados laterales: Eficiencia de distintos diseños y configuraciones espaciales. *Cienc. del suelo* 35, 79–93.
- Pot, V., Peth, S.O.L.A.P.L.M.F., Monga, O., Vogel, L.E., Genty, A., Garnier, P., Baveye, P.C., 2015. Three-dimensional distribution of water and air in soil pores: comparison of two-phase two-relaxation-times lattice-Boltzmann and morphological model outputs with synchrotron X-ray computed tomography data. *Advances in Water Resources* 84, 87-102.
- Pulido Moncada, M., Gabriels, D., Lobo, D., Rey, J.C., Cornelis, W.M., 2014. Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. *Soil Tillage Res.* 139, 8–18.
- Purcell, L.C., 2000. Soybean canopy coverage and light interception measurements using digital imagery. *Crop Sci.* 40, 834–837.
- Purcell, L.C., de Silva, M., King, C.A., Kim, W.H., 1997. Biomass accumulation and allocation in soybean associated with genotypic differences in tolerance of nitrogen fixation to water deficits. *Plant Soil* 196, 101–113.
- Purcell, L.C., Serraj, R., de Silva, M., Sinclair, T.R., Bona, S., 1998. Ureide concentration of field-grown soybean in response to drought and the relationship to nitrogen fixation. *J. Plant Nutr.* 21, 949–966.
- Quiroga, A.R., Buschiazzo, D. E., Peinemann, N., 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Tillage Res.* 52(1-2), 21-28.
- Quiroga, A.R., Fernández, R., Noellemeyer, E., 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems. *Soil Tillage Res.* 105, 164–170.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H. J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. *Geoderma*, 314, 122-137.
- Racca, R., Collino, D., Dardanelli, J.L., Basigalup, D., González, N., Brenzoni, E., Hein, N., Balzarini, M., 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la Región Pampeana. Ed. INTA, Buenos Aires, Argentina. pp 1-36.
- Radford, B.J., Yule, D.F., McGarry, D., Playford, C., 2001. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil Tillage Res.* 61(3-4), 157-166.
- Ramos, J.C., Imhoff, S.D.C., Pilatti, M.Á., Vegetti, A.C., 2010. Morphological characteristics of soybean root apexes as indicators of soil compaction. *Sci. Agric.* 67, 707–712.
- Reid, J.B., Goss, M.J., 1982. Interactions between soil drying due to plant water use and decreases in aggregate stability caused by maize roots. *J. Soil Sci.* 33, 47–53.
- Reszkowska, A., Krümmelbein, J., Peth, S., Horn, R., Zhao, Y., Gan, L., 2011. Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China. *Plant Soil* 340, 59–72.
- Richards, L.A., 1948. Means and method of irrigating plants. U.S. Patent No. 2,445,717. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- Richmon, P., C.B. Irurtia, R. Mon, N. González, J. Elisei, y G. Tellería. 2010. Efectos de la descompactación del suelo en diferentes posiciones del relieve en condiciones de sequía. En actas: XXII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.
- Ritz, K., Young, I.M., 2004. Interactions between soil structure and fungi. *Mycologist* 18(2), 52-59.
- Roger-Estrade, J., Boizard, H., Richard, G., 2013. Maîtrise de la structure des sols cultivés: tassement et travail du sol, avec et sans labour. Chapitre 6. En: Baize, D.; Duval O, Richard, G. (Eds), *Les sols et leurs structures. Observations à différentes échelles Quae*. Pp.93-102.
- Romaniuk, R., Beltrán, M., Brutti, L., Costantini, A., Bacigaluppo, S., Sainz-Rozas, H., Salvagiotti, F., 2018). Soil organic carbon, macro-and micronutrient changes in soil fractions with different lability in response to crop intensification. *Soil Tillage Res.* 181, 136-143.
- Rosolem, C., Foloni, J.S., Tiritan, C., 2002. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil Tillage Res.* 65, 109–115.
- Rosolem, C.A., Takahashi, M., 1998. Soil compaction and soybean root growth . En: Box J.E. (eds) *Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems. Developments in Plant and Soil Sciences*, vol 82. Springer, Dordrech. Pp. 295–304.
- Rovera, J., C. Cholaky, J. Cisneros, J. González, y L. Beresio. 2014. Descompactación y dirección de siembra: efecto sobre propiedades hídricas y rendimientos de maíz. En actas: XXIV Congreso Argentino de Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Argentina.
- Rubio, G., Lynch, J.P., 2007. Compensation among root classes in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Soil* 290, 307–321.
- Sadras, V.O., 2004. Yield and water-use efficiency of water- and nitrogen-stressed wheat crops increase with degree of co-limitation. *Eur. J. Agron.* 21, 455–464.
- Sadras, V.O., 2005. A quantitative top-down view of interactions between stresses: Theory and analysis of nitrogen-water co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Aust. J. Agric. Res.* 56, 1151–1157.
- Sadras, V.O., Hall, A.J., Trapani, N., Vilella, F., 1989. Dynamics of rooting and root-length: leaf-area relationships as affected by plant population in sunflower crops. *F. Crop. Res.* 22, 45–57.
- Sadras, V.O., Milroy, S.P., 1996. Soil-water treshold for the responses of leaf expansion and gas exchange: a review. *F. Crop Res.* 47, 253–266.
- Sadras, V.O., O’Leary, G.J., Roget, D.K., 2005. Crop responses to compacted soil: Capture and efficiency in the use of water and radiation. *F. Crop. Res.* 91, 131–148.
- Sadras, V.O., Richards, R.A., 2014. Improvement of crop yield in dry environments: Benchmarks, levels of organisation and the role of nitrogen. *J. Exp. Bot.* 65, 1981–1995.
- Sadras, V.O., Rodriguez, D., 2010. Modelling the nitrogen-driven trade-off between nitrogen utilisation efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia. *F. Crop. Res.* 118, 297–305.
- Sadras, V.O., Whitfield, D.M., Connor, D.J., 1991. Transpiration efficiency in crops of semi-dwarf and standard-height sunflower. *Irrig. Sci.* 12, 87–91.
- Salvagiotti, F., Cassman, K.G., Weiss, A., Dobermann, A., 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to N fertilizer in soybeans. *F. Crop Res.* 65, 137–149.
- Sandaña, P., Ramírez, M., & Pinochet, D. (2012). Radiation interception and radiation use efficiency of wheat and pea under different P availabilities. *Field Crops Res.* 127, 44-50.
- Santachiara, G., Salvagiotti, F., Rotundo, J.L., 2019. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 240, 106-115.
- Sasal, M.C. 2012. 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. 126 pp.

- Sasal, M.C., Andriulo, A.E., Taboada, M.A., 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Tillage Res.* 87, 9–18.
- Sasal, M.C., Boizard, H., Andriulo, A.E., Wilson, M.G., Léonard, J., 2017a. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil Tillage Res.* 173, 33–41.
- Sasal, M.C., Castiglioni, M.G., Wilson, M.G., 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Tillage Res.* 108, 24–29.
- Sasal, M.C., Léonard, J., Andriulo, A., Boizard, H., 2017b. A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. *Soil Tillage Res* 173, 42–48.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1569–1578.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods* 9, 671.
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., Seidel, S.J., 2017. The effect of deep tillage on crop yield—What do we really know? *Soil Tillage Res.* 174, 193–204.
- Scianca, C., Varela, M. F., Barraco, M., Álvarez, C., Quiroga, A., 2013. Cultivos de cobertura en un Hapludol Thapto Árgico de La Pampa arenosa: análisis de cinco campañas. En: Álvarez C., Quiroga, A., Santos, D., Bodrero, M. Contribución de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción. Ediciones INTA, Anguil, La Pampa, Argentina. pp.105-116.
- Serraj, R., Vadez, V., Denison, R.F., Sinclair, T.R., 1999. Involvement of ureides in nitrogen fixation inhibition in soybean. *Plant Physiol.* 119, 289–296.
- Severina, I., 2012. Capacidad de uso del agua del subsuelo y productividad de dos genotipos de maní: efecto de la disponibilidad hídrica subsuperficial y la oferta fototermal. Tesis para obtener el grado de Magister de la Universidad de Buenos Aires área Producción Vegetal otorgado por Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 76 pp.
- Shaver, T.M., Peterson, G.A., Sherrod, L.A., 2003. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma* 116(1-2), 149–164.
- Shaver, T.M., Peterson, G.A., Sherrod, L.A., 2003. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma* 116, 149–164.
- Shepherd, T.G., 2009. Visual Soil Assessment. Volume 1. Field guide for pastoral grazing and cropping on flat to rolling country. Horizons Reg. Counc. Palmerst. North, New Zeal. Online: https://www.landcareresearch.co.nz/data/assets/pdf_file/0003/28677/VSA_Vol2_smaller.pdf. Acceso 23-11-2018.
- Shepherd, T.G., Saggar, S., Newman, R.H., Ross, C.W., Dando, J.L., 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Soil Res.* 39(3), 465–489.
- Shepherd, T.G., Saggar, S., Newman, R.H., Ross, C.W., Dando, J.L., 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Soil Res.* 39, 465–489.
- Shipitalo, M.J., Protz, R., 1989. Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. *Geoderma* 45, 357–374.
- Shukla, M.K., Lal, R., Ebinger, M., 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Tillage Res.* 87, 194–204.
- Siczek, A., Lipiec, J., 2011. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. *Soil Tillage Res.* 114, 50–56.
- SIIA, 2017. Sistema Integrado de Información Agropecuaria, [Programa de Servicios Agrícolas Provinciales](#). Series disponibles en: <http://old.sii.gov.ar/>
- Silva, D.M., Sodek, L., 1997. Effect of aluminum on soybean nodulation and nodule activity in a vertical split-root system. *J. Plant Nutr.* 20, 963–974.

- Sinclair, T.R., 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. *Field Crops Res.* 15(2), 125-141.
- Sinclair, T.R., Horie, T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci.* 29, 90–98.
- Sinclair, T.R., Rufty, T.W., 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Glob. Food Sec.* 1, 94–98.
- Singh, J., Salaria, A., Kaul, A., 2015. Impact of soil compaction on soil physical properties and root growth: A review. *Int. J. Food, Agric. Vet. Sci.* 5, 23–32.
- Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S.G., Nowatzki, J., 2018. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil Tillage Res.* 175, 234-243.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79, 7–31.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paustian, K., 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Am. J.* 66(6), 1981-1987.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32, 2099–2103.
- Smith, J.E., Aucaná, M.O., Hilbert, J.A., Irurtia, C.B., 2009. Subsolado profundo. su demanda energética y su efecto descompactador., in: Congreso Argentino de Ingeniería Rural. 10 Congreso Del Mercosur. 2. 1 a 4 de Septiembre de 2009. Rosario, Santa Fe, Argentina
- Smucker, A.J.M., McBurney, S.L., Srivastava, A.K., 1982. Quantitative Separation of Roots from Compacted Soil Profiles by the Hydropneumatic Elutriation System 1. *Agron. J.* 74, 500–503.
- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.* 118, 66–87.
- Soane, B.D., Van Ouwerkerk, C., 1994. Soil compaction problems in world agriculture En: B.D. Soane, C. van Ouwerkerk (Eds.). *Developments in Agricultural Engineering*, Elsevier, Volume 11, pp. 1–21.
- Soil Science Society of America, 2008. - Glossary of soil science terms 2008. ASA-CSSA-SSSA Press. Madison, WI. 80 pp.
- Soracco, C.G., Lozano, L.A., Sarli, G.O., Gelati, P.R., Filgueira, R.R., 2010. Anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Tillage Res.* 109, 18–22.
- Soracco, G., Filgueira, R.R., Sarli, G.O., Fournier, L.L., Gelati, P.R., Hilbert, J., 2009. Persistencia del efecto del subsolado sobre el movimiento del agua en el suelo en siembra directa: Uso de dos modelos teóricos. *Cienc. del suelo* 27, 77–87.
- Soracco, G., Lozano, L., Gelati, P., Sarli, G., Filgueira, R., 2008. Anisotropía en la porosidad de un suelo franco limoso bajo siembra directa continua. *Rev. la Fac. Agron.* 107, 1–6.
- Spoor, G., 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use and Management* 22(2), 113-122.
- Spoor, G., Tijink, F.G.J., Weisskopf, P., 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil Tillage Res.* 73(1-2), 175-182.
- Steffens, M., Kölbl, A., Totsche, K.U., Kögel-Knabner, I., 2008. Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (P.R. China). *Geoderma* 143, 63–72.
- Stirzaker, R.J., Passioura, J.B., Sutton, B.G., Collis-George, N., 1993. Soil management for irrigated vegetable production. II. Possible causes for slow vegetative growth of lettuce associated with zero tillage. *Aust. J. Agric. Res.* 44, 831–844.

- Stöckle, C.O., Kemanian, A.R., 2009. Crop radiation capture and use efficiency: a framework for crop growth analysis. *Crop Physiol. Appl. Genet. Improv. Agron. Acad. Press. San Diego, CA, USA* 145–170.
- Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough II, J.C., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Tillage Res.* 99, 4–48.
- Taboada, M.A., Álvarez, C.R., 2008. Root abundance of maize in conventionally-tilled and zero-tilled soils of Argentina. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 32, 769–779.
- Taboada, M.A., Barbosa, O.A., 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., Rodríguez, M.B., Cosentino, D.J., 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123, 233–244.
- Taboada, M.A., Micucci, F.G., Cosentino, D.J., Lavado, R.S., 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Tillage Res.* 49, 57–63.
- Tarchitzky, J., Hatcher, P. G., Chen, Y., 2000. Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils. *Soil Sci.* 165(4), 328–342.
- Tardieu, F., 1994. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signalling? *Soil Tillage Res.* 30, 217–243.
- Taylor, H., Brar, G.S., 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil Tillage Res.* 19, 111–119.
- Terminiello, A., Balbuena, R., Ariata, M., Hilbert, J., Claverie, J., Jorajuría, D. 2007. Descompactación del suelo y tráfico de siembra. Efectos sobre el rendimiento de soja (*Glycine max L merr*). En: 9 Congreso Argentino de Ingeniería Rural. 1 Congreso del Mercosur. 19 a 22 Septiembre. Córdoba, Argentina.
- Tesouro, M., Fuica, A.M., Venturelli, L., Masia, G., Smith, J.E., Figueiro, S.A. 2006. Evaluación de un accesorio escarificador para sembradoras de grano grueso. En: Díaz Rossello, R. and Rava C. (Eds). *Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono sur*. Montevideo: IICA, PROCISUR. Pp. 185-200
- Thomas, A.L., Guerreiro, S.M.C., Sodek, L., 2005. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean. *Ann. Bot.* 96, 1191–1198.
- Thomas, G.A., Titmarsh, G.W., Freebairn, D.M., Radford, B.J., 2007. No-tillage and conservation farming practices in grain growing areas of Queensland—a review of 40 years of development. *Aust. J. Exp. Agric.* 47, 887–898.
- Tolon-Becerra, A., Tourn, M., Botta, G.F., Lastra-Bravo, X., 2011. Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays L.*) seedling emergence and yields in the eastern Argentinean Pampas region. *Soil Tillage Res.* 117, 184–190.
- Tracy, S.R., 2013. The response of root system architecture to soil compaction. PhD Thesis, University of Nottingham. 172 pp. Online: <http://eprints.nottingham.ac.uk/13037/>. Acceso 23-11-2018.
- Tracy, S.R., Black, C.R., Roberts, J.A., Dodd, I.C., Mooney, S.J., 2015. Using X-ray Computed Tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture. *Environ. Exp. Bot.* 110, 11–18.
- Tweeten, L., Thompson, S.R.R., 2009. Long-term Global Agricultural output supply-demand balance and real farm and food prices. *Farm Policy J.* 6, 32.
- Unger, P., Kaspar, T., 1994. Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agron. J.* 86, 759–766.
- USDA, 1998. Soil Quality Test Kit Guide. USDA-ARS- NRCS-Soil Quality Institute, 88 pp.
- Utomo, W. H., Dexter, A. R., 1981. Age hardening of agricultural top soils. *Journal of Soil Science*, 32(3), 335-350.

- Vadez, V., 2014. Root hydraulics: The forgotten side of roots in drought adaptation. *F. Crop. Res.* 165, 15–24.
- Valentine, T.A., Hallett, P.D., Binnie, K., Young, M.W., Squire, G.R., Hawes, C., Bengough, A.G., 2012. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Ann. Bot.* 110, 259–270.
- Vallejos, A., Kees, M., Bondia, P., Echeverría, N., Silenzi, J., Zajac, C., De Lucia, M., 2014. Subsulado en siembra directa: efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Cienc. del Suelo* 32, 291–300.
- Van Opstal, N. V., Caviglia, O. P., Melchiori, R. J. M. 2011. Water and solar radiation productivity of double-crops in a humid temperate area. *Aust J Crop Sci*, 5(13), 1760.
- Vance, C.P., 2008. Carbon and nitrogen metabolism in legume nodules. En: Dilworth M.J., James E.K., Sprent J.I., Newton W.E. (eds) *Nitrogen-fixing Leguminous Symbioses. Nitrogen Fixation: Origins, Applications, and Research Progress*, vol 7. Springer, Dordrecht. pp.293-320.
- Veen, B.W., Boone, F.R., 1990. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. *Soil Tillage Res.* 16, 219–226.
- Vega, C.R.C., Andrade, F.H., Sadras, V.O., Uhart, S.A., Valentinuz, O.R., 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Sci.* 41, 748–754.
- Vega, C.R.C., Sadras, V.O., 2003. Size-dependent growth and the development of inequality in maize, sunflower and soybean. *Ann. Bot.* 91, 795–805.
- Vilche, M.S., Alzugaray, C., Montico, S., Di Leo, N., Falcone, R., 2010. La Incidencia de la Labor de Escarificado en el Ambiente Edáfico: Cultivo de Maíz (*Zea Mays* L.). *FAVE Sección Ciencias Agrar.* 9, 63–72.
- Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W., Bullock, D.G., 2006. No-till corn/soybean systems including winter cover crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1936–1944.
- Voorhees, W.B., Carlson, V.A., Senst, C.G., 1976. Soybean Nodulation as Affected by Wheel Traffic 1. *Agron. J.* 68, 976–979.
- Whalley, W.R., Clark, L.J., Gowing, D.J.G., Cope, R.E., Lodge, R.J., Leeds-Harrison, P.B., 2006. Does soil strength play a role in wheat yield losses caused by soil drying? *Plant Soil* 280, 279–290.
- White, R.G., Kirkegaard, J.A., 2010. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil—implications for water uptake. *Plant. Cell Environ.* 33, 133–148.
- Wildenschild, D., Sheppard, A.P., 2013. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems. *Advances in Water Resources* 51, 217-246.
- Williams, S.M., Weil, R.R., 2004. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1403.
- Wilson, M.G., Sasal, M.C., Caviglia, O.P., 2013. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma* 192, 354–361.
- Young, I. M., Ritz, K. 2000. Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil Tillage Res* 53(3-4), 201-213.
- Zahran, H.Z., 1999. Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen Fixation under Severe Conditions and in an Arid Climate. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 63, 968–989.
- Zawoznik, M.S., Tomaro, M.L., 2005. Effect of chlorimuron-ethyl on *Bradyrhizobium japonicum* and its symbiosis with soybean. *Pest Manag. Sci.* 61, 1003–1008.
- Zhan, A., Schneider, H., Lynch, J., 2015. Reduced lateral root branching density improves drought tolerance in maize. *Plant Physiol.* 168(4), 1603-1615.
- Zhang, H., 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil Tillage Res.* 31(2-3), 263-275.

Zhu, J., Brown, K.M., Lynch, J.P., 2010. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). *Plant, Cell Environ.* 33, 740–749

Zúñiga, F., Ivelic-Sáez, J., López, I., Huygens, D., Dörner, F.J., 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. *Soil Tillage Res.* 145, 233–241.

ANEXO

Cuadro A.1 Bibliografía analizada para el meta-análisis del Capítulo 3. PP=precipitación media anual; TM=temperatura media anual; MO= materia orgánica; Prof = profundidad de escarificado/subsolado; PR=resistencia a la penetración; INF=infiltración; BD=densidad aparente; TP=porosidad total; AP=porosidad de aireación; M=maíz; S=soja; W=trigo; Y=con rendimiento indicado; NA= no indicado; * = determinación de residualidad de la práctica.

Referencia	Ubicación	PP (mm)	TM (°C)	Tipo de suelo	Arena (g kg ⁻¹)	Limo (g kg ⁻¹)	MO (g kg ⁻¹)	Años SD	Tipo de Implemento (s)	Prof. (m)	Distancia entre púas	Propiedades medidas	Cultivo	
Álvarez et al., 2009	33°50'S; 61°29'W	Santa Emilia, Santa Fe	901	16,2	Argiudol Típico	149	600	31,9-32,6	10	Cultivie - Paratill	0,30	0,35-0,5	PR ^(*) , BD, INF, N	M ^(Y)
	34°11'S; 61°31'W	Teodelina, Santa Fe	845	16,3	Argiudol Típico	277	494	30,3-32,5						M ^(Y)
	33°54'S; 61°06'W	Colón, Buenos Aires	947	16,4	Argiudol Típico	277	494	29,5-31,1						M ^(Y)
Álvarez et al., 2006	34° 35' S; 61° 01' W	Junín, Buenos Aires	980	15,9	Hapludol Típico	570	270	27,0	4	Escarificador	0,36-0,42	0,8-0,9	PR ^(*) , BD, INF	M ^(Y)
	34°17' S; 62° 06' W	San Gregorio, Santa Fe	837	16,1	Hapludol Típico	430	380	35,0	12	Escarificador				M ^(Y)
	34° 54' S; 60° 02' W	Chivilcoy, Buenos Aires	944	17,3	Argiudol Típico	335	480	28,0	8	Paratill				0,52
Álvarez et al., 2010	33° 45' S; 60° 26' W	Acevedo, Buenos Aires	980	16,8	Argiudol Vértico	100	690	30,0	10	Paratill	0,30-0,45	0,52	PR ^(*) , BD, INF	M ^(Y)
	34°18'S; 60° 20' W	Salto, Buenos Aires	975	16,5	Argiudol Típico	160-230	590-620	36,0-39,0	3-8	Paratill				M ^(Y)
Bacigalupo et al., 2009	32° 32' S; 60° 51' W	Oliveros, Santa Fe	916	17,5	Argiudol Típico	40	745	26,4	8	Cultivie	0,25	0,50	NA	M ^(Y) , S ^(Y) , W ^(Y)
Bonel et al., 2004	33°01'S; 60°52'W	Zavalla, Santa Fe	960	16,8	Argiudol Vértico	44	714	29,3	12	Paratill	0,36	0,7	PR, BD, INF, TP, AP	S
Cerisola et al., 2014	34°18'S; 59°56'W	San Antonio de Areco, Buenos Aires	1033	16,7	Argiudol Típico	171	568	40,0	3	Cultivie	0,25-0,30	0,55	BD ^(*) , TP ^(*) , AP ^(*)	S
Cerliani et al., 2012	32°58'S; 64°39'W	La Aguada, Córdoba	809	16,8	Hapludol Típico	576	297	19,6	NA	Escarificador	0,25-0,30	NA	NA	M ^(Y)
Cerliani et al., 2014	32° 58' S; 64°39' W	La Aguada, Córdoba	809	16,8	Hapludol Típico	576	297	19,6	NA	Escarificador	0,25-0,30	0,30	PR	S ^(Y)
Cholaky et al., 2006	32° 46' S; 63° 48' W	General Deheza, Córdoba	779	16,9	Hapludol Típico	361	486	11,8	5	Escarificador	0,30	0,30	PR ^(*) , BD ^(*) , INF ^(*)	M, S
	32° 40' S; 63°40' W	General Cabrera, Córdoba	800	17,0	Hapludol Éntico	518	385	10,5						

Cholaky et al., 2010	32°46' S; 63°48' W	General Deheza, Córdoba	779	16,9	Hapludol Típico	532,8	314,6	12,2	6	Escarificador	0,23- 0,30	0,30	PR, BD	NA
Díaz-Zorita, 2000	34°54'S; 63°44'W,	Drabble, Buenos Aires	719	16,3	Hapludol Típico	470	385	30,1	5	Paratill	0,4	NA	PR ^(*) , BD,N	M ^(*)
Draghi et al., 2007	34°18'S; 59°56'W	San Antonio de Areco, Buenos Aires	1033	16,7	Argiudol Típico	171	568	40,0	3	Cultivie	0,25- 0,30	0,55	PR ^(*)	M
Elisei et al., 2012	33°56'S; 60°33'W	Pergamino, Buenos Aires	947	16,4	Argiudol Típico	175	597	26,4	7	Subsolador: Timones Curvos/rectos -	0,32- 0,35	0,5	PR, BD, INF, TP	W
Elisei et al., 2014	33°56'S; 60°33'W	Pergamino, Buenos Aires	947	16,4	Argiudol Típico	175	597	26,4	7	Subsolador: Timones Curvos/rectos	0,35	0,50	NA	M ^(*) , S ^(*)
Elisei et al., 2016	34°17'S; 60°15'W	Salto, Buenos Aires	975	16,5	Argiudol Típico	156	614	29,0	11	Escarificador	0,32	0,5	PR	M
Gerster et al., 2010	32° 32' S; 60° 51' W	Oliveros, Santa Fe	916	17,5	Argiudol Típico	40	745	NA	8	Cultivie	0,25	0,50	PR, BD	S ^(*)
Grosso et al., 2018	36° 49' S; 59°53' W	Azul, Buenos Aires	918	14,1	Argiudol Petrocálcico	353	347	54,4	10	Escarificador	0,23	0,53	INF	W ^(*)
Guecaimburú et al., 2014	34°19' S; 59°25' W	Azcuénaga, Buenos Aires	1056	16,7	Argiudol Típico	197	536	20,0	6	Paratill	0,30	0,5	PR ^(*) , BD ^(*) , INF ^(*)	W, S, M
Hilbert et al., 2003	34°18'S; 59°56'W	San Antonio de Areco, Buenos Aires	1033	16,7	Argiudol Típico	157	582	33,8	3	Cultivie	0,35- 0,40	0,70	PR ^(*) , INF	S ^(*)
Imvinkelried, 2016; Imvinkelried et al., 2018	31°25'S; 60°59'W	Esperanza, Santa Fe	970	18,5	Argiudol Ácuico	40	666	25,5	6	Paratill	0,35	0,7	PR ^(*) , BD ^(*) , AP	W ^(*) , S ^(*)
Lozano et al., 2016	36°42'S; 59°50'W	Azul, Buenos Aires	918	14,1	Paleudol Petrocálcico	490	220	40-56	20	Cinzel - Subsoiler	0,20- 0,35	0,53-0,57	PR, BD, TP, AP, INF, KSAT	S ^(*)
Mattalia et al., 2018	33°56'S; 64°27'W	Río Cuarto, Córdoba	809	16,8	Hapludol Típico	500	350	ND	10	Paratill	0,30	0,45	PR, BD, INF	M
Mon, 2008	34°17'S; 60°15'W	Salto, Buenos Aires	975	16,5	Argiudol Típico	128	626	28,4	NA	Cultivie,	0,35-0,4	0,70	PC ^(*) , PR ^(*) , BD ^(*) , INF ^(*) , TP, AP	S ^(*)
	32°24'S; 61°53'W	Bouquet, Santa Fe	893	17,1	Argiudol Típico	60	689	24,04						
	32°28'S; 61°34'W	Las Rosas, Santa Fe	893	17,1	Argiudol Típico	60	689	25,0						
Paredes et al., 2009	34° 36' S; 58° 40'	Hurlingham, Buenos Aires	1042	16,5	Argiudol Vértico	110	605	46	4	Cinzel; Cultivie	ND	0,27 0,5	PR, BD	S ^(*)

Peralta et al., 2018	34°18'S; 60° 20'W	Salto, Buenos Aires	975	16,5	Argiudol Típico	140	637	30,1	15	Paratill	0,30	0,5	PR ^(*) , BD ^(*) , TP, AP, INF	S ^(y)
Ponce et al., 2017	34°55' S, 51°57'W	Los Hornos, Buenos Aires	946	16,3	Argiudol Típico	230	540	37,0	NA	Subsolador: Timones Curvos/rectos	0,22- 0,24	0,35	PR	NA
Richmon et al., 2010	35°31' S, 60°57'W	9 de Julio, Buenos Aires	980	15,9	Hapludol Entico	652	201	232	10	Subsolador; Cinzel	0,25- 0,40	0,70	PR ^(*) , BD, INF	M ^(y)
Rovera et al., 2014	33°26' S, 64°07'W	Río Cuarto, Córdoba	809	16,8	Haplustol údico	ND	ND	ND	ND	Subsolador	0,27	0,40	INF	M ^(y)
Smith et al., 2009	34°18'S; 59°56'W	San Antonio de Areco, Buenos Aires	1033	16,7	Argiudol Típico	157	582	NA	NA	Cultivie,	0,35	0,5	PR ^(*) , BD ^(*)	NA
Soracco et al., 2008	34°18'S; 59°56'W	San Antonio de Areco, Buenos Aires	1033	16,7	Argiudol Típico	171	568	40,0	7	Cultivie	0,25- 0,30	0,55	BD, INF, KSAT	W
Soracco et al., 2009	34°18'S; 59°56'W	San Antonio de Areco, Buenos Aires	1033	16,7	Argiudol Típico	171	568	39,0-42,0	5	Cultivie	0,25- 0,30	0,55	BD, INF ^(*) , KSAT ^(*)	S
Terminiello et al., 2007	34°18'S; 59°56'W	San Antonio de Areco, Buenos Aires	1033	16,7	Argiudol Típico	171	568	32,0	5	Cultivie	0,30	0,60	PR ^(*)	S ^(y)
Tesouro et al., 2006	34° 36' S; 58°40' W	Hurlingham, Buenos Aires	1042	16,5	Argiudol Vértico	110	605	46,0	4	Escarificador	0,20	0,70	PR, BD, TP, AP	S ^(y)
Vallejos et al., 2014	38°16'S; 60° 8'W	Tres Arroyos, Buenos Aires	749	14,9	Paleudol Petrocalcico	420	300	36,0	10	Paratill	0,28- 0,30	0,52	PR ^(*) , BD ^(*) , TP ^(*) , AP ^(*)	S ^(y)
Vilche et al., 2010	33°01'S; 60°52'W	Zavalla, Santa Fe	960	16,8	Argiudol Vértico	44	714	29,3	14	Paratill	0,27- 0,30	0,35	PR, INF	M