



RELACIÓN ENTRE LA CALIDAD DEL SUELO Y VARIABLES ECOFISIOLÓGICAS DE LOS CULTIVOS DE TRIGO Y SOJA

**Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias
de la Universidad Nacional del Litoral**

**Horacio Omar Invinkelried
Ingeniero Agrónomo**

Director: Dr. Oscar Valentinuz

Co-Directora: Dra. Silvia Imhoff

Lugar de realización: Facultad de Ciencias Agrarias – UNL

Esperanza, Santa Fe

2016

Miembros del Jurado

Dr. Emilio Satorre

Dr. Gieco Jorge Omar

Dr. Salvagiotti Fernando

En memoria a Eugenio ...

Dedicada

A mi familia, Mariana, Lorenzo, Nacho, Pauli y Juli

Agradecimientos

A todas las personas que nombro a continuación por su apoyo y colaboración para la realización de esta tesis... y a muchas que aún sin nombrarlas fueron parte importante en distintos momentos en este camino.

A Silvia por guiarme en esta tarea

A Oscar por compartir su experiencia

A mis compañeros de cátedra, Mario, Ignacio y Marianela por su apoyo incondicional

A Javier, Celeste, Miguel, Mónica y Julio

A mis tesistas y pasantes por su predisposición y entusiasmo en las actividades de campo y laboratorio

A la UNL y Facultad de Ciencias Agrarias

A Jorge del INTA Rafaela que facilitó los análisis de suelo

A la Universidad Nacional del Sur, que a través de Juan me brindaron el acceso a sus laboratorios para completar la tesis.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABLAS	xv
RESUMEN	xviii
SUMMARY	xx
Introducción General	1
Antecedentes	2
Hipótesis	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos	15
Metodología General para Capítulos I, II y III	16
-Diseño experimental	16
-Determinaciones químicas de suelo y fertilización	17
-Determinaciones físicas del suelo	19
-Determinación del Rendimiento, materia seca total, tasa de crecimiento del cultivo, duración e índice de área foliar	21
-Radiación fotosintéticamente activa interceptada y acumulada, eficiencia uso de la radiación	22
-Evapotranspiración del cultivo, balance y eficiencia uso agua	23
-Índice de días de estrés (WSD)	24
-Eficiencia uso de nutrientes P y N	24
-Productividad de los recursos agua y radiación	26
-Balance de Carbono del suelo	26
-Determinación de la Materia Orgánica Particulada	27
-Mediciones de raíces en Soja	27

-Análisis estadístico	28
Capítulo I: Variables meteorológicas, de suelo y ecofisiológicas que explican el rendimiento del cultivo de soja	
Introducción	29
Resultados y discusión	34
Caracterización agrometeorológica	34
Balance hídrico	38
Condiciones químicas y físicas del suelo	42
Intervalo hídrico óptimo (IHO) e índice de días de estrés (SWD)	50
Variables ecofisiológicas del cultivo de soja	55
Eficiencia en el uso de los recursos: agua, radiación y fósforo	68
Análisis de correlación entre variables de suelo y cultivo para las diferentes campañas de soja	78
Conclusiones	80
Capítulo II: Variables meteorológicas, de suelo y ecofisiológicas que explican el rendimiento del cultivo de trigo.	
Introducción	81
Resultados y discusión	85
Caracterización agrometeorológica	85
Balance hídrico	90
Condiciones químicas y físicas del suelo	94
Intervalo hídrico óptimo (IHO) e índice de días de estrés (SWD)	102
Variables ecofisiológicas del cultivo de trigo	104
Eficiencia en el uso de los recursos: agua, radiación y nitrógeno	112

Análisis de correlación entre variables de suelo y cultivo de trigo	118
Conclusiones	118
Capítulo III: Productividad del agua y de la radiación en la secuencia de cultivos T/S y balance de la materia orgánica del suelo	119
Introducción	120
Resultados y discusión	124
Productividad, eficiencia de uso y captura del agua y la radiación	124
Balance de Carbono del suelo	129
Análisis de la Materia Orgánica Particulada	131
Conclusiones	132
Conclusiones finales	133
Especulaciones agronómicas	135
Bibliografía	136

LISTA DE ABREVIATURAS

Ad	alta fertilización descompactado
AF	área foliar
AFE	área foliar específica
Asd	alta fertilización sin descompactar
B	biomasa
Bd	baja fertilización descompactado
Bsd	baja fertilización sin descompactar
BT	biomasa total
C	carbono
C_R	carbono rastrojo
C-CO ₂	carbono de dióxido de carbono
C-MOP	carbono de la materia orgánica particulada
COP	carbono orgánico particulado
COS	carbono orgánico del suelo
COT	carbono orgánico total
CRH	curva retención hídrica
CRP	curva resistencia mecánica
CV	coeficiente de variación
DAF	duración del área foliar
Dp	densidad de partículas
Ds	densidad aparente de suelo
Dsc	densidad de suelo crítica
ECA	eficiencia captura del agua
ECR	eficiencia captura de la radiación

EFN_G	eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno en grano
EFP	eficiencia fisiológica uso fósforo
EFR_P	eficiencia recuperación fósforo
EFR_N	eficiencia recuperación nitrógeno
ETc	evapotranspiración del cultivo
ETcaj	evapotranspiración del cultivo ajustada
ETo	evapotranspiración del cultivo de referencia o potencial
EUA_B	eficiencia uso del agua en biomasa
EUA_G	eficiencia uso del agua en grano
EUA	eficiencia de uso del agua
EUN_B	eficiencia uso del nitrógeno en biomasa
EUN_G	eficiencia uso del nitrógeno en grano
EUP	eficiencia uso del fósforo
EUR	eficiencia de uso de la radiación
EUR_B	eficiencia uso de la radiación en biomasa
EUR_G	eficiencia uso de la radiación en grano
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FBN	fijación biológica de nitrógeno
G	grano
IAF	índice de área foliar
IC	índice de cosecha
IHO	intervalo hídrico óptimo
ISI	índice de intensificación de la secuencia
kc	coeficiente del cultivo
kcs	coeficiente de cultivo simplificado

ks	coeficiente del cultivo por estrés hídrico
LLWR	<i>least limiting water range</i>
MF	madurez fisiológica
MO	materia orgánica
MS	materia seca
MS A + 7 d	materia seca antesis más 7 días
MS I Enc	materia seca inicio encañazón
MS M. Enc	materia seca mediados encañazón
N	nitrógeno
NC	nivel de compactación
NF	nivel de fertilización
NG	número de granos
P abs	fósforo absorbido
P	fósforo
Pa	porosidad de aireación del suelo
PA	productividad del agua
PCE	período crecimiento de la espiga
Pe	precipitación efectiva
p_{out}	frecuencia que el contenido de agua del suelo permanece fuera IHO
PR	productividad de la radiación
PT	porosidad total
%RI	porcentaje de interceptación de la radiación
R(T+S)	rastrojo trigo más soja
R_S	rastrojo soja
R_T	rastrojo trigo

RFA	radiación fotosintéticamente activa
RFAinc	radiación fotosintéticamente activa incidente
RFAi	radiación fotosintéticamente activa interceptada
RFAi acum	radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada
RP	resistencia del suelo a la penetración
Rdto	rendimiento
S	soja
SD	siembra directa
T	trigo
TCC	tasa de crecimiento del cultivo
WSD	<i>water stress days</i> , días de estrés por agua
ΔA_{lm}	variación del almacenamiento de agua en el suelo
θ	contenido volumétrico de agua
θ_{CC}	contenido hídrico volumétrico en capacidad de campo
θ_{PA}	contenido hídrico volumétrico en 10% de porosidad de aeración
θ_{PMP}	contenido hídrico volumétrico en punto de marchitez permanente
θ_{RP}	contenido hídrico volumétrico en 2,5 MPa de resistencia a la penetración
ψ	altura de tensión de agua; potencial agua

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I	Página
Figura 1-1. Evolución de la fenología del cultivo, lluvias, temperaturas máximas, mínimas y medias y radiación fotosintéticamente activa incidente durante los meses de noviembre a abril correspondiente a la campaña 2008/09.	35
Figura 1-2. Evolución de la fenología del cultivo lluvias, temperaturas máximas, mínimas y medias y radiación fotosintéticamente activa incidente durante los meses de noviembre a abril correspondiente a la campaña 2009/10.	36
Figura 1-3. Evolución de la fenología del cultivo lluvias, temperaturas máximas, mínimas y medias y radiación fotosintéticamente activa incidente durante los meses de noviembre a abril correspondiente a la campaña 2010/11.	37
Figura 1-4. Variación de almacenaje de agua en el suelo y precipitación efectiva en la campaña 2008/09 (C1) para los distintos tratamientos.	40
Figura 1-5. Variación de almacenaje de agua en el y precipitación efectiva (Pe, mm) en la campaña 2009/10 (C2) para los distintos tratamientos.	40
Figura 1-6. Variación de almacenaje de agua en el suelo y precipitación efectiva en la campaña 2010/11 (C3) para los distintos tratamientos.	41
Figura 1-7. Densidad aparente del suelo a nivel superficial A y sub-superficial B para las campañas de soja 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) Apertura de la interacción NC*Año.	47
Figura 1-8. Resistencia a la penetración del suelo superficial A y sub-superficial B para las campañas de soja 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3). Apertura de la interacción NC*Año	48
Figura 1-9. Porosidad de aireación del suelo superficial A y subsuperficial B para para las campañas de soja 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3). Apertura de la interacción NC*Año.	49
Figura 1-10. Densidad de suelo relativa (Dsr, %) superficial (de 0-7 cm) (A) y subsuperficial (de 8-12 cm) (B) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)]. Apertura de la interacción NC*Año.	50
Figura 1-11. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (Ds) para θ críticos de (Pa), (CC), (RP) y (PMP) en suelos descompactados y sin descompactar superficialmente de un cultivo de soja.	51
Figura 1-12. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (Ds) para θ críticos de (Pa), (CC), (RP) y (PMP) en suelos descompactados y sin descompactar subsuperficialmente de un cultivo de soja.	52
Figura 1-13. Porcentaje de radiación interceptada (%RI) en el estado fenológico R1 (inicio de floración) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)]. Apertura de la interacción NF*Año.	57
Figura 1-14. Biomasa total (g m^{-2}) en el estado fenológico R4 (plena fructificación) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3). Apertura de la interacción NF*Año	58
Figura 1-15. Biomasa total (g m^{-2}) en el estado fenológico R6 (máximo tamaño de semillas) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NF*Año.	58
Figura 1-16. Tasa de crecimiento del cultivo en el período de crecimiento (R4-R6) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NC*Año	60
Figura 1-17. Tasa de crecimiento del cultivo en el período de crecimiento (R4-	60

R6). Apertura de la interacción NC*NF	
Figura 1-18. Rendimiento (Rdto. g m^{-2}) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NC*Año.	62
Figura 1-19. Peso de mil granos (gramos) [P1000 (g)] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NC*Año.	64
Figura 1-20. Rendimiento (Rdto) en función del índice de días de estrés hídrico (WSD) para las campañas de soja C1:2008/09 (08), C2:2009/10 (09) y C3:2010/11 (10) para los tratamientos [Ad (alta fertilización descompactado), Asd (alta fertilización sin descompactar), Bd (baja fertilización descompactado) y Bsd (baja fertilización sin descompactar)].	65
Figura 1-21. Correlación entre el área bajo la curva de la densidad longitudinal de raíces y el rendimiento alcanzado por el cultivo para diferentes profundidades [15 cm (A), 25 cm (B), 35 cm (C) y 0-35 cm de profundidad (D)]	68
Figura 1-22. Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada durante el ciclo del cultivo de soja [RFAi acum ciclo (MJ)] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NC*NF*Año.	70
Figura 1-23. Eficiencia uso de la radiación para el período de crecimiento R4-R6 [EUR (R4-R6, $\text{g m}^{-2} \text{MJ}^{-1}$)] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NC*Año.	71
Figura 1-24. Eficiencia uso de la radiación para el período de crecimiento R4-R6 [EUR (R4-R6, $\text{g m}^{-2} \text{MJ}^{-1}$)] Apertura de la interacción NC*NF.	72
Figura 1-25. : Eficiencia fisiológica del P para la producción de grano [EFP_G (kg de grano producido por kg de P absorbido, para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NF*Año.	76
Figura 1-26. Eficiencia de recuperación del P en planta [EFR_P (kg de P absorbido sobre kg de P aplicado] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)]. Apertura de la interacción NF*Año.	77
Figura 1-27. Balance de P [P aplicado-P exportado en grano] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] Apertura de la interacción NC*Año.	77
Figura 1-28. Balance de P [P aplicado-P exportado en grano] Apertura de la interacción NF*NC.	77

Capítulo II

Figura 2-1. Cociente fototermal (Q) durante el período crítico y llenado de granos del cultivo de trigo en campañas 2009, 2010 y 2011.	88
Figura 2-2. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas y de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de trigo 2009.	89
Figura 2-3. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas y de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de trigo 2010.	90
Figura 2-4. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas y de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de trigo 2011.	91
Figura 2-5. Variación del almacenaje de agua total del suelo y precipitación efectiva acumulada (Pe) en función de los intervalos de medición para las campañas de trigo 2009, 2010 y 2011 según los diferentes tratamientos.	93
Figura 2-6. Evolución del fósforo extractable (P) en ppm, según nivel de	97

fertilización A o B en la secuencia de cultivo trigo 2009; soja 2009/10, Trigo 2010, soja 2010/11, trigo 2011 y final ensayo. Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

- Figura 2-7.** Densidad de suelo superficial (Ds sup) (A), porosidad de aireación superficial (Pa sup) (B), densidad de suelo relativa superficial (Dsr sup) (C). Apertura de la interacción NC*Año. 100
- Figura 2-8.** Resistencia a la penetración superficial y profunda (RP sup y RP prof) (A y B). Apertura de la interacción NC*Año. 101
- Figura 2-9.** Evolución en el tiempo de la Ds (A), Resistencia a la penetración RP (MPa) (B) y Porosidad de aireación (%Pa) (C) superficial y profunda según nivel de compactación del suelo, descompactado (d) y sin descompactar (sd) respectivamente, en la secuencia de cultivos S-T/S-T/S-T. 103
- Figura 2-10.** Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) en función de la densidad de suelo (Ds) según θ críticos de resistencia del suelo a la penetración (RP), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) y porosidad de aeración (Pa) para suelos descompactados y sin descompactar superficial (A y B) y subsuperficialmente (C y D) en un cultivo de soja. IHO= intervalo hídrico óptimo. Dsc= Ds crítica (IHO= 0). Líneas representan la Ds al inicio de las distintas campaña de trigo (C1= 2009 (línea continua), C2= 2010 (línea discontinua) y C3= 2011(línea de puntos). 104
- Figura 2-11.** Índice de días de estrés (WSD) en función de los distintos tratamientos [alta fertilización descompactado (Ad), alta fertilización sin descompactar (Asd), baja fertilización descompactado (Bd) y baja fertilización sin descompactar (Bsd)]. 105
- Figura 2-12.** Materia seca total a madurez fisiológica (MS_MF). Apertura de la interacción NF*NC. 107
- Figura 2-13.** Porcentaje de radiación interceptada (% RI) en A+7d en trigo: Apertura de la interacción NF*Año 109
- Figura 2-14.** Peso de mil granos expresado en gramos (P1000 g) Apertura de la interacción NF*Año. 111
- Figura 2-15.;** Número de espigas por metro cuadrado ($E\ m^{-2}$) Apertura de la interacción NF*Año. 111
- Figura 2-16.** Rendimiento (Rdto) del cultivo de trigo en función del índice de días de estrés (WSD) para las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3). 113
- Figura 2-17.** Eficiencia de uso de agua en grano (EUA_G) (A) y en biomasa (EUA_B) (B) del cultivo de trigo. Apertura de la interacción NF*NC. 115
- Figura 2-18.** Nitrógeno absorbido total (Nabs_total) del cultivo de trigo. Apertura de la interacción NF*NC. 118

LISTA DE TABLAS

CAPITULO I	Página
Tabla 1-1. Lluvias desde noviembre a abril para las campañas de soja 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3).	35
Tabla 1-2. Fechas de ocurrencia de los distintos estadios fenológicos reproductivos del cultivo de soja para las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11.	38
Tabla 1-3. Precipitación efectiva, evapotranspiración de referencia, coeficiente de cultivo, evapotranspiración de cultivo y balance de agua del cultivo de soja para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (3).	38
Tabla 1-4. Evapotranspiración ajustada del cultivo de soja para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) según los factores fertilización y compactación.	42
Tabla 1-5. Fósforo asimilable (P, ppm), materia orgánica (MO, %), nitrógeno total (Nt, %), azufre (S, ppm) y pH del suelo al inicio de cada campaña de soja (0-20 cm de profundidad) en cada tratamiento.	43
Tabla 1-6. Análisis de la varianza para las variables densidad aparente, resistencia a la penetración, porosidad de aireación y densidad de suelo relativa según nivel de fertilización y de compactación, año y sus interacciones.	44
Tabla 1-7. Variables densidad aparente suelo (D_s , $g\ cm^{-3}$), resistencia a la penetración (RP, MPa) y porosidad de aireación (Pa, %) a dos profundidades [superficial (de 0-7 cm) y subsuperficial (de 8-12cm)] según nivel de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] al inicio del ensayo C1: 2008-09.	45
Tabla 1-8. Parámetros de ajuste de la curva de resistencia a la penetración para suelos descompactados (d) y sin descompactar (sd) para la profundidad superficial (0-7 cm) y sub-superficial (8-13 cm).	53
Tabla 1-9. Contendio hídrico del suelo (θ) e intervalo hídrico óptimo (IHO) según densidad del suelo (D_s) para los tratamientos descompactados y sin descompactar a nivel superficial y subsuperficial.	53
Tabla 1-10. Análisis de la varianza del índice de área foliar (IAF), porcentaje de radiación interceptada (% RI) y biomasa total ($g\ m^{-2}$); en diferentes estados fenológicos del cultivo de soja (R1= inicio de floración; R4= plena fructificación; R6= máximo tamaño de semilla; R8=plena madurez) según nivel de fertilización (NF), de compactación (NC), año y sus interacciones.	56
Tabla 1-11. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, $g\ m^{-2}\ día^{-1}$) y duración del área foliar (DAF, $m^2\ día^{-1}$) en el período de crecimiento R4-R6 de soja, según los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] y de compactación [NC, sin descompactar (sd) y descompactado (d)], año y sus interacciones. Análisis de varianza.	59
Tabla 1-12. Análisis de la varianza para Rendimiento (Rdto) y sus componentes [$N^{\circ}pl\ m^{-2}$ = número de plantas m^{-2} ; $N^{\circ}V\ m^{-2}$ = número de vainas m^{-2} ; $N^{\circ}G\ m^{-2}$ = número de granos m^{-2} ; P1000= peso de mil granos] e índice de cosecha (IC%) según los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] y de compactación [NC, sin descompactar (sd) y descompactado (d)], años 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010-11 (C3) y sus interacciones.	61
Tabla 1-13. Densidad longitudinal radical en el surco (S) y entresurco (ES) ($cm\ cm^{-3}$) del cultivo de soja C1:2008/09 en distintos momentos (V3, R3 y R6) según el nivel de compactación (NC) sin descompactar (sd) y descompactado (d) y el nivel de fertilización (NF) alta (A) y baja (B) y la interacción de los factores (NF*NC).	66
Tabla 1-14. Área bajo la curva de la densidad longitudinal de raíces ($ABC\ \delta l_r\ cm^2$)	67

para los distintos tratamientos [Ad (alta fertilización descompactado), Asd (alta fertilización sin descompactar), Bd (baja fertilización descompactado) y Bsd (baja fertilización sin descompactar)] a distintas profundidades (15, 25 y 35 cm) y profundidad total medida (0-35 cm)

- Tabla 1-15.** Análisis de la varianza para Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada durante el ciclo (RFAi acum ciclo) y eficiencia de uso de la radiación (EUR) [en función de la biomasa acumulada durante el ciclo total (EUR BT ciclo), biomasa acumulada en el período R4-R6 (EUR BT R4-R6) y rendimiento en grano (EUR G)] del cultivo de soja, según los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] y de compactación [NC, sin descompactar (sd) y descompactado (d)], años 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010-11 (C3) y sus interacciones. 69
- Tabla 1-16.** Eficiencia en el uso del agua del cultivo de soja en función de la biomasa total (EUA_BT, $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) y de la producción de granos (EUA_G, $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) según nivel de fertilización (A= alta y B= baja) y de compactación (d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones. 73
- Tabla 1-17.** Fósforo absorbido total (P_abs total), eficiencia fisiológica (EFP_G) y de uso (EUP_G) del P en grano, eficiencia de recuperación de P en planta (EFR_P) y balance de P (P aplicado en fertilizante – P exportado en grano) para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) según nivel de fertilización (A= alta y B= baja) y de compactación (d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones. 75
- Tabla 1-18.** Análisis de la varianza para concentración en % de P en grano (%P G) y P en rastrojo soja (mg kg^{-1}) para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) según nivel de fertilización (NF A= alta y B= baja) y de compactación (d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones. 78
- Tabla 1-19.** Matriz de correlación: coeficientes de correlación de Spearman entre variables de suelo y cultivo campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11 79
- Tabla 1-20.** Matriz de correlación: coeficientes de correlación de Spearman entre variables de suelo y cultivo campañas 2008/09 y 2010/11. 80

CAPITULO II

- Tabla 2-1.** Lluvias desde mayo a noviembre para las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3). 87
- Tabla 2-2.** Detalle de fechas de ocurrencia de las distintas etapas fenológicas del cultivo de trigo para las campaña 2009, 2010 y 2011. 87
- Tabla 2-3.** Temperatura media y radiación fotosintéticamente activa incidente promedio mensual e histórico para las campañas de trigo 2009, 2010 y 2011. 88
- Tabla 2-4.** Condiciones ambientales durante el desarrollo del cultivo de trigo en las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3). 92
- Tabla 2-5.** Evapotranspiración ajustada o real del cultivo de trigo para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) según nivel de fertilización, nivel de compactación y su interacción (NF*NC). 94
- Tabla 2-6:** Análisis de la varianza para Materia Orgánica, pH, fósforo asimilable, azufre, nitrógeno de nitratos y nitrógeno total al inicio de cada campaña de trigo según los distintos tratamientos. 97
- Tabla 2-7** Densidad de suelo, densidad relativa, resistencia a la penetración y porosidad de aireación a dos profundidades para las campañas 2009 (C1), 2010 98

(C2) y 2011 (C3) según nivel de fertilización y nivel de compactación.	
Tabla 2-8 Materia seca acumulada en diferentes momentos del cultivo de trigo y tasa de crecimiento del cultivo según el nivel de fertilización, nivel de compactación y su interacción (NF*NC) para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3).	106
Tabla 2-9 Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada a lo largo del ciclo, índice de área foliar y porcentaje de interceptación de la radiación fotosintéticamente activa incidente del cultivo de trigo en diferentes momentos según el nivel de fertilización, el nivel de compactación y sus interacciones, para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3).	109
Tabla 2-10 Componentes del, rendimiento (Rdto) e índice de cosecha (IC) del cultivo de trigo según el nivel de fertilización, de compactación y su interacción (NF*NC) para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3).	110
Tabla 2-11 Eficiencia de uso de la radiación en grano y en biomasa total y eficiencia de uso del agua en grano y en biomasa total para el cultivo de trigo según el nivel de fertilización, de compactación y sus interacciones para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3).	114
Tabla 2-12 Análisis de la varianza, Nitrógeno total absorbido, eficiencia fisiológica de N en grano, eficiencia de uso del N en grano, eficiencia fisiológica de N en biomasa total, eficiencia de uso del N en biomasa total y eficiencia de recuperación de N en biomasa total para el cultivo de trigo según el nivel de fertilización, de compactación y sus interacciones para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3).	117
Tabla 2-13. Matriz de correlación, coeficientes y probabilidades para las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3). Variables de suelo y variables de cultivo trigo.	119
 CAPITULO III	
Tabla 3-1. Productividad del agua en grano y en biomasa total, eficiencia de uso del agua en grano y en biomasa total, eficiencia de uso del agua en equivalente glucosa y eficiencia de captura del agua según nivel de fertilización, nivel de compactación y su interacción (NF*NC) en la secuencia de cultivos soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo.	126
Tabla 3-2. Productividad de la radiación en grano y en biomasa total), eficiencia de uso de la radiación en grano y en biomasa total, eficiencia uso radiación en equivalente glucosa y eficiencia de captura de la radiación según nivel de fertilización, nivel de compactación y su interacción (NF*NC) en la secuencia de cultivos soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo.	127
Tabla 3-3. Matriz de correlación entre variables de suelo y de cultivo para la secuencia de cultivos en las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11. Coeficientes de Spearman.	129
Tabla 3-4. Producción de biomasa aérea total de trigo, soja y de trigo-soja, aporte de rastrojos al suelo de trigo, soja y de trigo-soja; aporte de carbono a través de los rastrojos según nivel de fertilización, nivel de compactación y sus interacciones en la secuencia de cultivos soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo.	131
Tabla 3-5. Balance de carbono del suelo para la secuencia de cultivo soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo según factores principales y sus interacciones.	132
Tabla 3-6. Carbono orgánico total y carbono asociado a la materia orgánica particulada de la secuencia trigo/soja según el nivel de fertilización y el nivel de compactación.	133

RESUMEN

La degradación de los suelos de la región centro-norte de la provincia de Santa Fe y la consecuente pérdida de productividad de los sistemas agrícolas se atribuye a dos factores principales: la compactación producida por el laboreo y tránsito de la maquinaria y la pérdida de fertilidad química debida a la prolongada extracción de nutrientes por los cultivos sin reposición. Las prácticas tecnológicas de descompactación del suelo y fertilización estratégica han sido propuestas para revertir esos problemas, aumentando la eficiencia de uso de los recursos y, como consecuencia, la producción de materia seca y el rendimiento. El objetivo general de este trabajo fue evaluar los cambios producidos en la calidad física y química del suelo y su efecto sobre variables ecofisiológicas de los cultivos de trigo y soja en la secuencia S-T/S-T/S-T en condiciones de campo con dos niveles de compactación y fertilización, y detectar posibles interrelaciones entre variables de cultivos y propiedades físicas del suelo.

El ensayo se llevó a cabo en la Unidad Experimental de Cultivos Extensivos ubicado en Esperanza-Santa Fe-Argentina, sobre la Ruta N° 70, km 26, durante las campañas 2008/2009 (C1), 2009/2010 (C2) y 2010/2011(C3) en la secuencia soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo sobre un suelo argiudol ácuico. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con arreglo factorial y tres repeticiones. Los tratamientos surgieron de la combinación de dos factores (fertilización -F- y compactación -C-) y dos niveles F (alta y baja) y C (descompactado 'd' y sin descompactar 'sd'). Se diferenciaron distintos escenarios desde el punto de vista hídrico; donde se podrían mencionar como: (i) C1 muy seca para soja y seca para trigo; (ii) C2 húmeda para soja y con buena reserva de agua en el suelo para el trigo; (iii) C3 moderadamente seca para soja y húmeda para trigo.

Los resultados indican la persistencia del efecto residual positivo de la descompactación inicial sobre la resistencia mecánica (RP) y porosidad de aireación del suelo (Pa) luego de 3 años de realizada la labor. En soja la compactación del suelo fue más importante como factor limitante del rendimiento y la producción de biomasa que la fertilidad química del mismo; en suelos d logró un 16,4 %, 21% y 12 % más de biomasa total, eficiencia en el uso del agua y radiación respectivamente y la respuesta en rendimiento estuvo condicionada al año.

En trigo la fertilización en altas dosis con respecto a la baja produjo mayores producciones de biomasa (+ 9,7 %) y de rendimiento (+ 13 %) y aumentó la eficiencia del uso del agua y la producción de biomasa total. En el nivel d el rendimiento fue un 4,7 % superior

respecto a sd. La fertilización con P logró aumentar el contenido de P en el suelo en un 9,5 y 94 % para bajo y alto nivel de fertilización respectivamente.

En la secuencia de cultivos en su conjunto la EUR_B, EUA_B, ECA y ECR se asociaron en forma negativa con la variable de suelo RP en profundidad, lo que señala la fuerte influencia que esta propiedad tiene para reducir la productividad de los cultivos, siendo estas variables de cultivo las más adecuadas para la detección de cambios en el corto plazo de las propiedades del suelo. En este estudio se verificó que las parcelas d al inicio del ensayo lograron incorporar un 3 % más de carbono al suelo con respecto a las sd al cabo de 3 años.

Palabras clave: trigo, soja, propiedades físicas del suelo, fertilización, eficiencia uso recursos

SUMMARY

Soil degradation in central-north region of Santa Fe province and the consequent loss of productivity of the agricultural systems is attributed to two main factors: soil compaction due to tillage and machinery traffic, and loss of chemical fertility because the extensive extraction of nutrients by the crops. The technological practices of decompaction and fertilization has been propoused to revert these problems, to increase the resources use efficiency and, consequently, the dry matter production end crop yields. The aim of this study was to evaluate changes in soil chemistry and physical quality and in the ecophysiological variables of wheat and soybean under field conditions due to the application of strategies of decompaction and fertilization, and to determine whether any of theecophysiological variables can be used as an indicator of changes in soil quality.

The experiment was conducted in Esperanza, Department Las Colonias, Santa Fe, Argentina (31°25'35.05''S 60°59'30.36''W) during the 2008/2009, 2009/2010 and 2010/2011) in sequence soybean-wheat/soybean-wheat/soybean-wheat on an aquic argiudoll soil. The experimental design was randomized complete block factorial arrangement and three replications. Each treatment resulted from the combination of two factors and two levels: (i) fertilization (high and low) and (ii) soil compaction (decompacted 'd' and without decompacted 'sd'). Different scenarios differed from the view point of water; where they could be mentioned as: (i) C1 for very dry to dry soybeans and wheat; (ii) C2 wet for soybean and good water reserve in the soil for wheat; (iii) C3 moderately dry to wet to soy and wheat.

The results indicate the persistence of the residual positive effect of the initial decompaction on soil resistance penetration (SR) and soil aeration porosity (Ap). In soybean soil compaction was more important as a limiting factor for performance and biomass production of the chemical fertility; d soils achieved 16,4%, 21% and 12% more total biomass, water use efficiency and radiation respectively and yield response was conditioned per year.

In wheat fertilization in high doses relative to the low yields of biomass produced higher (+ 9,7%) and yield (+13%) and increased tolerance to higher compaction on water use efficiency and total biomass production. In the level 'd' yield was 4.7% higher than in 'sd'. Soil fertilization with P increased the P content of the soil by 9.5 and 94% for low and high fertilization respectively.

In the sequence of crops as a whole SR variable soil depth was associated negatively and significantly with the variables of crop, radiation use efficiency for biomass production

(RUE_B), water use efficiency for biomass production (WUE_B), water capture efficiency (WCE) and radiation capture efficiency (RCE), indicating the strong influence that this property has to reduce productivity crop. In this study it was found that the plots d at the beginning of the trial with high and low fertilization incorporated more carbon to the soil (+3%) with respect to the sd.

Keywords: wheat, soybean, soil physical properties, fertilization, resources use efficiency.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción vegetal es el resultado de la interacción entre el potencial genético y el ambiente, entendiendo éste como el conjunto de factores relacionados al clima, suelo y acción del hombre (manejo). El desafío de hoy es mejorar el ambiente permitiendo la expresión del potencial genético de los cultivos, para aumentar la cantidad de alimento producido con el menor impacto ambiental posible, ya sea en términos de deterioro de la calidad del recurso “suelo” (degradación físico-química) o de la atmósfera (aumento de la emisión de gases de efecto invernadero, reducción en la captura de carbono, balances negativos de nutrientes, etc).

En general, se acepta que el deterioro químico del suelo puede resolverse con prácticas adecuadas de fertilización, mientras que el deterioro físico no está debidamente solucionado. Se sabe que dentro de estas limitantes físicas la compactación del suelo es un problema que se puede intensificar por el sistema de labranza, el tránsito de la maquinaria, el pisoteo de los animales y el fuego (Jorajuría & Draghi, 1997; Botta *et al.*, 2006) afectando la porosidad, la densidad, la resistencia mecánica, la conductibilidad hidráulica y la infiltración del agua entre otros. Estas propiedades impactan directa e indirectamente sobre el crecimiento de las plantas y, como consecuencia, sobre la productividad y eficiencia de uso de los recursos agua, radiación y nutrientes. A pesar de que existen algunas opciones de manejo tales como incluir gramíneas en las rotaciones, aumentar el contenido de materia orgánica, tránsito controlado, control presión de neumáticos, la descompactación mecánica, entre otras, se requiere mayor estudio para la región.

Algunos trabajos que aportan conocimientos sobre el tema han sido realizados por Pilatti *et al.* (1988) e Imhoff *et al.* (2004). Sin embargo, todavía se carece de información sobre la interrelación cultivo-suelo-clima-manejo para el área que comprende el límite norte de la Región Pampeana y comienzo del Espinal (departamentos Las Colonias, La Capital, San Justo; provincia de Santa Fe, Argentina), donde las características de suelo (Molisoles, salvo áreas sódicos-salinos) y clima subhúmedo-húmedo templado con temperaturas promedio anuales de 19 a 20 °C y lluvias de 800 a 1000 mm anuales, difieren con respecto a la Región Pampeana. Durante los últimos años se produjo la transformación de sistemas productivos mixtos (ganaderos-agrícolas) a sistemas netamente agrícolas que adoptaron el monocultivo de soja en siembra directa (SD). Este sistema está produciendo una rápida disminución de los niveles de carbono orgánico del suelo con la consecuente degradación físico-química que se asocia a dicho proceso.

Se sabe que el incremento del contenido de carbono orgánico en el suelo puede ayudar a mejorar su calidad físico-química y a reducir el impacto del efecto invernadero generado por el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera. Diversas alternativas de manejo relacionadas con distintas rotaciones de cultivos y prácticas mecánicas han sido propuestas para aumentar la calidad productiva de los suelos. Sin embargo, para la región de interés hay ausencia de conocimiento.

ANTECEDENTES

La degradación de los suelos es actualmente uno de los principales problemas del mundo, comprometiendo el mantenimiento y aumento de la productividad agropecuaria (Hakansson & Voorhees, 1998). En Argentina, en las dos últimas décadas, se produjo una simplificación de los sistemas de producción con predominio del monocultivo de soja. Esto trajo como resultado, principalmente en la región pampeana, una disminución de la superficie cultivada con praderas y un incremento del área dedicada a cultivos agrícolas anuales (Ferrerías *et al.*, 2001). Estos sistemas son más proclives a causar un rápido deterioro de los suelos.

Investigaciones agronómicas han demostrado, en los últimos años, que la degradación y el deterioro de la calidad del suelo como resultado del uso agrícola está presente, prácticamente, en la totalidad de las tierras con aptitud de uso agrícola de Argentina (Michelena *et al.*, 1988; Díaz Zorita *et al.*, 2002a). En Santa Fe, la intensidad de uso de los recursos naturales, especialmente del suelo, se ha incrementado. Tanto productores como asesores técnicos y gobernantes presumen que esta situación, a corto o mediano plazo, conducirá al deterioro de las tierras y, a una menor y más irregular productividad. Como respuesta a ello se introdujo la siembra directa, se extendió el uso de terrazas para el control de excesos hídricos y de la erosión, se recurre a la fertilización y, en algunos casos, a las enmiendas cálcicas y orgánicas (Pilatti *et al.*, 1988).

En la década del '80, el Consejo de Tecnología Agropecuaria de la provincia de Santa Fe, el INTA y las Universidades Nacionales del Litoral y de Rosario no sólo expusieron la existencia de limitantes físicas en los suelos mencionados, sino que reconocieron el carácter regional del problema (INTA-MAG, 1981). De hecho, trabajos realizados en la actualidad muestran que tal situación continúa agravándose (Marano *et al.*, 2006; Marano & D'Elia, 2005).

Compactación: causas y consecuencias sobre la calidad del suelo

La compactación del suelo se induce por el sistema de labranza, el tránsito de la maquinaria y pisoteo de los animales (Jorajuría & Draghi, 1997; Botta *et al.*, 2006). La compactación afecta propiedades del suelo como la porosidad, la densidad, la resistencia mecánica, la conductibilidad hidráulica y la infiltración del agua (Pilatti *et al.*, 2006; Ghiberto *et al.*, 2007) y, potencialmente, puede alterar la morfología y fisiología de las plantas (Bingham, 2001; Passioura, 2002) y, consecuentemente, reducir el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Reducciones en el rendimiento de grano atribuibles a la compactación del suelo fueron determinadas para varios cultivos en una amplia gama de suelos, desde arenosos a arcillosos pesados (Barber & Díaz, 1992; Arvidsson & Hakansson, 1996; Radford *et al.*, 2001; Dauda & Samari, 2002; Hamza & Anderson, 2002, Montavalli *et al.*, 2003).

La magnitud de la compactación depende de las características intrínsecas del suelo, especialmente textura, siendo más susceptibles aquellos suelos en que predomina la fracción fina en la composición granulométrica y poseen reducido tenor de carbono orgánico (Ferry & Olsen, 1975). El sistema poroso del suelo que se describe por el tamaño, la forma y la continuidad de los poros (conectividad y tortuosidad) condiciona los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el ambiente edáfico. Éstos, en última instancia, son los que determinan el desarrollo de las plantas, de los microorganismos y de la fauna edáfica (Rasiah & Kay, 1998 Dexter *et al.*, 2008).

La entrada de agua en la superficie del suelo está regulada, principalmente, por los macroporos y la continuidad de los mismos. Estos poros grandes y continuos, que permiten la conducción del agua gravitacional, se generan por la actividad biológica, la muerte de raíces y la ausencia de disturbios en el suelo. En general, los macroporos son la fracción que primero se destruye cuando el suelo se degrada físicamente debido al tránsito de la maquinaria o al pisoteo de los animales (Botta *et al.*, 2004).

El deterioro de la estructura edáfica se caracteriza, entre otros aspectos, porque aumenta la proporción de agregados muy pequeños y/o muy grandes, reduciéndose la macroporosidad. Esto tiene consecuencias negativas directas al aumentar la resistencia mecánica del suelo (Pilatti *et al.*, 2006; Ghiberto *et al.*, 2007), disminuyendo la captación y circulación de agua y la disponibilidad de oxígeno. Valores menores al 10 % de aeración son limitantes para la mayoría de los cultivos (Da Silva *et al.*, 1994, 2004; He *et al.*, 1996). Sin embargo, Stirzaker *et al.* (1996) consideró adecuado un valor de 13 % y, más recientemente, Kay *et al.* (2006) e Imhoff *et al.* (2010a) indicaron que valores próximos o mayores a 15 %

son necesarios para mantener el flujo de oxígeno en niveles óptimos para las raíces de especies sensibles, como es el caso de la soja.

A medida que la proporción de agregados de tamaño pequeño y la densidad del suelo aumentan, el contacto entre las partículas se incrementa. Del mismo modo, el secado del suelo produce un acercamiento de sus partículas y favorece la formación de nuevas conexiones entre ellas y entre los microagregados del suelo, lo que incrementa la energía de retención del agua por la matriz del suelo (potencial mátrico). En estos casos, la resistencia del suelo puede atribuirse al efecto del potencial mátrico sobre los puentes inter-partículas e inter-agregados, proceso conocido como estrés efectivo (Mullins & Panayiotopoulos, 1984). El estrés efectivo para suelos no saturados define la presión con la cual el film de agua une a las partículas del suelo (Vepraskas, 1984) y es responsable por la mayor resistencia del mismo (Mullins & Panayiotopoulos, 1984). De esta manera, la densidad del suelo y el contenido hídrico o potencial mátrico del suelo afectan la resistencia.

Si la contribución de cualquier proceso que afecta la resistencia a la penetración aumenta o disminuye de forma continua con la actividad del agua del suelo, el contenido hídrico o potencial mátrico pueden utilizarse en la estimación de la resistencia a la penetración. Sin embargo, ciertos procesos influenciados por el menisco que liga las partículas del suelo pueden requerir ambos términos -humedad y potencial- para representar adecuadamente la resistencia del suelo (To & Kay, 2005). El estrés efectivo presenta relación lineal positiva con resistencia del suelo y varios autores lo utilizan como indicador de calidad física del suelo (Vepraskas, 1984; Giarola *et al.*, 2003; To & Kay, 2005; Whalley *et al.*, 2005).

La impedancia mecánica puede ser la mayor limitación para el crecimiento de las raíces en suelos tan húmedos como -100 kPa, debido al incremento en estrés efectivo entre las partículas del suelo resultante de la tensión en los films de agua entre las partículas (Whalley *et al.*, 2005). Este efecto puede exacerbarse por el incremento de la compactación (Bengough *et al.*, 2011) asociada al tránsito de la maquinaria y de los animales.

Álvarez *et al.* (2009) encontraron en suelos de la Pampa ondulada valores de resistencia mecánica por encima de los umbrales críticos mínimos definidos por la literatura (Glinski & Lipiec, 1990) que varían de 1,5 a 2,0 MPa medidos a 7 y 20 cm de profundidad. Estos valores se atribuyen a la organización de partículas finas que resultan del proceso de endurecimiento (“*hardening*”) de los suelos (Taboada *et al.*, 2008a). Este proceso es muy importante en los suelos limosos de la Región Pampeana Argentina por la forma y origen de las partículas de limo, principalmente fitolitos (“*phytoliths*”) (Cosentino & Pecorari, 2002).

Este material se asoció a la inestabilidad estructural de los Argiudoles (Sasal *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008b).

Los suelos de la región centro-norte de la provincia de Santa Fe tienen mayoritariamente un horizonte A desarrollado (25-30 cm), en el cual el limo representa 60-70% de la granulometría y la arcilla 25-35%, con un 2-3% de materia orgánica. Estas características los tornan muy susceptibles a la compactación (Botta *et al.*, 2004) y poco resilientes (Cosentino & Pecorari, 2002; Pilatti *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008b). Estos suelos presentan además un límite bastante abrupto con el horizonte B textural (INTA, 1991). Este horizonte, que posee textura arcillosa u arcillo-limosa con predominio de arcillas expansivas, presenta fenómenos de expansión y contracción notables, que dan origen a una estructura tipo prismática o en bloques. Ambas clases de estructura se tornan muy duras cuando el suelo se seca y pueden limitar drásticamente el crecimiento de los cultivos (Pilatti & Orellana, 2000; Orellana *et al.*, 1982).

Numerosos estudios concuerdan en indicar que el grado de compactación del suelo, como forma de degradación, es un proceso común en áreas intensamente pastoreadas o cultivadas (Harrison *et al.*, 1994; Taboada *et al.*, 1998; Hamza & Anderson, 2005; Costa *et al.*, 2009; Petean *et al.*, 2010). Por otra parte, en esta región se ha difundido en las últimas décadas la siembra directa de cultivos. Este sistema tiende a la compactación superficial del suelo debido a la consolidación natural de las partículas, al tránsito de maquinarias o al pisoteo de los animales, principalmente cuando el suelo está muy húmedo (Gregorich *et al.*, 1994).

Los trabajos de Pilatti & Orellana (1993, 2000), Orellana & Pilatti (1994), Orellana *et al.* (1997) y Ghiberto *et al.* (2004) sugieren que los suelos del centro y norte de Santa Fe poseen baja resiliencia, tornando muy difícil la recuperación de suelos deteriorados. Estas condiciones determinan que el proceso de compactación pueda ser grave, pudiendo afectar la captación y eficiencia del uso de los recursos y la productividad de los cultivos en la región. A pesar de la relevancia del problema, es poco lo que se sabe sobre la influencia de la compactación, especialmente en la Región Centro Norte de Santa Fe (Ferrerías *et al.*, 2000; Botta *et al.*, 2002, 2004).

La descompactación mecánica: efectos directos y residuales sobre el suelo y rendimiento de los cultivos

La remoción mecánica de capas compactadas mediante el uso de implementos descompactadores o escarificadores (*e.g.* paratill, paraplow) ha tomado creciente difusión en el mundo (Hamza & Anderson, 2005; Spoor, 2006). En nuestro país la experiencia es más limitada (Botta *et al.*, 2006). En todos estos trabajos se muestran descensos significativos de la resistencia del suelo a causa de la descompactación, pero se sabe poco acerca de su perdurabilidad y sobre su impacto sobre el rendimiento de los cultivos (Álvarez *et al.*, 2009).

Sadras *et al.* (2005) han informado incrementos de hasta un 43 % en el rendimiento de trigo en respuesta a la reducción de la compactación del suelo y, en algunos casos, aumentos en el contenido de proteína en grano. Esta respuesta fue dependiente del tipo de suelo, cantidad y distribución inicial de agua en el perfil del suelo, exceptuándose en años extremadamente secos o húmedos y cuando el suelo por debajo de la zona de compactación estaba seco (Sadras *et al.*, 2005). Sin embargo, el efecto de la descompactación mecánica sobre la producción de materia seca y rendimiento de los cultivos presenta en la bibliografía datos contradictorios. En soja en suelos argiudoles típicos y vérticos se obtuvieron aumentos en el rendimiento como efecto directo de la descompactación en un 22 a 28% respecto a los testigos (Bonel *et al.* 2005; Bonel & Montico 2007). Mon (2007), Azooz *et al.* (1995) y Martino (1998) argumentan aumentos del rendimiento debido a la descompactación profunda dada por el paratill. Varsa *et al.* (1997) encontraron resultados positivos sobre el rendimiento de maíz para el tratamiento de descompactación profunda en un suelo franco limoso. Busscher *et al.* (2006) también mostraron incrementos de rendimiento en el cultivo de soja para los tratamientos realizados con paratill de 0,36 Mg ha⁻¹ en relación con los no trabajados en profundidad. En otro trabajo Busscher *et al.* (2000) comprobaron que los efectos del subsolado fueron de corta duración, solo por una estación de cultivo sobre los rendimientos de soja y trigo. En los suelos de la Pampa Ondulada, Puricelli & Legasa (1973), en experiencias de subsolado, mostraron que el efecto en el horizonte B textural no persiste por más de dos años por el elevado contenido de arcillas expandibles. Por otro lado, Mon (2007) evidenció que tratamientos de subsolado, aún después de tres años de aplicados, presentan incrementos productivos importantes. Twomlow *et al.* (1994) en suelos franco-arcillo-limosos encontraron residualidad de hasta 3 años en la densidad y resistencia de penetración del suelo luego del descompactado profundo. Díaz-Zorita & Fernández-Canigia (1999) y Alzugaray *et al.* (2008) no observaron diferencias entre siembra directa y paratill en sus ensayos. Además Álvarez & Steinbach (2006), integrando la información publicada a nivel de la Región Pampeana,

encontraron que en promedio los rendimientos del cultivo de soja no se ven modificados por el sistema de labranza.

Efectos de la compactación del suelo sobre la absorción de nutrientes y sistema radical de los cultivos

En general se informa acerca de descensos en la absorción de nutrientes en cultivos, en respuesta a reducciones de enraizamiento a causa de la compactación. La absorción depende del tipo de nutriente y del modo en que esos elementos son absorbidos. El fósforo y el potasio llegan a las raíces por difusión, por lo que su absorción depende fuertemente del tamaño del sistema radical. Por el contrario, nitrógeno y calcio llegan por flujo masal, por lo que su tasa de absorción depende de su concentración en la solución. Sin embargo, cualquier restricción del crecimiento radical en suelos compactados que represente una caída en la absorción de los nutrientes puede ser parcialmente compensada por una mayor absorción en partes de suelo con menor compactación o por una mayor cantidad de nutrientes aportados por el fertilizante (Taboada *et al.*, 2008a).

Una buena nutrición mineral es necesaria para que los cultivos alcancen un óptimo crecimiento y rendimiento (Andrade *et al.*, 2000). Debido a que la siembra directa genera una menor disponibilidad de nitrógeno para el cultivo y, al efecto que dicho nutriente posee sobre el índice de área foliar (Novoa & Loomis, 1981; Uhart & Andrade, 1995), la cantidad de radiación interceptada por el cultivo es menor, en caso de no recibir fertilización nitrogenada. Por lo tanto, y dado que la tasa de crecimiento de los cultivos está directa y estrechamente relacionada con la interceptación de la radiación por los mismos (Gardner *et al.*, 1985a), el rendimiento del cultivo se verá afectado si esta condición persiste durante el período crítico de determinación del mismo. Las mermas de rendimiento se encontrarán directamente relacionadas con el estrés de nitrógeno, siendo necesaria la aplicación de fertilizantes para revertir dicha situación.

La producción de materia seca y grano depende de la habilidad de los cultivos en capturar y usar los recursos. La captura de recursos es proporcional al tamaño, actividad y duración del canopeo y del sistema radicular. Este último sistema es muy sensible a cualquier estrés impuesto por el suelo, pudiendo emitir señales inhibitorias a la conductancia del cultivo, la expansión de las células, la división celular y a la tasa de aparición hojas de las plantas (Scott *et al.*, 1994; Sadras & Milroy, 1996; Masle, 1998; Passioura, 2002). Las raíces que experimentan impedancia mecánica requieren fuerza para desplazar las partículas del suelo y para su elongación. A medida que aumenta la fuerza que hacen las raíces para

desplazar las partículas del suelo y poder crecer, la tasa de elongación de las raíces decrece. Esto restringe la habilidad del sistema radical en acceder al agua y los nutrientes de las capas de suelo más profundas (Brown *et al.*, 2006).

Importancia de la materia orgánica en la calidad del suelo

La presencia de materia orgánica en cantidad y calidad adecuada es esencial para que los suelos sean menos vulnerables a la degradación y presenten elevada resiliencia. La materia orgánica del suelo es importante en el sostenimiento de la calidad del suelo, debido a su efecto positivo sobre la retención de agua, mantenimiento de la porosidad y aireación del suelo, ciclado de nutrientes y crecimiento de las raíces de las plantas (Sainju & Good, 1993), lo que promueve la producción de los cultivos y protección del ambiente (Bauer & Black, 1994).

El contenido de materia orgánica de un suelo depende en primer lugar de sus propiedades físico-químicas y del ambiente donde se desarrolló; sin embargo, las prácticas de uso y de manejo pueden modificar su contenido y calidad (Da Silva *et al.*, 1997). Por ello, el contenido materia orgánica o el de carbono orgánico son utilizados como indicadores de sostenibilidad de los sistemas productivos (Gregorich *et al.*, 1994; Quiroga *et al.*, 2006).

El suelo puede funcionar como un sumidero, secuestrando CO₂ atmosférico a través del manejo apropiado del suelo y cultivo. Esto atenúa el incremento del CO₂ atmosférico, inclusive del que se produce debido a pérdidas desde el suelo inducidas por mal manejo (Paustian *et al.*, 1992; Reicosky *et al.*, 1997).

Actualmente, la agricultura permanente con siembra directa y el doble cultivo por año con elevada proporción de soja predominan en toda la región. El efecto de estos sistemas sobre la materia orgánica del suelo y su sustentabilidad es un tema aún de análisis y discusión. La correcta elección de los cultivos integrantes de las rotaciones es esencial (Tremblay & Vasseur, 1994; Guy *et al.*, 1995; Astegiano *et al.*, 2003; Villar *et al.*, 2005); debido a que, incrementos anuales en la producción de los cultivos y sus residuos dentro de un sistema y/o la disminución de la frecuencias de labranzas ayudan a mantener los niveles de carbono del suelo o inclusive a incrementarlo con el tiempo, dependiendo de la cantidad y tipo de residuo que ingresa al suelo (Larson *et al.*, 1972; Rasmussen *et al.*, 1980; Havlin *et al.*, 1990; Peterson *et al.*, 1998; Rasmussen & Rohde, 1988).

La presencia de residuos en superficie en un suelo bajo siembra directa y la falta de disturbios del mismo, producen una serie de cambios físicos, químicos y biológicos en el ambiente edáfico (Doran, 1980). Respecto a estos últimos, quizás el más relevante sea la

menor disponibilidad de nitrógeno mineral en dicho sistema de labranza, respecto a labranza convencional (Lamb *et al.*, 1985). El rastrojo en superficie produce incrementos en el contenido de carbono y nitrógeno orgánico en los primeros centímetros del suelo respecto a los sistemas tradicionales (Doran 1980; Campbell *et al.*, 1996); como consecuencia de esto, han sido determinados incrementos en la actividad microbiana y enzimática del suelo (Doran, 1980; Crespo, 1999). El incremento de la disponibilidad de sustrato para los microorganismos (Staley *et al.*, 1988; Dalal *et al.*, 1991), disminuye la disponibilidad de nitrógeno inorgánico para los cultivos por un incremento en la inmovilización microbiana (Lamb *et al.*, 1985; Crespo 1999), principalmente en regiones templado-húmedas. Por lo tanto, la menor disponibilidad de nitrógeno en cultivos implantados bajo siembra directa podría ser atribuida a la menor tasa de mineralización de nitrógeno orgánico (Fox & Bandel, 1986), incrementos en la inmovilización microbiana (Doran, 1980 ; Mengel *et al.*, 1982; Kitur *et al.*, 1984), o también a la presencia de un ambiente menos oxidativo en suelos no labrados, que ocasiona una menor nitrificación y una mayor desnitrificación (Doran & Power, 1983; Picone *et al.*, 1997), lavado (Thomas *et al.*, 1973; Mc Mahon & Thomas, 1976) o una combinación de dichos procesos.

Intervalo hídrico óptimo como indicador de la calidad física del suelo

Desde hace muchos años los investigadores cuantifican la resistencia mecánica, aeración y disponibilidad de agua para caracterizar algunos atributos de la calidad del suelo. Sin embargo, estas propiedades medidas aisladamente no siempre reflejan si la condición física es adecuada para el desarrollo de las plantas (Moura *et al.*, 2009). Esta limitación fue superada cuando dos grupos de investigadores (Pilatti & Orellana, 1993; Da Silva *et al.*, 1994) propusieron, casi simultáneamente y con algunas diferencias, un indicador de calidad física del suelo, el intervalo hídrico óptimo, mencionado en la literatura internacional como *least limiting water range*. En otras palabras, el intervalo hídrico óptimo es el intervalo o rango de humedad en el suelo en el que las limitaciones para el crecimiento de las plantas son mínimas.

Este indicador de calidad estructural de los suelos, se considera eficiente para identificar las posibles causas -relacionadas con las propiedades físicas de los suelos entre las mencionadas precedentemente- que restringen el crecimiento y desarrollo de las plantas o que disminuyen la productividad. Está definido por un límite superior y un límite inferior de agua en el suelo. El límite superior (más húmedo) es el mínimo valor de humedad en el suelo entre dos valores: i) la humedad de capacidad de campo y ii) la humedad que corresponde a 10 %

de aeración (Pilatti & Orellana, 1993; Da Silva *et al.*, 1994). El límite inferior (más seco) es definido por el máximo valor de humedad en el suelo entre dos valores: i) humedad en el punto de marchitez permanente (Da Silva *et al.*, 1994) o en el límite inferior de agua fácilmente disponible (agua retenida hasta 1 bar) (Pilatti & Orellana, 1993) y ii) humedad que corresponde a un valor de resistencia mecánica que limita el crecimiento de las raíces (varía con la especie entre 2 a 4 MPa).

El intervalo hídrico óptimo permite identificar la propiedad física que actúa como limitante a medida que la compactación del suelo aumenta. Este enfoque distintivo incorporado por Da Silva *et al.* (1994) muestra como las distintas variables y el intervalo hídrico óptimo -resumido en un solo número- cambian con la densidad del suelo a medida que el mismo se compacta, hasta definir la densidad de suelo crítica para el crecimiento vegetal; es decir, el valor de densidad del suelo en el que el intervalo hídrico óptimo es cero.

Este indicador es lo suficientemente sensible para ser utilizado como criterio de evaluación de la calidad estructural del suelo para la producción de cultivos en diferentes sistemas de manejo, en el campo y en condiciones controladas, para monitoreo de la compactación y también indirectamente de las emisiones de C-CO₂ desde el suelo (Tormena *et al.*, 1998, 1999; Zou *et al.*, 2000; Benjamin *et al.*, 2003; Araujo *et al.*, 2004; Lapen *et al.*, 2004; Beutler *et al.*, 2005; Bengough *et al.*, 2006; Kay *et al.*, 2006; Leão *et al.*, 2006; Freddi *et al.*, 2009; Kaiser *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2009; Reichert *et al.*, 2009; Olibone *et al.*, 2010; Petean *et al.*, 2010; Medeiros *et al.*, 2011).

Sin embargo, Reichert *et al.* (2009) concluyeron que los valores de densidad crítica basadas en el intervalo hídrico óptimo no necesariamente restringen el crecimiento de las raíces en sistemas de siembra directa. Posiblemente, en esos sistemas mejoró la continuidad de los macroporos y surgió un menor límite crítico de porosidad de aeración. Las redes de bioporos estables permitieron el crecimiento de la raíz aún en altas resistencias de suelo. Otra posible explicación es que la raíz crezca en canales *by pass* (Bengough *et al.*, 2011). Mohammadi *et al.* (2010), basados en propiedades físicas del suelo y fisiológicas de la planta, redefinen el límite superior del intervalo hídrico óptimo. Predicen este límite a partir del conocimiento de la curva característica de retención hídrica del suelo, la profundidad de las raíces de las plantas y la tasa de consumo de oxígeno. Por otro lado, el intervalo hídrico óptimo puede estimarse a partir de funciones de edafotransferencia (Da Silva & Kay, 1997b; Imhoff *et al.*, 2012). Estos últimos autores, en suelos argiudoles y hapludoles determinaron que el intervalo hídrico óptimo se relaciona positivamente con el carbono orgánico y, negativamente con la densidad del suelo y con el contenido de arcilla.

El suministro de agua es, a menudo, el factor limitante más crítico para el crecimiento y rendimiento de los cultivos en las regiones de secano (Abbate *et al.*, 2004). El contenido hídrico en el suelo en estas regiones depende de la ocurrencia de precipitaciones (McKenzie *et al.*, 2009); su magnitud y distribución anual determinan, como consecuencia, la ocurrencia de situaciones de estrés por déficit o exceso de agua.

Los cultivos que crecen en suelos con intervalo hídrico óptimo estrechos son más vulnerables a las sequías y precipitaciones elevadas que aquellos que crecen en suelos con intervalo hídrico óptimo más amplios. Esto se comprueba a partir de la estimación de la frecuencia con que el contenido de agua del suelo permanece fuera del intervalo hídrico óptimo (*pout*) (Da Silva & Kay, 1997a). Da Silva & Kay (1996) concluyeron que la tasa de crecimiento vegetativo del cultivo de maíz fue menos restringida durante dos estaciones de crecimiento cuando el contenido hídrico del suelo estuvo más frecuentemente dentro de los límites del intervalo hídrico óptimo. Específicamente, el crecimiento de la parte aérea de las plantas correlacionó negativamente con *pout*.

Otro indicador que permite cuantificar los desvíos de la humedad en el suelo respecto de los límites del intervalo hídrico óptimo es el índice de días de estrés por agua (WSD, *water stress days*) (Benjamin *et al.*, 2003). Estos autores demostraron que la correlación entre el rendimiento de maíz con índice de días de estrés por agua fue mayor que con la densidad del suelo o con el intervalo hídrico óptimo. Dicho índice (WSD) fue eficiente para evaluar cambios en el suelo debido a diferentes prácticas de manejo y para detectar los períodos críticos de estrés por agua ocurridos durante la estación de crecimiento del cultivo que afectan el rendimiento. El estrés por deficiencia de agua ocurre cuando el sistema radical del cultivo no es capaz de extraer agua a la tasa que demanda la atmósfera. El cociente entre la evapotranspiración actual (ET_c) y la potencial o demandada por la atmósfera (ET_o), es decir ET_c/ET_o , cuantifica la magnitud del estrés (Brown *et al.*, 2009). Si dicho cociente es menor que uno ($ET_c < ET_o$) el cultivo estará bajo estrés por deficiencia de agua y, la producción de MS será menor que la potencial (Texeira *et al.*, 2008).

Productividad y eficiencia en el uso de los recursos

Según la FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (Allen *et al.*, 2006) el concepto de evapotranspiración incluye tres definiciones diferentes: i) evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), ii) evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y iii) evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}).

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) es el parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético (pastura) con características específicas. En general, la alfalfa es el cultivo de referencia que se usa como superficie de referencia en el mundo. La consulta a expertos de la FAO presentó la siguiente definición inequívoca para la superficie de referencia: “un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23”, que se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme (asegura que todos los flujos de aire son ascendentes), creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un adecuado aporte de agua. No se recomienda el uso de otras denominaciones. Los únicos factores que afectan la ET_o son los parámetros climáticos. Por lo tanto, evapotranspiración de referencia es también un parámetro climático que se calcula a partir de datos meteorológicos. El método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de la ET_o .

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. La relación ET_c/ET_o , que puede determinarse experimentalmente para diferentes cultivos, se conoce como ‘coeficiente del cultivo’ (K_c) y se utiliza para relacionar ET_c a ET_o de manera que $ET_c = K_c * ET_o$.

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}) o real es la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones de campo. Esta evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ET_c debido a condiciones no óptimas, como son la presencia de plagas y enfermedades, la salinidad y la baja fertilidad del suelo y la limitación o el exceso de agua. Esto puede reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c debido a un menor crecimiento y densidad de plantas. La ET_c requiere generalmente una corrección que se calcula utilizando un ‘coeficiente de estrés hídrico’ (k_s) o ajustando el K_c a todos tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo (k_{cs}).

En general los autores coinciden en señalar que mayores tasas de evapotranspiración están asociadas con mayor producción de los cultivos (Payero *et al.*, 2006; Moura *et al.*, 2009). Conocer las variaciones de humedad en el perfil requiere la determinación del balance hídrico, el cual permite conocer la variación del almacenaje de agua en el suelo y la extracción realizada por el cultivo.

La eficiencia de captura de los recursos es definida como la relación entre las salidas – biomasa (B) y rendimiento- y las entradas anuales de radiación fotosintéticamente activa, las lluvias o nutrientes que condiciona la productividad. Dentro de la estación de cultivo la pobre captura y eficiencia en el uso del agua y de la radiación están asociadas con un bajo índice de área foliar durante las fases tempranas del cultivo (Cooper, 1983).

La productividad estacional o anual del agua (materia seca por unidad de entrada de agua) puede ser analizada como el producto de la eficiencia de captura del agua y la eficiencia de uso del agua. La eficiencia de captura del agua es la relación entre la evapotranspiración y la disponibilidad de agua. La eficiencia en el uso del agua es la producción de materia seca por unidad agua evapotranspirada. La productividad del agua es similar a la eficiencia del uso del agua como fue definido por Pierce & Rice (1988).

Por analogía se define la productividad estacional o anual de la radiación, como el producto entre la eficiencia de captura de la radiación y la eficiencia del uso de la radiación. La eficiencia de captura de la radiación es la relación entre la acumulación de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo y la radiación fotosintéticamente activa incidente con base anual o estacional. La eficiencia de uso de la radiación es la relación entre la producción de materia seca y la radiación fotosintéticamente activa interceptada.

La eficiencia en el uso del nitrógeno puede estudiarse a través de componentes asociados a procesos del suelo y de la planta. Puede definirse como la cantidad de material vegetal, granos o biomasa total, producida por unidad de nitrógeno total acumulado por el cultivo (Huggins & Pan, 1993). En general, la eficiencia en el uso del nitrógeno del fertilizante a nivel mundial es muy baja y se estima entre 0,33 y 0,50%; es decir, menos de la mitad del fertilizante aplicado es utilizado por el cultivo (Raun & Johnson, 1999; Davis *et al.*, 2003; Fageria & Baligar, 2005). El resto, será perdido del sistema por las vías de volatilización, lixiviación, escurrimiento o utilizado por los microorganismos del suelo para realizar una degradación más rápida de la materia orgánica.

Las eficiencias mencionadas pueden ser cuantificadas. Sin embargo, para poder tener una apreciación global del efecto de la actividad productiva resulta importante disponer de un conjunto de indicadores que ayuden a evaluar los cambios de la calidad del suelo inducidos por los actuales sistemas productivos, especialmente en el corto plazo, de manera que se pueda evitar su degradación. Éste es un gran desafío para los investigadores en la actualidad.

En este contexto, hay dos perspectivas principales en la investigación de la respuesta de las plantas a la compactación del suelo: i) estudios agronómicos que enfocan las respuestas

en Rdto de los cultivos y, generalmente, no responden a la dinámica de los procesos involucrados, ii) estudios ecofisiológicos que tratan con las variables de respuesta de las plantas en niveles de organización bajos (por ejemplo, la conductancia estomática) cuya integración a nivel de cultivo no es clara (Sadras *et al.*, 2005).

Pocos trabajos combinaron experimentos a campo y modelos para investigar los niveles de respuestas de los cultivos a la compactación del suelo, estudiando la captura de recursos y eficiencia en el uso de los mismos. Se sugiere que la eficiencia de captura y de uso de los recursos podrían usarse como indicadores de cultivo para interpretar los diferentes datos de calidad de suelo como paso fundamental para definir sistemas de producción sustentables.

Específicamente, en la región centro-norte de Santa Fe, existe todavía la necesidad de generar conocimiento para poder establecer el nivel de mejora o de degradación de los suelos luego de un cierto período de adopción de nuevas prácticas productivas. Por lo tanto, disponer de indicadores que directa o indirectamente puedan reflejar los cambios en la calidad del suelo y, la participación que tienen las actuales tecnologías en esos cambios, permitirá contribuir al objetivo de mantener e incrementar la productividad agrícola. En este contexto se presenta la hipótesis de trabajo y los objetivos perseguidos.

HIPÓTESIS

Este trabajo se sustenta en las siguientes hipótesis:

1- La atenuación de la compactación y la fertilización con nitrógeno y fósforo en los cultivos de trigo (T) y soja (S) aumenta la captación y eficiencia de uso de nutrientes, agua y radiación.

2- El aumento en la captación y eficiencia de uso de los recursos por los cultivos de la secuencia trigo/soja causa un incremento en la producción de biomasa total y el rendimiento, lo que promueve cambios en las propiedades físicas, químicas y stock de la materia orgánica del suelo.

3- El análisis de las interrelaciones cultivo-suelo permitirá identificar las variables ecofisiológicas del cultivo que pueden ser utilizadas como indicadores de cambios que ocurren en el corto plazo en la calidad del suelo.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar las alteraciones producidas por diferentes niveles de fertilización y compactación del suelo sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y sobre las

variables ecofisiológicas de los cultivos de trigo (T) y soja (S) para verificar si alguna de esas variables puede ser utilizada como indicador de los cambios producidos en la calidad del suelo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar propiedades físicas, químicas y contenido de materia orgánica del suelo en situaciones con diferentes niveles iniciales de compactación y fertilidad química, y verificar la evolución temporal de esas propiedades en una secuencia S-T/S-T/S-T de tres años de duración.
- Evaluar variables de crecimiento, rendimiento, captación y eficiencia en el uso del agua, radiación y nutrientes en los cultivos de trigo y soja según nivel de compactación y fertilización del suelo.
- Relacionar variables ecofisiológicas del cultivo y las propiedades físicas, químicas y carbono del suelo para detectar posibles interrelaciones.

METODOLOGÍA GENERAL PARA LOS CAPÍTULOS I, II Y III

Diseño experimental

El experimento se realizó en la Unidad Experimental de Cultivos Extensivos ubicado en Esperanza sobre Ruta Provincial N° 70, km 26 (31°25'34,93''S 60°59'29,91''O) sobre la secuencia de cultivos Soja-Trigo/Soja-Trigo/Soja-Trigo durante las campañas 2008/2009 (C1), 2009/2010 (C2) y 2010/2011(C3). El suelo está clasificado como Argiudol ácuico (fina-media-térmica), serie Humboldt, con un índice de productividad de IP= 66. Se trata de un suelo profundo, moderadamente a bien drenado, desarrollado en una planicie extendida ligeramente deprimida (INTA, 1991).

Se seleccionó un lote agrícola con 6 años en siembra directa (SD) y monocultivo de soja, con presencia de compactación, que fue determinada midiendo la resistencia del suelo a la penetración (RP) con un penetrómetro de campo a la profundidad de 0-20 cm en condiciones de humedad próxima a capacidad de campo, adoptándose como valor crítico 2,5 MPa (Glinski & Lipiec, 1990; Gupta & Allmaras, 1987). El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados con diseño factorial (2*2) y tres repeticiones. Cada tratamiento surgió de la combinación de dos factores (compactación y fertilización) y dos niveles (sin descompactar y descompactado para el factor compactación y, alta y baja para el factor fertilización), haciendo un total de cuatro tratamientos. Los tratamientos fueron: i) alta fertilización sin descompactar (Asd), ii) baja fertilización sin descompactar (Bsd), iii) alta fertilización descompactado (Ad) y iv) baja fertilización descompactado (Bd) (Figura 1). En las parcelas descompactadas (correspondientes a los tratamientos Ad y Bd) se realizó una labor profunda vertical al inicio del ensayo (mayo de 2008) con el objetivo de disminuir la compactación. Para ello se utilizó un paratill marca Dolbi a 70 cm entre púas, con una profundidad de labor de 30-35 cm. La humedad de suelo al momento de realizar dicha labor fue de $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, inferior a la capacidad de campo ($0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Luego se procedió a la siembra de los cultivos con el sistema de siembra directa.

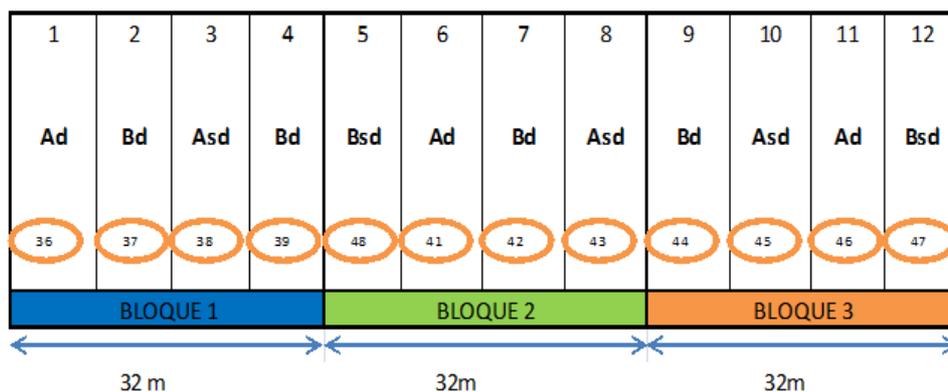


Figura 1. Diseño experimental del ensayo. Tratamientos: Ad (alta fertilización descompactado), Bsd (baja fertilización sin descompactar), Asd (alta fertilización sin descompactar) y Bd (baja fertilización descompactado). Los números dentro de círculos identifican tubos de acceso para la medición de agua.

Se sembró el cultivar de soja RA 725, grupo de madurez VII, de hábito de crecimiento determinado, con una sembradora experimental de grano grueso de dos surcos marca ERCA. Las fechas de siembras fueron 4 de diciembre (C1), 5 de diciembre (C2) y 6 de diciembre (C3). El espaciamiento entre hileras fue de 52 cm con una densidad de 26 semillas m^{-2} asegurando un buen control de malezas, insectos y enfermedades.

En cuanto al cultivo de trigo se utilizó la variedad Buck Malevo, de ciclo largo, en siembra directa a 17,5 cm entre líneas, a razón de 120 kg de semillas por ha con el objetivo de obtener 280 plantas m^{-2} . Las fechas de siembra fueron 3, 11 y 16 de junio para C1, C2 y C3, respectivamente. Se mantuvo el cultivo libre de malezas [barbecho químico con glifosato ($3 l ha^{-1}$) y metsulfurón ($6 g ha^{-1}$)] y de enfermedades [aplicación de fungicida (Amistar Xtra) en hoja bandera].

Determinaciones químicas de suelo y manejo de la fertilización

Se realizó análisis químico del suelo (0-20 y 20-40 cm) antes de la siembra del cultivo de soja. En la C1: soja 2008/09 al inicio del ensayo se realizó el muestreo de suelo obteniendo una muestra compuesta representativa de todo el ensayo. Para las campañas C2: soja 2009/10 y C3: soja 2010/11 se obtuvo una muestra compuesta del suelo constituida por 20 submuestras obtenidas con barreno para cada tratamiento y repetición. Se determinó: i) MO total, por oxidación con dicromato de potasio; ii) pH actual (1:2,5); iii) fósforo extractable (P), por el método Bray-Kurtz I (Bray & Kurtz, 1945); iv) N total, por método de Kjeldahl; v)

azufre de sulfatos (S-SO₄) por medio de la técnica turbidimétrica descrita por Maynard *et al.* (1987). La misma emplea como extractante una solución ácida de acetato de amonio a pH 5.

En base a los resultados de los análisis químicos de dichas muestras, se realizó una fertilización fosforada del cultivo de soja a la siembra, ubicando el fertilizante al costado y debajo de la semilla. Para el cálculo de la dosis de P a agregar se fijó un Rdto objetivo de 4300 kg ha⁻¹ con un 13,5 % humedad de grano. Por lo tanto, la extracción total por la soja sería de 26 kgP ha⁻¹, siendo necesarios 7 kgP para producir 1000 kg de grano (García & Correndo, 2013). En los tratamientos de alta fertilización se aportó el fósforo necesario para cubrir el extraído por el cultivo (criterio de reposición); en tanto que, en los de baja fertilización se consideró un criterio de suficiencia o de “arranque” (método usado por el productor medio en la zona de estudio en cuanto al manejo de la fertilización del cultivo de soja) (Rubio *et al.*, 2008). El fertilizante utilizado fue superfosfato triple de Ca -SPT- [20% P (46% P₂O₅) – 13% Ca (CaO)].

El valor inicial de P para los tratamientos de alta fertilización promedio de los tratamientos descompactados (d) y sin descompactar (sd) fue 7,3, 7,2 y 7,8 ppm para las C1, C2 y C3, respectivamente. Se aplicaron 130 kg de fertilizante (SPT) por ha, aportando 26 kgP ha⁻¹. En tanto que, el P inicial en los tratamientos con baja fertilización promedio de los tratamientos descompactados (d) y sin descompactar (sd) fue de 7,3, 7,1 y 8,8 ppm en C1, C2 y C3 respectivamente. Se fertilizó en la C1 con 80 kg de fertilizante (SPT) por ha y, en C2 y C3 con 70 kg ha⁻¹, aportando 16 kgP ha⁻¹ en C1 y 14 kgP ha⁻¹ en C2 y C3.

En el cultivo de trigo después de la cosecha de soja se determinó según análisis químico de suelo i) MO total, por oxidación con dicromato de potasio; ii) pH actual (1:2,5); iii) fósforo extractable (P), por el método Bray–Kurtz I; iv) N total, por método de Kjeldahl; v) azufre de sulfatos (S-SO₄) por medio de la técnica turbidimétrica descrita por Maynard *et al.* (1987) a 20 cm de profundidad. La fertilización se realizó a la siembra, según el método de balance de N y, se calculó en base a análisis químico a partir de muestras de suelos disturbadas extraídas a 60 cm de profundidad (divididas en tres submuestras de 0-20 cm, 20-40 y 40-60 cm). Se determinó la oferta de N-NO₃⁻ disponible a la siembra (0-60 cm) y se estimó el aporte del N mineralizable (Nm) tomando como valor de coeficiente de mineralización el 1% del N de la materia orgánica, siguiendo lo propuesto por Álvarez (1998). Se tomó como demanda del cultivo un requerimiento de 30 kgN por cada 1000 kg de grano producido, siendo el Rdto objetivo de 4000 kg ha⁻¹ para los tratamientos de alta fertilización. El fertilizante empleado (Nf) fue fosfato diamónico PDA (18-20-0) y urea (46-0-0) para las C1 y C2 y sólo PDA en la C3.

En la C1 se aplicó $46 \text{ kgN ha}^{-1} + 14 \text{ kgP ha}^{-1}$ para los tratamientos de alta fertilización y, $23 \text{ kgN ha}^{-1} + 7 \text{ kgP ha}^{-1}$ para los tratamientos de baja fertilización. Este aporte permitió llevar el nivel de N disponible ($\text{N-NO}_3 + \text{Nm} + \text{Nf}$) a 138 y 110 kgN ha^{-1} para los tratamientos de alta y baja fertilización. Durante la C2 se fertilizó con $55 \text{ kgN ha}^{-1} + 10 \text{ kgP ha}^{-1}$ y $27,5 \text{ kgN ha}^{-1} + 5 \text{ kgP ha}^{-1}$ para los tratamientos de alta y baja fertilización, respectivamente. El nivel de N disponible ($\text{N-NO}_3 + \text{Nm} + \text{Nf}$) en la C2 fue de 125 y 95 kgN ha^{-1} para los tratamientos de alta y baja fertilización. Finalmente, en la C3 se aplicó $18 \text{ kgN ha}^{-1} + 20 \text{ kgP ha}^{-1}$ en los tratamientos de alta fertilización y sin fertilizante ($\text{Nf} = 0$) en los tratamientos de baja, logrando un nivel de N disponible de 130 y 105 kgN ha^{-1} para los tratamientos de alta y baja fertilización, respectivamente.

Determinaciones físicas del suelo: densidad de suelo relativa (Dsr), densidad aparente (Ds), resistencia a la penetración (RP) e intervalo hídrico óptimo (IHO).

El grado de compactación o densidad de suelo relativa (Dsr) después de la aplicación de los tratamientos se determinó según el método propuesto por Hakansson (1990), siendo definido como la relación entre la densidad aparente del suelo (Ds) y la densidad de referencia del mismo. Para cuantificar la densidad de referencia se coloca tierra fina seca al aire tamizada a 2 mm , en un cilindro de peso y tamaño conocido (7 cm diámetro por $2,5 \text{ cm}$ altura) hasta llenarlo y se pesa. Luego se calcula la Ds de la muestra ($\text{Ds} = \text{masa de suelo/volumen cilindro}$) y la porosidad total [$\text{PT} = (1 - \text{Ds}/\text{Dp}) * 100$]; siendo Dp la densidad de partícula ($\text{Dp} = 2,58 \text{ g cm}^{-3}$ para el suelo en estudio). A continuación se calcula el 95% de porosidad total que corresponde a la cantidad de agua que se debe agregar para lograr que aproximadamente 95 % del espacio poroso quede lleno con agua y 5 % del espacio poroso quede con aire. La muestra se coloca en un recipiente (caja de petri) y se agrega lentamente el agua al mismo para que ascienda por capilaridad. Luego, se cierra el recipiente y se deja estabilizar por 24 horas. Posteriormente se coloca la muestra en un consolidómetro y se la somete a 200 kPa de presión durante 1 hora. Este equipamiento registra automáticamente el cambio de altura que sufre la muestra. Una vez que termina el ensayo, la muestra se coloca en una estufa a 110 C° por 24 horas. A continuación se lleva a desecador donde se deja enfriar y luego se pesa. A partir de la masa de suelo (en g) y el volumen (cm^3) recalculado a partir de la altura posterior a la compactación se obtiene la densidad de referencia. Para recalcular el volumen se aplicó la Ecuación 1.

$$V = (\text{Pi} * \text{D}^2/4) * (\text{A}) \quad (1)$$

Donde: V= volumen (cm³); Pi=3,141593; D= diámetro (cm); A=altura (cm) de la muestra después de la compactación.

En noviembre de 2008 a 6 meses de realizada la labor con paratill (mayo 2008) de cada repetición según tratamiento se colectaron 10 muestras de suelo con estructura no perturbada (cilindros) a dos profundidades (0-7 cm y 8-12 cm) para determinar la curva de retención hídrica (CRH), de resistencia mecánica (CRP), la Ds y el IHO. Las muestras se saturaron por elevación gradual de una lámina de agua, se pesaron para obtener el contenido hídrico en saturación (θ_s) y posteriormente se equilibraron en los siguientes potenciales mátricos (ψ): -0,005; -0,01; -0,03; -0,5 y 1,5 MPa en mesa de tensión por medio de presiones aplicadas en placas porosas (Klute, 1986). Cuando las muestras llegaron al equilibrio se pesaron y en cada una se midió la RP del suelo con penetrómetro electrónico, con cono de 60° de ángulo y 4 mm de diámetro basal. La velocidad de penetración fue de 1 cm min⁻¹ y la frecuencia de muestreo correspondió al registro de un valor de resistencia cada 0,6767 segundos. Las lecturas obtenidas entre 1-4 cm de profundidad de cada muestra se promediaron para obtener un único valor de RP. A continuación las muestras se secaron en estufa a 105 °C para determinar el contenido gravimétrico de agua y la densidad aparente del suelo (Blake & Hartge, 1986).

Con esta información se calculó el contenido hídrico volumétrico para elaborar la curva característica de retención hídrica (CRH) ($\theta = f \psi$) para las dos profundidades de muestreo. Los datos de las CRH se ajustaron con el modelo propuesto por Van Genuchten (1980) (ecuación 2):

$$\theta = [\theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\psi)^n]^{1/n}] \quad (2)$$

Donde: θ =contenido volumétrico de agua (cm³ cm⁻³), θ_r =contenido volumétrico de agua residual (cm³ cm⁻³), θ_s =contenido volumétrico de agua en saturación (cm³ cm⁻³), ψ = potencial mátrico (kPa) y α , n son los parámetros de ajuste.

La relación funcional entre RP, θ y Ds se obtuvo ajustando los datos al modelo no lineal propuesto por Busscher (1990) (ecuación 3):

$$RP = a * \theta^b * Ds^c \quad (3)$$

Donde: RP= resistencia del suelo a la penetración (MPa), θ = contenido volumétrico de agua (cm³ cm⁻³), Ds= densidad del suelo (g cm⁻³) y a, b, c son los parámetros del ajuste.

El intervalo hídrico óptimo (IHO) se calculó según la metodología propuesta por Da Silva *et al.* (1994) para cada Ds medida. Los contenidos hídricos correspondientes a la capacidad de campo (θ_{CC}) y al punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) se obtuvieron con la

ecuación (2) para $\psi = -0,01$ MPa y $\psi = -1,5$ MPa, respectivamente. La ecuación (3) se utilizó para determinar el contenido hídrico del suelo en que se alcanza un valor de $RP = 2,5$ MPa (θ_{RP}), considerado restrictivo para el normal crecimiento de las raíces de soja y trigo. El contenido hídrico del suelo en que la porosidad de aeración es 10% (θ_{Pa}), considerado adecuado para el cultivo de trigo y soja, se determinó a partir de la ecuación general que se utiliza para determinar la porosidad total del suelo, sustrayendo a dicho valor que debe permanecer libre de agua (0,1) (ecuación 4),

$$\theta_{Pa} = [(1 - D_s/D_p) - 0,10] \quad (4)$$

Donde: D_s = densidad aparente de suelo (g cm^{-3}) y D_p = densidad de partículas (g cm^{-3}).

En este estudio su valor promedio fue $D_p = 2,58 \text{ g cm}^{-3}$.

El IHO se obtuvo calculando la diferencia entre el límite superior, definido como el menor valor entre θ_{Pa} y θ_{CC} , y el límite inferior, definido como el mayor valor entre θ_{PMP} y θ_{RP} , para cada valor de D_s . Además se determinó la densidad de suelo crítica (D_{sc}), es decir la D_s en que el $IHO = 0$.

La densidad aparente del suelo (D_s) se determinó al inicio y final de cada cultivo en la secuencia S-T/S-T/S-T, para cada tratamiento y repetición, desde noviembre de 2008 (al inicio del ensayo antes de la siembra de soja), hasta mayo de 2011 (luego de la cosecha de soja 2010/11 a 2 años y medio de realizada la primera medición y 3 años de la labor con paratill), tomando tres muestras de suelo no perturbadas distribuidas aleatoriamente (cilindros de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro) en el horizonte A, a dos profundidades (0-7 cm y 8-12 cm). Estas muestras se secaron en estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta alcanzar peso constante y, a partir de la masa seca de suelo y del volumen del cilindro se determinó la densidad aparente del suelo (Blake & Hartge, 1986).

Determinación del rendimiento, materia seca total, tasa de crecimiento del cultivo, duración e índice de área foliar

Para la caracterización del crecimiento se determinó la materia seca (MS) total en cuatro momentos: en soja en los estadios reproductivos R1, R4, R6 y R8 [según escala de Fehr & Caviness (1977)] y, en trigo en inicio y en mediados de encañazón, en antesis+7 días y madurez fisiológica [Z3.1, Z3.4, Z7.05 y Z9.0 según escala de Zadock *et al.* (1974)], en una superficie de muestreo de 2 m^2 y $0,7 \text{ m}^2$ por tratamiento y repetición para soja y trigo respectivamente. La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se calculó para el período crítico

del cultivo (R4 a R6 para soja y Z3.4 a Z7.05 para trigo) mediante la fórmula $(MS_2-MS_1)/(t_2-t_1)$; donde MS es la MS acumulada ($g\ m^{-2}$) y t es el tiempo (días).

El área foliar (AF) se determinó como el producto de la MS foliar (g) por el área foliar específica (AFE, $cm^2\ g^{-1}$) en los estadios R1, R4 y R6 para soja y, Z3.1, Z3.4 y Z7.05 para trigo. Para ello se defoliaron cinco plantas en soja y las plantas de 1 m lineal para trigo por cada repetición, considerando sólo las hojas con un área verde mayor al 50 %. El AFE se determinó dividiendo AF de una alícuota de hojas por su peso seco, para lo cual se obtuvo el AF de esa alícuota (aproximadamente el 50% del total de hojas) con un medidor de AF continuo Li-Cor modelo 3000. Para el cálculo del índice de área foliar (IAF) se refirió el AF en m^2 de hoja por unidad de superficie de suelo (m^2).

Para relacionar la producción de MS con el IAF, Watson (1947) integró el IAF en el tiempo y lo llamó 'duración del área foliar' (DAF) mediante la fórmula $DAF = [(IAF_1+IAF_2)*(t_2-t_1)] / 2$, donde IAF1 y 2 es el índice de área foliar y t es el tiempo (días).

En soja se contaron el número de plantas m^{-2} en V1 y a cosecha. Se determinó en R8 el rendimiento (Rdto) corregido al 13,5 % de humedad, el número de vainas m^{-2} , el número de granos m^{-2} y el peso de 1000 granos (P1000). En trigo se determinó el número de plantas por m^2 en Z1.4, el número de espigas m^{-2} , el número de espiguillas por espiga, el número y peso de los granos, el Rdto corregido al 14 % de humedad y el índice de cosecha. El tamaño de la muestra y el número de muestras utilizado para realizar estas mediciones fue de dos submuestras por repetición de 2 metros lineales cada una ($0,7\ m^2$).

Radiación fotosintéticamente activa interceptada y acumulada, y eficiencia de uso de la radiación (EUR)

Los valores de radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada (RFAi) por el cultivo se obtuvieron utilizando un radiómetro LI-COR modelo LI-250. Se realizaron 5 mediciones por encima de la canopia (I_0) y 5 lecturas por debajo del nivel de hojas verdes del cultivo (I') entre las 11:30 y 13:00 horas en días soleados, de acuerdo a la metodología propuesta por Gallo & Daughtry (1986). Las mediciones se realizaron semanalmente, expresando los resultados en los estadios fenológicos de soja R1, R4 y R6, ubicando la barra de medición en forma perpendicular a las hileras (I') y, en trigo en Z3.1, Z3.4 y Z7.05 en forma paralela a las líneas de siembra al medio y los costados, promediando las tres mediciones (I'). El porcentaje de radiación interceptada (%RI) se calculó como $100*[1-(I'/I_0)]$. La RFA interceptada acumulada por el cultivo (RFAiacum) se obtuvo mediante la

multiplicación de la RFA incidente tomada de una estación meteorológica ubicada a 5 km del ensayo, por el %RI por el cultivo durante la ontogenia del mismo. Se calculó la eficiencia de uso de la radiación (EUR) (en $g MJ^{-1}$) como el cociente entre la biomasa (B) y la RFAi acumulada para el ciclo total, desde emergencia a madurez fisiológica del cultivo de trigo y fin de madurez en soja (EUR BT ciclo) y desde R4-R6 en soja (EUR R4-R6). La eficiencia en el uso de la radiación para la producción de grano (EUR G) se calculó como el cociente entre el rendimiento y la RFAi acumulada para el ciclo total.

Evapotranspiración del cultivo, balance y eficiencia en el uso del agua

La evapotranspiración de los cultivos (ETc) es la suma de la evaporación desde el suelo y la transpiración desde las plantas (cuando no hay deficiencias de agua). La evapotranspiración ajustada (ETcaj) es la cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo en las condiciones ambientales en que se desarrolla; en condiciones de estrés la ETcaj es siempre menor a la ETc. El producto de la evapotranspiración potencial (ETo) y el coeficiente del cultivo (Kc) da la ETc que permite cuantificar el requerimiento de agua del cultivo. (Della Maggiora *et al.*, 2000). El Kc varía en función del estadio del cultivo y es altamente dependiente de su cobertura (Andriani, 1997). Se calcula la ETo incorporando distintos datos climáticos. El método de Penman-Monteith permite estimarla, es un método semiempírico que presenta buen comportamiento para distintas regiones climáticas y combina los principales factores que gobiernan la pérdida de agua -como la radiación solar, la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del viento- (Allen *et al.*, 1998; Della Maggiora *et al.*, 2000). Los mismos se registraron desde una estación meteorológica ubicada en la Facultad de Ciencias Agrarias (UNL), al noroeste de la ciudad de Esperanza (Santa Fe), próxima al experimento.

La medición del contenido hídrico del suelo se realizó semanalmente y hasta 1,6 m de profundidad en cada sitio. Para esto se instalaron 12 tubos para acceso de una sonda de capacitancia (FDR) modelo Diviner 2000 (Sentek Co), que registra valores de humedad gravimétrica cada 10 cm de profundidad. Estos valores se corrigieron a partir de la curva de calibración generada con datos locales (Camussi & Marano, 2009). El consumo de agua del cultivo de soja y trigo ajustado a condiciones de campo (ETcaj) para cada tratamiento se determinó por el método de balance hídrico simplificado (Marano & D'Elia, 2005; Camussi & Marano, 2008) en las tres campañas, despejando la ETcaj de la Ecuación 5.

$$P_t - ET_{caj} \pm \Delta A_{lm} - E_s = 0 \rightarrow P_t - P_e = E_s \quad (5)$$

Donde: Pt: precipitación total; Pe: precipitación efectiva, considerada como 0,8 de la precipitación total cuando ésta supera 20 mm (Critchley *et al.*, 1991); Es: escorrentía superficial obtenida con el método de la curva número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (USDA) adaptado por Vischel y Lebel (2007) en condiciones de suelo muy húmedo y Pt acumulada en cinco días superiores a 100 mm; Etcaj: evapotranspiración ajustada del cultivo; ΔAlm : variación del almacenamiento de agua en el suelo, estimado a partir del procedimiento de plano de flujo cero. No se consideró el flujo subsuperficial debido a que la superficie freática en el área se encuentra por debajo de los 6 m desde la superficie del terreno (Marano *et al.*, 2009).

La eficiencia del uso del agua para los cultivos de soja y trigo fue calculada como la producción de B total -medida en R8 en soja (sin hojas) o MF en trigo- o Rdto por unidad de agua evapotranspirada por el cultivo (ETcaj), según fue definido por Pierce & Rice (1988).

Índice de días de estrés (WSD)

El índice de días de estrés (WSD= *water stress days*) (Benjamin *et al.*, 2003), surge de la sumatoria que pondera numéricamente la cantidad de días de estrés por agua que sufrieron las plantas durante la estación de crecimiento y, se calculó introduciendo una modificación. En este trabajo la determinación del estrés hídrico tomó como criterio los límites del promedio del intervalo hídrico óptimo (IHO) y consideró exceso al contenido hídrico que estuvo por encima del límite superior (Ls) y como deficiencia a aquel que estuvo por debajo del límite inferior (Li); es decir, los contenidos hídricos de períodos en que el agua en el suelo se encontró fuera de los límites del IHO. A través de la Ecuación 6 se calculó el WSD durante el período de crecimiento del cultivo de soja y trigo para cada tratamiento.

$$\text{WSD} = \sum |\theta - \theta_{Li}| * 100 + \sum |\theta - \theta_{Ls}| * 100; \text{ si } \theta > Ls \text{ y } \theta < Li \text{ entonces} = 0 \quad (6)$$

Donde: Li= límite inferior del IHO; Ls= límite superior del IHO

Eficiencia de uso de nutrientes P y N

Para la determinación de la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) en trigo y eficiencia de uso de P (EUP) en soja, de las muestras para las mediciones de B total acumulada en madurez fisiológica en trigo y R8 en soja y Rdto secadas en estufa, se tomó una alícuota de planta y de granos. Dichas alícuotas se molieron para determinar la concentración de N en trigo -por la metodología de microdestilación Kjeldahl- o de P en soja -por la metodología AOAC (1990)- destrucción de la materia orgánica por calcinación, dejando toda la fracción

mineral, la que se disuelve con una solución de ácido clorhídrico, sobre la cual se cuantifica el fósforo con la reacción de color del fosfomolibdato de amonio.

La biomasa del resto de la planta se estimó como la diferencia entre la B total y el Rdto. El contenido de N o de P acumulado en grano y el resto de planta se calculó como el producto de la B de cada fracción y la concentración de N o P; mientras que, el N o P total acumulado se estimó como la suma de ambas fracciones.

La eficiencia fisiológica de uso de P (EFP) y la de N (EFN) se calcularon como el cociente entre la B o Rdto y el N o P total absorbido en la planta en R8 sin hojas en soja y MF en trigo.

Para el cultivo de soja la eficiencia fisiológica de uso de P para la producción de grano (EFP_G [kg grano kg⁻¹ P absorbido]) se calculó como el cociente entre el Rdto y el P total absorbido en la planta en R8 (sin hojas); la eficiencia de recuperación del P (EFR_P) se estimó como el cociente entre el P absorbido por el cultivo y el P aplicado con el fertilizante (kg P abs kg⁻¹ P apl), en tanto que la eficiencia en el uso del P para la producción de grano (EUP_G [kg grano kg⁻¹ P apl]) se calculó como el producto entre la EFP (kg grano kg⁻¹ P absorbido) por la EFR_P (kg P abs kg⁻¹ P apl) como una medida de productividad.

En trigo la eficiencia fisiológica de N en grano (EFN_G, kg_g kgN_abs⁻¹) y en biomasa total (EFN_B, kg_B kgN_abs⁻¹) se calculó como el cociente entre el rdto o la producción de biomasa total y el N total absorbido en MF. La eficiencia de recuperación del N (ER_N, kgN_abs kgN_disp⁻¹) se estimó como el cociente entre el N absorbido total en la planta y el N disponible. La eficiencia de uso del N en grano (EUN_G, kg_g kgN_disp⁻¹) o biomasa (EUN_B, kg_B kgN_disp⁻¹) se calculó como el cociente entre el Rdto o biomasa total y el nitrógeno total disponible (N del suelo+ N fertilizante+N mineralizado) como una medida de productividad.

En este trabajo se priorizó evaluar la eficiencia de uso de P en soja y no la del N, como una medida del efecto de la fertilización con P, si bien ésta como el nivel de compactación del suelo pueden afectar los aportes de N por fijación biológica (FBN) y la productividad del cultivo (Salvagiotti *et al.*, 2013; Gerster & Bacigaluppo, 2004; Fontanetto *et al.*, 2004). En trigo se evaluó la EUN y no la del P, priorizando la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada.

Productividad de los recursos agua y radiación

La productividad del agua (PA) en la secuencia de cultivos S-T/S-T/S-T, (tres años) se estimó como el producto entre la EUA y la eficiencia de captura de agua (ECA);

PA=EUA*ECA. La EUA se calculó como el cociente entre la suma de los rendimientos o B total del cultivo estival e invernal y, la suma de las ETcaj de los cultivos. La ECA resultó del cociente entre la suma de las ETcaj de los cultivos y las lluvias caídas desde el 1 de diciembre de 2008 al 20 de noviembre de 2011. La productividad de la radiación (PR) se calculó como el producto entre la EUR y la eficiencia de captura de la radiación (ECR); PR= EUR*ECR. La EUR se calculó como el cociente entre la suma de los rendimientos o B total de los cultivos en la secuencia S-T/S-T/S-T, y la RFAi. La ECR resultó del cociente entre la RFAi de los cultivos y la radiación incidente desde el 1 de diciembre de 2008 al 20 de noviembre de 2011.

Balance de carbono del suelo

Para el cálculo del balance de carbono orgánico del suelo (COS) se sumaron las entradas de rastrojo del trigo y la soja para cada campaña durante los tres años de la secuencia S-T/S-T/S-T, estimando un aporte de raíces del 20 % y 30 % de la B de rastrojos para trigo y soja, respectivamente. De los residuos un 40 % es C y solo la mitad pasa a formar humus por lo cual el aporte del C al humus se calculó tomando una tasa de humificación de los residuos del cultivo (k1) de 0,20 para trigo y soja (Álvarez, 2005). El stock de C inicial se calculó para la masa de suelo de los primeros 30 cm, teniendo en cuenta la densidad aparente del mismo para cada tratamiento y, se afectó el contenido de MO del suelo por el factor propuesto por Van Bemmelen de 1,724, el cual asume que el 58% de la MO está compuesta por C (Tabatabai, 1996) para obtener el porcentaje (%) de COS. El resultado final de la estimación de la evolución anual del COS en cada año se tomó como situación inicial de COS del año siguiente. Las pérdidas de COS se estimaron como el producto del *stock* de C al final de cada campaña por la tasa de mineralización anual de la MO del suelo (k2), cuyo valor es de 0,056 (Andriulo *et al.*, 1999; Álvarez, 2005). El balance se estimó según el modelo de Hénin & Dupuis (1945), donde la variación anual del contenido de C en el suelo se expresó según la Ecuación 7.

$$\Delta C/\Delta t = (m * k1) - (C * k2) \quad (7)$$

Donde: m= B de rastrojo aportada por el cultivo; k1= coeficiente de humificación que representa el aporte de C de los rastrojos al humus; C= pool de CO total del suelo; k2= coeficiente de mineralización anual del COS. Los resultados fueron expresados en toneladas de carbono por ha (tn C ha⁻¹).

Determinación de la materia orgánica particulada

La determinación de la Materia Orgánica Particulada (MOP) se llevó a cabo mediante el método de fraccionamiento físico descrito por Irizar *et al.* (2010). Para ello se agitan 50 g de suelo con 200 ml de agua destilada y cinco bolitas de vidrio durante 5 horas a 40 rpm. La suspensión fue tamizada a través de una malla de 50 μm haciendo movimientos de vaivén hasta que el agua de salida resultase límpida. El material conservado en el tamiz fue secado a 105 °C hasta peso constante. Posteriormente, en esa masa de suelo se determinó el contenido de CO con un analizador automático Leco C632. También se determinó el carbono orgánico total de la muestra (COT). Los análisis se realizaron en muestras de suelo tomadas a 10 cm de profundidad en dos momentos -mayo de 2009 y mayo de 2010- que corresponde a un año de la secuencia T/S, previamente hubo soja de primera con la cual se inició el ensayo en la campaña 2008/09.

Mediciones de raíces en soja

La densidad de raíces se determinó solo para soja en las C1 y C3. En la C1 se tomaron muestras perturbadas de suelo (cilindros de 6,4 cm de altura por 6 cm de diámetro) en la línea de siembra y en el entresurco, a dos profundidades 0-7 y 8-15 cm en 3 momentos V3 (30/12/2008), R3 (24/2/2009) y R6 (7/04/2009), para cada tratamiento y repetición, de las cuales por lavados sucesivos se separaron las raíces, las mismas fueron fijadas químicamente en FAA (formaldehído al 40% 5 ml, ácido acético 5 ml y alcohol etílico de 50-70° 90 ml para preparar 100 ml de fijador) por 48 hs. y conservadas en alcohol 70 %. Se determinó longitud radicular en cm y densidad de raíces en cm cm^{-3} a través del análisis de las imágenes capturadas con el software Image-Pro Plus 6.0. Las imágenes fueron tomadas con una cámara SONY Cyber-shot con 7.2 megapíxeles de definición.

En la C3, luego de la siembra se procedió a la colocación de tubos de acrílico -uno por parcela-. Los mismos fueron situados en la línea de siembra con una inclinación de 45° con respecto al nivel del suelo. La toma de muestras se realizó semanalmente con la utilización de un medidor de raíces minirizotron a 15, 25 y 35 cm de profundidad. Las imágenes tomadas fueron analizadas con el software Image-ProPlus 3.0 para la determinación de la densidad longitudinal de raíces $\delta l r$ (cm cm^{-2}). Para cada grupo de datos se determinó la función matemática de las curvas de crecimiento para cada profundidad. A partir de las curvas de densidad lineal se calculó el área bajo la curva para utilizarlo como base de la comparación entre tratamientos y profundidades de muestreo. El área bajo la curva se utilizó como base del

análisis, ya que sintetiza los valores máximos y mínimos de la longitud lineal radical como así también su estabilidad en el tiempo. El área debajo de la curva se llegó a partir de la siguiente fórmula: $\Sigma = [(\delta l r_i + \delta l r_{i+1})/2] \times (^{\circ}\text{C día}_{i+1} - ^{\circ}\text{C día}_i)$

$\delta l r_i$: densidad longitudinal radical i (cm cm^{-2}); $\delta l r_{i+1}$: densidad longitudinal radical $i+1$ (cm cm^{-2}); $^{\circ}\text{C día}_{i+1}$: Sumas térmicas $i+1$; $^{\circ}\text{C día}_i$: Sumas térmicas i

Análisis estadístico

En el análisis estadístico de los datos registrados para los diversos tratamientos se utilizó el programa INFOSAT/Profesional, versión 2008p (InfoStat, 2008). Los datos de las variables de cultivo y de suelo se evaluaron mediante ANOVA, las medias se compararon según el test de mínima diferencia significativa (LSD, según sus siglas en inglés), con un nivel de significancia del 5% ($P \leq 0.05$). Además, se aplicaron técnicas de análisis multivariado para analizar correlaciones entre variables y explicar interacciones entre fertilización y compactación, tanto a nivel de crecimiento y Rdto del cultivo como a nivel de eficiencia en el uso de los recursos (Balzarini *et al.*, 2005).

CAPÍTULO I

VARIABLES METEOROLÓGICAS, DE SUELO Y ECOFISIOLÓGICAS QUE EXPLICAN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA

INTRODUCCIÓN

En los últimos años del siglo pasado y en lo que va del presente se han producido cambios profundos en el sector agropecuario promovidos, entre otras cosas, por el crecimiento y la expansión del cultivo de la soja (*Glicine max* (L.)-Merr.). Entre los principales países productores y exportadores de grano de soja en el mundo, Argentina ocupa el tercer lugar y es el principal exportador de aceite y harina derivados de esta oleaginosa, con un 63 y 44 %, respectivamente (Giancola *et al.*, 2009). El aumento de producción del cultivo de soja en nuestro país tuvo lugar especialmente a partir del 1991 y se debió básicamente a la expansión de la superficie sembrada sobre áreas no tradicionales, avanzando hacia las provincias de Santa Fe, Córdoba, Santiago del Estero, Tucumán, Chaco, Formosa, Salta y Jujuy (Ramírez & Porstamann, 2008).

La provincia de Santa Fe, por su naturaleza y tradición agrícola, es una de las principales productoras de soja con una superficie cosechada (promedio de las últimas campañas: 2012/13, 2013/14 y 2014/15) de aproximadamente 3167839 has, una producción de 10757451 tn y un Rdto medio de 3398 kg ha⁻¹ (SiiA, 2015).

Del total de la siembra de soja de primera y segunda, el 89% es realizado bajo el sistema de SD (Aapresid, 2012). Los suelos manejados con siembra directa suelen presentar valores de resistencias a la penetración más elevados y, en algunos casos, aumento de la densidad aparente (Álvarez *et al.*, 2004; Díaz Zorita *et al.*, 2002a). En los últimos años, la compactación del suelo ha sido indicada como una de las causas más importantes de la pérdida de productividad de los cultivos (Jorajuria & Draghi, 1997).

En sistemas de SD, con mínima remoción de suelo, se favorece la conservación de la humedad del perfil y el aumento del contenido de MO, debido a la acumulación de rastrojos, lo cual es de relevancia para lograr elevadas productividades. Sin embargo, por la ausencia de remoción, sumado al tránsito sistemático de la maquinaria, puede promoverse la ocurrencia de compactación excesiva (Tormena & Roloff, 1996), principalmente si se realiza en suelos que presentan elevados contenidos de agua y de arcilla. La compactación producida puede ser superficial y/o subsuperficial, siendo provocada por presión excesiva de los neumáticos y/o

elevado peso de los tractores, cosechadoras y otras maquinarias agrícolas (tolvas, pulverizadoras) (Salire *et al.*, 1994; Hakansson & Voorhees, 1998).

La severidad de la compactación depende de las características intrínsecas del suelo, especialmente la textura, siendo más susceptibles aquellos suelos en que predomina la fracción fina en la composición granulométrica. En Argentina, el cultivo de soja ha crecido principalmente en tierras cuya textura es franco-limosa a franco-arcillosa (2,6 millones de ha).

El efecto negativo del limo sobre la estabilidad estructural se relaciona con la composición y el origen de esta fase sólida del suelo. Por lo menos, la mitad de los limos están en el rango 2-20 μm (*i.e.* limo fino), cuyo origen son los fitolitos. Estas partículas tienen porosidad lacunar, que otorga a los suelos baja resistencia a la tracción y alta susceptibilidad a la degradación por erosión, laboreo o tránsito (Cosentino & Pecorari, 2002).

Como consecuencia de la ampliación de la frontera agrícola y de la intensificación del uso de la maquinaria, los suelos fueron exponiendo, a través de los años, severos disturbios sobre sus propiedades estructurales, lo que ha llevado a su compactación. Cabe mencionar además, que el proceso de compactación puede ocurrir de forma desuniforme en los lotes, provocando heterogeneidad en las propiedades del suelo. Como consecuencia se pueden detectar sectores con condiciones físicas más restrictivas, en los que ocurre un secado acelerado de las plantas por estrés hídrico, dando como resultado retención foliar y tallo verde (RFTV). Este es un fenómeno fisiológico, disparado por condiciones ambientales estresantes - altas temperaturas, estrés hídrico-, cuya magnitud parece ser agravada por la compactación del suelo (Astegiano, 2002; Astegiano *et al.*, 2002) y, que provoca disminución de rendimientos y calidad de los granos. Por ejemplo, el incremento de porcentaje de grano verde es castigado por las empresas aceiteras, ya que genera dificultades en la extracción del aceite y coloraciones no deseadas (Astegiano *et al.*, 2006).

La estructura del suelo es la forma en que están ordenados las partículas sólidas y los espacios, distribuyéndose el aire, el agua, los nutrientes y sirviendo como anclaje al cultivo. Al intensificarse el uso continuo de la maquinaria, las partículas que forman dicha estructura, sufren un “reordenamiento”, aumentando el contacto entre ellas, incrementando la D_s y disminuyendo el espacio poroso, especialmente los macroporos. Este proceso se ve acompañado por un aumento en la RP del suelo. Dicho ordenamiento demuestra que los suelos compactados poseen mayor inestabilidad estructural, comparados con los mismos suelos con buena estructura, o con distintos tipos de manejo del mismo (Álvarez *et al.*, 2012).

La compactación del suelo es considerada un tipo de degradación de la tierra más difícil de localizar y reconvertir. Esto es así ya que se trata de un suceso que ocurre sub-

superficialmente, con respecto a otros fenómenos que aparecen superficialmente como la erosión y la salinización. Estos fenómenos tienen otras implicancias como es la alteración de la capacidad de infiltración de agua, su redistribución en el perfil del suelo y la transferencia de calor. La reducción de la tasa de infiltración aumenta las pérdidas por escurrimiento y disminuye la reserva disponible para los cultivos, comprometiendo su productividad (Álvarez *et al.*, 2006).

Si la compactación ocurre en la capa superficial, se producirá un incremento de la escorrentía y de la erosión; en tanto que, si la capa compactada está a una cierta profundidad, aparecerán problemas de encharcamiento al disminuir la velocidad de infiltración (Horton *et al.*, 1994). La mayor escorrentía y la menor tasa de infiltración hacen que una parte del agua caída no pase a las capas inferiores del suelo cuando éste se encuentra compactado y, como consecuencia de ello, su reserva de agua será menor, provocando un grave inconveniente para las plantas.

Las raíces necesitan para poder desarrollarse agua y oxígeno, como también un espacio poroso adecuado entre las partículas del suelo por el cual crecer. Cuando las raíces se encuentran con una capa de suelo compactada, en las cuales la densidad es alta y existen pocos espacios entre las partículas, el crecimiento de las raíces va requiriendo un mayor gasto de energía, deteniendo su crecimiento o cambiando de dirección, hasta que encuentran una zona con porosidad adecuada y de menor resistencia (Materechera *et al.*, 1991).

A veces pueden introducirse por grietas existentes entre los terrones endurecidos, por canales realizados por raíces ya muertas o por canales excavados por las lombrices (Da Silva *et al.*, 1994; Taboada *et al.*, 2000). Este tipo de distribución radicular, a través de algunas fisuras existentes en las capas endurecidas, no permite una adecuada exploración del volumen del suelo. Tradicionalmente, es en la agricultura donde se ha prestado mayor atención a este problema, debido a la disminución que produce en el Rdto de los cultivos.

Cuando la disponibilidad de agua no es limitante, la cantidad transpirada por el cultivo depende, fundamentalmente, de la RFAi por su canopeo. La radiación solar es la fuente de energía utilizada en el proceso transpiratorio y en el de fijación de CO₂. La cantidad de RFAi y acumulada por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la dinámica de interceptación, fuertemente ligada a la evolución del IAF. Éste se genera con la aparición y expansión de las hojas y, es el producto del número de hojas y del tamaño de las mismas (Maddonni & Otegui, 1996).

La biomasa total a cosechar de los cultivos resulta de la acumulación neta del CO₂ asimilado durante todo el ciclo de crecimiento. Como consecuencia de ello, este proceso

resulta de la absorción de energía solar -radiación- y la actividad de la enzima rubisco. Los factores primarios que afectan la B total son la radiación solar absorbida y la eficiencia de utilización de esa energía para la fijación del CO₂ (Gardner *et al.*, 1985a). Para que un cultivo use eficientemente la radiación solar, gran parte de ésta debe ser absorbida por los tejidos fotosintéticos. Las hojas son los principales órganos responsables de la fotosíntesis e intercepción de luz, se desarrollan en el embrión de las semillas y en los tejidos meristemáticos de los tallos (Gardner *et al.*, 1985a).

En los cultivos anuales el AF inicial se desarrolla de la semilla y ésta al ser pequeña durante las etapas iniciales de crecimiento provoca que gran parte de la radiación solar sea absorbida por la superficie del suelo, produciendo calor sensible (Gardner *et al.*, 1985b). Los cultivos eficientes tienden a invertir la mayor parte de su crecimiento temprano en expandir su AF, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de la radiación incidente. Algunas prácticas agronómicas tales como fertilización de arranque, altas densidades de siembra y un mejor arreglo espacial de las plantas (por ejemplo hileras estrechas), son usadas para acelerar la cobertura del suelo e incrementar la intercepción de luz. La pendiente de la relación entre la RFAi y la B acumulada es la EUR, la cual se expresa en $\text{g m}^{-2} \text{MJ}^{-1}$. Las diferencias más marcadas para esta eficiencia están dadas por el metabolismo del C del cultivo (C3 o C4) y por el tipo de materia seca producida y acumulada (Sinclair & Muchow, 1999).

Watson (1947) concibió el término IAF como la relación del área de hojas (tomada sobre una sola cara de las mismas) del cultivo con respecto al área de suelo. Debido a que la radiación solar cubre toda la superficie de suelo, el IAF es una medida robusta de AF por unidad de radiación solar disponible. Las deficiencias de agua o nutrientes pueden reducir la tasa de expansión de las hojas y, por lo tanto, el IAF, influyendo directamente sobre la radiación interceptada (Matthews *et al.*, 1988)

La fertilización es una estrategia para aumentar la producción de MS y el Rdto, siendo el P uno de los elementos principales y más deficitario en nuestros suelos después de más de un siglo de explotación. Este elemento y su adecuada disponibilidad es crítica para lograr un rápido crecimiento y un desarrollo adecuado de las raíces, de los nódulos (número, ubicación y tamaño), de una eficiente fijación biológica de nitrógeno (FBN) y de la parte aérea (García, 2004; Fontanetto *et al.*, 2004). Las reducciones en los rendimientos como consecuencia de deficiencias de P se explican por reducciones en el número de los granos, al afectar el AF y consecuente la captación de la radiación en estadíos tempranos de desarrollo del cultivo (Gutiérrez Boem & Thomas, 1999).

Para un eficiente manejo de la nutrición fosfatada del cultivo es conveniente estimar la capacidad del suelo para proveer este elemento, recomendándose la determinación del contenido de P extractable de los suelos (método de Bray-Kurtz 1) en la capa de 0 a 20 cm de profundidad. El umbral o rango crítico de P extractable del suelo es el nivel por debajo del cual el cultivo presenta una alta probabilidad de respuesta a la fertilización y, por arriba del cual, la probabilidad de respuesta es baja a muy baja. Los umbrales críticos de P extractable para el cultivo de soja en la región Pampeana son entre 9-14 ppm (Echeverría & García, 1998; Díaz Zorita *et al.*, 2002b; Gutiérrez Boem *et al.*, 2002; Melchiori *et al.*, 2002; Fontanetto, 2004; García *et al.*, 2005).

La respuesta del cultivo a la fertilización con P depende no sólo de la disponibilidad de P del suelo, sino también de la dosis aplicada. Es esperable una respuesta a la fertilización fosfatada superior a 200, 300 y 400 kg de grano por ha cuando la disponibilidad de P es inferior a 12, 10 y 8 ppm, respectivamente (Díaz Zorita *et al.*, 2002b). Otros estudios realizados en Argentina para relacionar los niveles de P extractable de los suelos con la respuesta de soja a la fertilización fosfatada, concluyeron que los rendimientos en los tratamientos testigo (sin fertilización con P) eran cada vez más bajos en la medida que el P del suelo disminuía. Asimismo, es posible obtener respuestas que varían entre 175 y 690 kg ha⁻¹ con el agregado de 30 kgP ha⁻¹ en suelos con contenidos de P extractable inferiores a las 17 ppm (Fontanetto *et al.*, 2008).

En cuanto a la fertilización azufrada, se han observado respuestas positivas en el rendimiento al agregado de S, tanto por la fertilización directa de soja como por un efecto residual cuando el fertilizante fue aplicado al trigo antecesor de una soja de segunda (Salvagiotti *et al.*, 2004). En el centro sur de Santa Fe, las respuestas se observaron en especial en suelos con una larga historia agrícola, con bajos contenidos de materia orgánica y que, en general, habían perdido parte del horizonte superficial por erosión (Martínez & Cordone, 1998). En el cultivo de soja de primera, la disponibilidad de sulfato (S-sulfato) en el suelo (0-60 cm) no ha permitido predecir la respuesta a la aplicación de S (Divito & Echeverría, 2014), de manera similar ocurre con el rendimiento de soja de segunda (Echeverría *et al.*, 2011). A pesar de ello, dichos autores propusieron un umbral de 40 kg S ha⁻¹.

Los antecedentes presentados sugieren que los efectos del proceso de compactación pueden ser observados tanto en la plantas como en el suelo. Sin embargo, todavía es poco lo que se sabe sobre el efecto de la compactación sobre el cultivo de soja en la Argentina con diferentes resultados (Ferrerías *et al.*, 2000; Botta *et al.*, 2004; Botta *et al.*, 2006).

Algunos autores trabajando en suelos argiudoles en siembra directa determinaron que por encima de un determinado umbral de agua aportada por las lluvias y acumulada en el suelo, el rendimiento del cultivo de soja se asoció principalmente con las temperaturas medias durante la fijación y la radiación acumulada durante el llenado de granos y por debajo del umbral, el rendimiento se explicó en mayor medida por las lluvias durante el período reproductivo, la presencia de zonas masivas sin macroporos visibles y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), donde los mayores rendimientos se obtuvieron siempre en las mejores condiciones físicas de suelo (Bacigaluppo *et al.*, 2011). Gerster *et al.* (2010) encontraron que la inclusión de gramíneas y la descompactación mecánica mejoraron la calidad física del suelo, sin efecto sobre el rendimiento del cultivo de soja. Micucci & Taboada (2006) observaron que la abundancia de raíces en soja en siembra directa y convencional se correlacionó negativamente con el contenido de arcilla del subsuelo y no con el tipo de labranza.

La relevancia del problema aumenta si se considera el incremento de la superficie que se cultiva con SD y con escasas a nulas utilidades de criterios de manejo para disminuir la compactación. Por otra parte, la mayoría de los estudios están concentrados en el proceso edáfico, con muy pocos trabajos que incluyan estudios sobre aspectos ecofisiológicos del cultivo y eficiencia en el uso de los recursos.

El presente estudio tiene como objetivo aportar información regional del efecto residual de la descompactación y la fertilización fosforada sobre parámetros físicos y químicos del suelo y su relación con la EUR, EUA y EUP y los componentes del Rdto en el cultivo de soja.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1- Caracterización agrometeorológica

Las precipitaciones que caracterizaron cada una de las campañas de soja se encuentran detalladas en la Tabla 1-1. Si se comparan las lluvias registradas desde un mes antes de la siembra y durante el ciclo del cultivo hasta el mes de abril, con respecto a la media de los últimos 15 años para el mismo período, podemos diferenciar distintos escenarios desde el punto de vista hídrico: i) C1 -2008/09- muy seca; ii) C2 -2009/10- húmeda; iii) C3 -2010/11- moderadamente seca.

Tabla 1-1. Lluvias (mm) desde noviembre a abril para las campañas de soja 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3). Promedio años (1998 a 2011) y diferencia en mm con respecto al promedio 1998-2011. (Dif.(+ -) H).

Mes	C1	C2	C3	Histórico (1998/2011)
Nov	74	210	55	139
Dic	16	302	100	158
Enero	22	142	185	128
Febrero	139	283	143	134
Marzo	198	133	120	201
Abril	21	77	127	162
Total	471	1147	730	922
Dif.(+ -)H	-451	224	-192	mm

La C1 presentó un déficit hídrico marcado en gran parte del período vegetativo del cultivo, registrándose lluvias importantes en la primera semana de marzo a partir del estado fenológico de R4. Las mismas permitieron la recuperación del cultivo, mostrándose nuevamente condiciones de estrés térmico e hídrico en pleno llenado de granos (Figura 1-1).

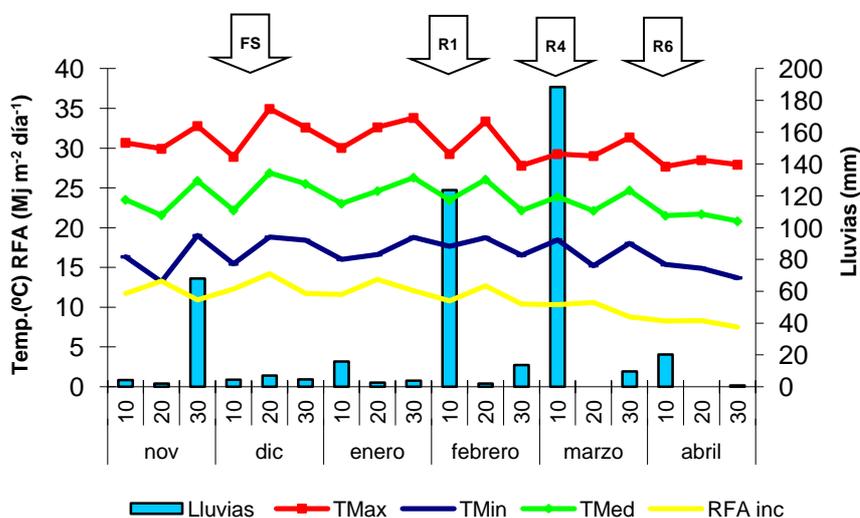


Figura 1-1. Condiciones meteorológicas y evolución de la fenología del cultivo de soja durante la campaña 2008/09. Lluvias (mm), temperaturas máximas, mínimas y medias ($TM_{\text{máx}}$, $TM_{\text{mín}}$ y TM_{med} , en $^{\circ}\text{C}$) y radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_{inc} , en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante los meses de noviembre a abril. Datos correspondientes a décadas (D). Flechas indican: FS= fecha de siembra (4/12/2008); R1= inicio de floración (10/2/2009); R4= plena fructificación (5/03/2009); R6= máximo tamaño de semilla (7/04/2009)

Durante la C2 las lluvias acumuladas fueron superiores al promedio histórico. A su vez, la distribución de las precipitaciones fue muy favorable, superando los registros de referencia en los meses críticos para el desarrollo del cultivo (diciembre, enero y febrero). Hacia el final del ciclo de la soja, donde los requerimientos son menores, las lluvias fueron inferiores a las normales para la época, pero ampliamente compensadas por las reservas hídricas en el perfil del suelo (Figura 1-2).

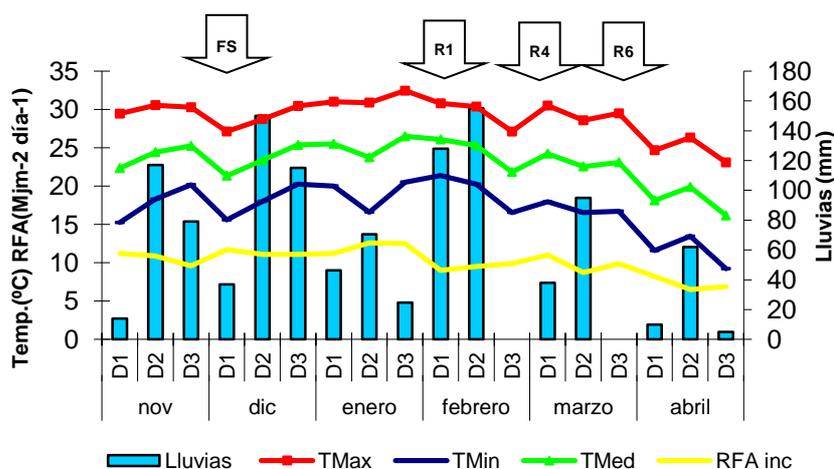


Figura 1-2. Condiciones meteorológicas y evolución de la fenología del cultivo de soja durante la campaña 2009/10. Lluvias (mm), temperaturas máximas, mínimas y medias (TMax, TMin y TMed, en °C) y radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAinc, en MJ m⁻² día⁻¹) durante los meses de noviembre a abril. Datos correspondientes a décadas (D). Flechas indican: FS= fecha de siembra (5/12/2009); R1= inicio de floración (5/02/2010); R4= plena fructificación (1/03/2010); R6= máximo tamaño de semilla (29/03/2010)

En la C3 las precipitaciones durante los meses de noviembre y diciembre fueron escasas lo que resultó en bajas reservas de agua en el suelo, teniendo muy buenas condiciones hídricas durante los meses de enero y febrero (Figura 1-3). Esto permitió un buen crecimiento vegetativo y reproductivo temprano, para luego volver a presentarse en la primera década de marzo condiciones de estrés hídrico que afectaron el normal crecimiento del cultivo.

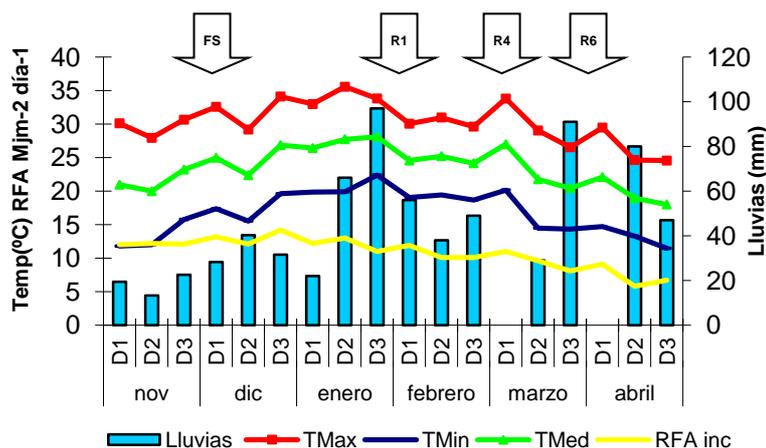


Figura 1-3. Condiciones meteorológicas y evolución de la fenología del cultivo de soja durante la campaña 2010/11. Lluvias (mm), temperaturas máximas, mínimas y medias (T_{Máx}, T_{Mín} y T_{Med}, en °C) y radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_{inc}, en MJ m⁻² día⁻¹) durante los meses de noviembre a abril. Datos correspondientes a décadas (D). Flechas indican: FS= fecha de siembra (6/12/2010); R1= inicio de floración (1/02/2011); R4= plena fructificación (1/03/2011); R6= máximo tamaño de semilla (2/04/2011).

Condiciones ambientales adversas durante las etapas tempranas del cultivo pueden ser compensadas si la calidad del ambiente mejora y el número final de granos no resulta afectado. Sin embargo a medida que avanza el ciclo esta tolerancia disminuye. Por lo tanto es importante el reconocimiento del período crítico para la definición del número de granos y de la parcial compensación que pueda realizar el peso de los granos. En el caso del cultivo de soja el período crítico se encuentra comprendido principalmente entre los estados fenológicos de R4 y R6 (Board & Tan, 1995). Las fechas de siembra de segunda durante las tres campañas expusieron al cultivo de soja a un conjunto de factores detrimentales: los fotoperíodos más inductivos que aceleran el desarrollo acortando principalmente las etapas reproductivas y condiciones menos favorables de radiación incidente y temperatura (desde los primeros días de marzo hasta la primera década de abril). Dichos efectos, en conjunto, disminuyen la intercepción de radiación, el crecimiento durante el período crítico y, por ende, el Rdto final (Board & Tan, 1995). En la Tabla 1-2 se observa la mayor duración en días en la C2 del ciclo total y del período R4 a R7 que comprende la fijación de vainas hasta madurez fisiológica, acortándose marcadamente en las C1 y C3, principalmente la etapa final del llenado de grano (R6-R7).

Tabla 1-2. Fechas de ocurrencia de los distintos estadios fenológicos reproductivos del cultivo de soja (R1= inicio de floración, R4= plenitud de fructificación, R6= plenitud de llenado de granos, R7= inicio de madurez fisiológica), acumulación de sumas térmicas (en °C día⁻¹), duración del ciclo y de etapas (en días) para las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11. Temperatura base= 8 °C.

E. fenológico	Soja 2008/09				Soja 2009/10				Soja 2010/11			
	R1	R4	R6	R7	R1	R4	R6	R7	R1	R4	R6	R7
Fecha ocurrencia	10-feb	05-mar	07-abr	15-abr	05-feb	01-mar	29-mar	17-abr	01-feb	01-mar	02-abr	08-abr
S.T °Cd ⁻¹ (Tb 8°C)	1054	1431	1926	2041	851	1315	1739	1946	967	1313	1741	1824
Duración ciclo (días)	68	91	124	132	62	89	117	136	56	84	116	120
	S-R1	R1-R4	R4-R6	R6-R7	S-R1	R1-R4	R4-R6	R6-R7	S-R1	R1-R4	R4-R6	R6-R7
Duración etapas (días)	68	23	34	8	62	27	28	19	56	28	32	4

2- Balance hídrico

Las características del ambiente general de desarrollo y crecimiento del cultivo se detallan en la Tabla 1-3. Corresponden al período comprendido entre la siembra (4, 5 y 6 de diciembre) y madurez fisiológica del cultivo (15, 17 y 8 de abril) para C1, C2 y C3.

El requerimiento hídrico durante el ciclo del cultivo de soja representado por la ETc fue de 483, 549 y 485 mm, en tanto que, la precipitación efectiva (Pe) fue de 334, 746 y 507 mm para C1, C2 y C3, respectivamente. El balance de agua para todo el ciclo (Pe-ETc) fue negativo para C1, positivo para C2 y levemente positivo para C3. Sin embargo, la distribución de las lluvias y los momentos de ocurrencia del déficit o exceso de agua son los que impactaron en mayor o menor medida sobre el crecimiento y componentes del Rdto.

Tabla 1- 3. Precipitación efectiva (Pe, mm), evapotranspiración de referencia (Eto, mm), coeficiente de cultivo (Kc), evapotranspiración de cultivo (Etc, mm) y balance de agua (déficit -Déf.- ó exceso -Exc.-, mm) durante el crecimiento y desarrollo del cultivo de soja para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (3).

	Meses	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
C1	Pe (mm)	16,3	22,3	115	160	21,0	334
	ETo (mm) (*)	151	181	154	133	61,1	680
	Kc (**)	0,30	0,68	0,93	1,04	0,55	
	ETc (mm)	45,2	123	143	139	33,6	483
	Déf. o Exc. (mm) (***)	-28,9	-101	-28,7	+21,6	-12,6	-147

	Meses	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
C2	Pe (mm)	241	113	226	106	59,4	746
	ETo (mm) (*)	140	177	128	130	46,3	622
	Kc (**)	0,43	0,82	1,15	1,10	0,65	
	ETc (mm)	60,2	146	148	143	30,1	527
	Déf. o Exc. (mm) (***)	+181	-15,2	+120	-11,2	+32,0	+219
	Meses	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
C3	Pe (mm)	80,1	152	114	96,0	64,0	507
	ETo (mm) (*)	137	167	119	128	51,6	603
	Kc (**)	0,40	0,82	1,10	1,04	0,55	
	ETc (mm)	54,8	138	131	133	28,3	485
	Déf. o Exc. (mm) (***)	+25,3	+14,4	-16,6	-37,0	+35,7	+22,2

(*) Calculado por el método de Penman-Monteith.

(**) Fuente: Estudio FAO (2000), Riego y Drenaje, 33.

(***) Pe-ETc

La evapotranspiración real del cultivo o ET_c representa el consumo de agua en las condiciones del ensayo. La misma se calculó para cada tratamiento como: $ET_{c} = Pe \pm \Delta Alm$; donde: ΔAlm = variación del almacenaje de agua en el suelo para los intervalos de medición de humedad, hasta 1,6 m de profundidad y, Pe = precipitación efectiva acumulada entre intervalos de medición. La ΔAlm y la Pe la podemos observar en las Figuras 1-4, 1-5 y 1-6.

En la C1 el contenido hídrico del suelo estuvo muy bajo y con poca variación entre mediciones durante toda la etapa vegetativa y reproductiva temprana del cultivo (enero y febrero). La reposición del agua del suelo comenzó con las lluvias de marzo, al inicio del período crítico del cultivo, para luego disminuir nuevamente (Figura 1-4).

Durante la campaña C2 la reposición del agua del suelo fue positiva debido a las lluvias abundantes (Figura 1-5). Esto reflejó que los requerimientos de agua del cultivo fueron cubiertos por las lluvias y el agua almacenada en el suelo.

En la C3 las lluvias de diciembre y enero no llegaron a recargar el perfil durante la etapa vegetativa del cultivo. En febrero, al inicio de floración se recuperan las condiciones hídricas favoreciendo el crecimiento del cultivo hasta R4, donde nuevamente se observa una disminución importante de las reservas hídricas del suelo durante la etapa crítica del mismo, llegando las lluvias al final de la misma en R6 (Figura 1-6).

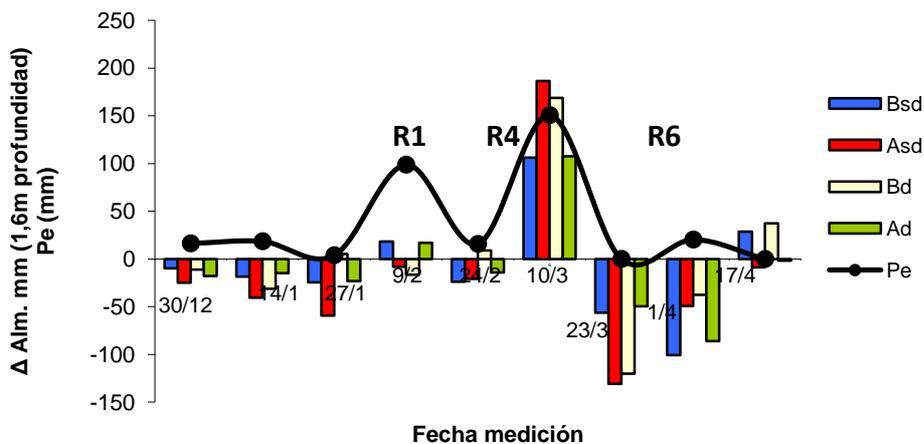


Figura 1-4. Variación de almacenaje de agua en el suelo (Δalm , mm) y precipitación efectiva (P_e , mm) en la campaña 2008/09 (C1) para los tratamientos alta fertilización descompactado (Ad), baja fertilización sin descompactar (Bsd), alta fertilización sin descompactar (Asd) y baja fertilización descompactado (Bd).

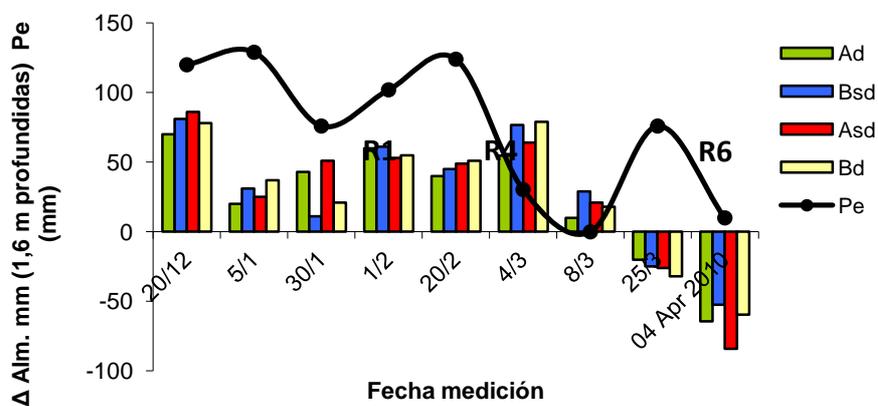


Figura 1-5. Variación de almacenaje de agua en el suelo (Δalm , mm) y precipitación efectiva (P_e , mm) en la campaña 2009/10 (C2) para los tratamientos alta fertilización descompactado (Ad), baja fertilización sin descompactar (Bsd), alta fertilización sin descompactar (Asd) y baja fertilización descompactado (Bd).

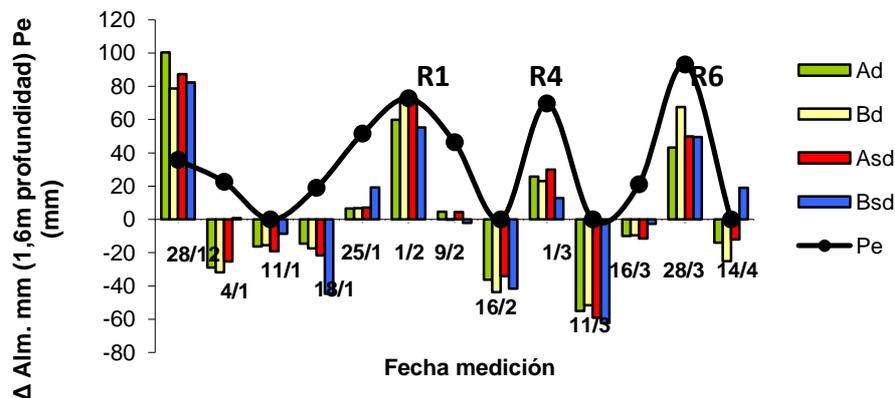


Figura 1-6. Variación de almacenaje de agua en el suelo (Δalm , mm) y precipitación efectiva (Pe , mm) en la campaña 2010/11 (C3) para los tratamientos alta fertilización descompactado (Ad), baja fertilización sin descompactar (Bsd), alta fertilización sin descompactar (Asd) y baja fertilización descompactado (Bd).

La ETcaj no resultó modificada por efecto de la fertilización o compactación y presentó diferencias según el año ($P < 0,05$), tampoco hubo interacciones entre NF, NC y año (Tabla 1-4).

La ETcaj en el nivel de alta fertilización (A) y descompactado (d) mostró una tendencia a ser superior en un 4 % y 4,5 % respecto al nivel bajo (B) y sin descompactar (sd) respectivamente. En la campaña C2 la ETcaj estuvo en promedio un 13% por encima de C1 y C3 ($P < 0,05$). Los menores valores de Etcaj (mm) se obtuvieron en la C1:2008/09 (432mm) y los mayores en la C2: 2009/10 (507mm). La C2 se caracterizó por mayores precipitaciones, generación de área foliar e intercepción de radiación por parte del cultivo (ver sección 5 Caracterización del crecimiento del cultivo de soja) por lo cual evapotranspiró mayor cantidad de agua por el aumento en su producción de biomasa.

Marano *et al.* (2006) encontraron para la zona en estudio valores de ETc de 401 mm para GM V y 409 mm para GM VIII. Andriani (2000) para el área de Oliveros (Santa Fe), obtuvo un consumo acumulado de 530 y 425 mm en soja de primera y de segunda con mediciones de agua hasta 2 m de profundidad. Mientras que, Salado Navarro *et al.* (2006) estimaron mediante un modelo mecanístico un consumo medio de 560 mm para este cultivo.

Tabla 1-4. Evapotranspiración ajustada (ETcaj, mm) del cultivo de soja según los factores principales fertilización [F, para cada nivel alto (A) o bajo (B)] y compactación [C, descompactado (d) o sin descompactar (sd)] para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) y sus interacciones.

		ETcaj (mm)
NF	A	469,1 a
	B	451,1 a
NC	d	470,6 a
	sd	449,7 a
Año	2008/09	432,2 a
	2009/10	507,1 b
	2010/11	441,1 a
Análisis de la varianza		
NF		ns
NC		ns
Año		<0,0001
NF*NC		ns
NF*Año		ns
NC*Año		ns
NF*NC*Año		ns

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$).

3- Condiciones químicas y físicas del suelo

3-1. Determinaciones químicas

Los resultados de P asimilable, MO, N total, azufre de sulfatos (S-SO₄) y pH determinados al inicio de cada campaña de soja pueden observarse en la Tabla 1-5. Ninguna de estas variables químicas presentó diferencias significativas según NF, NC y entre las distintas campañas, como interacciones.

Los valores de %MO se ubicaron dentro del rango (1,9-2,9%) obtenidos por Carrizo *et al.* (2011), en suelos cultivados del Departamento La Colonias -Santa Fe- considerado medio-bajo según Conti (2000).

No se realizó fertilización con S, si bien existe evidencia experimental en la zona de una respuesta positiva en rendimiento del cultivo de soja al agregado de S (Fontanetto *et al.*, 2003). Los niveles en el suelo de S-SO₄ obtenidos, estuvieron por encima de valores críticos citados en otros países de 10 mg kg⁻¹ S-SO₄ (Messick, 1992), para su consideración en la

región hacen falta más estudios para poder predecir la respuesta de soja basado en el análisis de suelo. Si bien Divito y Echeverría, (2014) propusieron un umbral de 40 kg S ha⁻¹ (0-60 cm)

El P extractable presentó valores muy por debajo de los críticos para soja -que varían según los autores entre 13 a 17 ppm-, donde sería esperable una respuesta a la fertilización fosforada superior a 300 y 400 kg de grano ha⁻¹ cuando la disponibilidad de P es inferior a 10 y 8 ppm, respectivamente (Díaz Zorita *et al.*, 2002b).

El nivel de P Bray se mantuvo en valores similares en C2 y C3, pudiéndose deber al criterio de fertilización utilizado de reposición (26 kg P ha⁻¹) o arranque (entre 12 a 14 kg P ha⁻¹) según nivel de fertilización A o B, respectivamente. En el Capítulo II se analizará la evolución en el tiempo del nivel de P en la secuencia S-T/S-T/S-T.

Tabla 1-5. Materia orgánica (MO, %), fósforo asimilable (P, ppm), azufre (S-S04, ppm), nitrógeno total (Nt, %) y pH del suelo al inicio del ensayo C1 2008, y en las campañas siguientes C2 y C3 antes de la siembra de soja a 0-20 cm de profundidad según nivel de compactación y fertilización y sus interacciones.

		MO (%)	P (ppm)	S-S04 (ppm)	Nt (%)	pH
Inicial	C1 2008	2,5	7,3	13,1	0,147	6,1
NF	A	2,5 a	8,3 a	16,6 a	0,152 a	6,1 a
	B	2,6 a	7,4 a	16,9 a	0,154 a	6,2 a
NC	d	2,5 a	8,1 a	16,5 a	0,153 a	6,2 a
	sd	2,6 a	7,8 a	17 a	0,151 a	6,2 a
Año	C2 2009-10	2,6 a	7,5 a	15,9 a	0,152 a	6,2 a
	C3 2010-11	2,6 a	8,3 a	17,2 a	0,153 a	6,2 a
Análisis de la varianza						
NF		ns	ns	ns	ns	ns
NC		ns	ns	ns	ns	ns
Año		ns	ns	ns	ns	ns
NF*NC		ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		ns	ns	ns	ns	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns

*Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$); *diferencia significativa ($P \leq 0,05$).*

3-2. Cambios en las propiedades físicas del suelo

El análisis de la varianza para las variables de suelo Ds, RP, Pa y Dsr a dos profundidades se muestra en la Tabla 1-6, donde la interacción NC*Año presentó diferencias

significativas ($P < 0,05$), no así las interacciones NF*Año y NF*NC esta última expresa el efecto de los tratamientos.

En cuanto al NF las variables Ds, RP, Dsr y Pa mostraron diferencias significativas en ambas profundidades. Del análisis del efecto principal del nivel de fertilización se observan valores de Ds, RP 1,5 y 6,1% superiores y de Pa 5,9 % inferiores en el nivel de alta fertilización, con respecto a los de baja fertilización en la capa superficial del suelo, con un comportamiento similar subsuperficial (Tabla 1-6).

Teniendo en cuenta los valores de las variables de suelo medidas en la situación inicial en la C1: 2008/09 (Tabla 1-7), el nivel de alta fertilización partió de valores de Ds, RP mayores y Pa menores, superficial y sub-superficialmente con respecto a los de B fertilización por lo que no se podría atribuir totalmente al nivel de alta fertilización los cambios en dichas variables de suelo.

Si analizamos los valores de la tabla 1-6 relativos a la situación de partida o inicial (Tabla 1-7) en el nivel de alta fertilización el porcentaje de aumento de la Ds, RP con respecto a los de baja fue menor en un 1,5% vs 3,05% y 6,3% vs 7,8% respectivamente y el porcentaje de disminución de la Pa un 6,1% vs 7,9%, en la capa superficial del suelo (0-7cm), con un comportamiento similar subsuperficial (8-12 cm).

Una mayor fertilización de los cultivos puede incrementar la proliferación radicular y el aporte de rastrojos de los sucesivos cultivos, aumentando la materia orgánica de los horizontes superficiales y de ese modo la calidad física del suelo, al respecto Gou *et al.* (2014) encontraron en experimentos de largo plazo en suelos vertisoles que aplicaciones de NPK más el aporte de enmiendas orgánicas en cultivos de trigo, soja y maíz mejoraban algunas propiedades físicas del suelo como Ds y Pa con respecto a la situación inicial. En este trabajo teniendo en cuenta los valores relativos a la condición de suelo inicial de la Ds, RP y Pa el efecto de la mayor fertilización con fósforo en soja y nitrógeno en el cultivo antecesor trigo pudo haber contribuido a mantener una mejor calidad física del suelo.

Tabla 1-6. Análisis de la varianza para las variables densidad aparente suelo (Ds , $g\ cm^{-3}$), resistencia a la penetración (RP , MPa), porosidad de aireación (Pa , %) y densidad de suelo relativa (Dsr , $g\ cm^{-3}$) a dos profundidades [superficial (de 0-7 cm) y subsuperficial (de 8-12 cm)] según nivel de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] y de compactación [NC, sin descompactar (sd) y descompactado (d)], año (2008/09, 2009/10 y 2010/11) y sus interacciones.

Profundidad		Ds (g cm ⁻³)		RP (MPa)		Pa (%)		Dsr (%)	
		(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)
NF	A	1,33 b	1,4 b	1,90 b	2,23 b	18,6 a	12,5 a	87 b	92 b
	B	1,31 a	1,38 a	1,79 a	2,08 a	19,7 b	13,7 b	85 a	90 a
NC	d	1,28	1,34	1,42	1,68	21,28	15,78	84	88
	sd	1,36	1,44	2,27	2,66	17,16	10,53	89	94
Año	2008/09	1,29	1,37	1,72	2,06	20,60	14,10	84	90
	2009/10	1,33	1,40	1,90	2,24	18,50	17,30	87	92
	2010/11	1,33	1,39	1,93	2,21	18,40	13,00	87	91
Análisis de la varianza									
NF		0,0215	0,0093	0,0176	0,0181	0,0206	0,0064	0,0189	0,0093
NC		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Año		0,0005	0,0193	0,0007	0,0351	0,0004	0,0083	0,0008	0,0215
NF*NC		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC*Año		0,0001	0,0138	<0,0001	0,0325	<0,0001	0,0061	<0,0001	0,0156
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Valores P obtenidos según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns= diferencias no significativas ($P > 0,05$).

Tabla 1-7. Variables densidad aparente suelo (Ds, g cm⁻³), resistencia a la penetración (RP, MPa) y porosidad de aireación (Pa, %) a dos profundidades [superficial (de 0-7 cm) y subsuperficial (de 8-12cm)] según nivel de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] al inicio del ensayo C1: 2008-09.

Profundidad		Ds (g cm ⁻³)		RP (MPa)		Pa (%)	
		(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)
NF	A	1,31	1,39	1,78	2,20	19,8	13,3
	B	1,27	1,35	1,65	1,92	21,4	15,1

En las figuras siguientes se presentan la apertura de la interacción NC*Año o campaña para cada una de las variables de suelo estudiadas a dos profundidades superficial (0-7 cm) y subsuperficial (8-12 cm).

En la figura 1-7 se observan los valores promedios para la C1: 2008-09 de Ds superficial (A) y subsuperficial (B) de 1,21 y 1,31 g cm⁻³ para suelos d; mientras que, los sd presentaron valores de 1,36 y 1,44 g cm⁻³, con coeficientes de variación (CV) de Ds de 3 y 5 % para las profundidades de 0-7 y 8-12 cm, respectivamente, dichos valores se consideran bajos, siendo similares a los obtenidos por Imhoff *et al.* (2006). Por lo cual, si comparamos los tratamientos d y sd, el pasaje de paratill al inicio del ensayo C1 (2008-09) permitió

disminuir en un 11 % ($P < 0,05$) y en un 9 % ($P < 0,05$) la D_s superficial y subsuperficial respectivamente. El efecto residual de la descompactación se observó en la C2 (2009-10) donde la D_s estuvo un 5,1 y 4,8 % por debajo en suelos d con respecto a sd a nivel superficial y subsuperficial respectivamente, siendo estas diferencias significativas; en tanto que en la C3 (2010-11) sólo se observaron diferencias significativas en la D_s a nivel subsuperficial, siendo un 7,5% menor en los suelos d ($1,34 \text{ g cm}^{-3}$) con respecto a los sd ($1,45 \text{ g cm}^{-3}$).

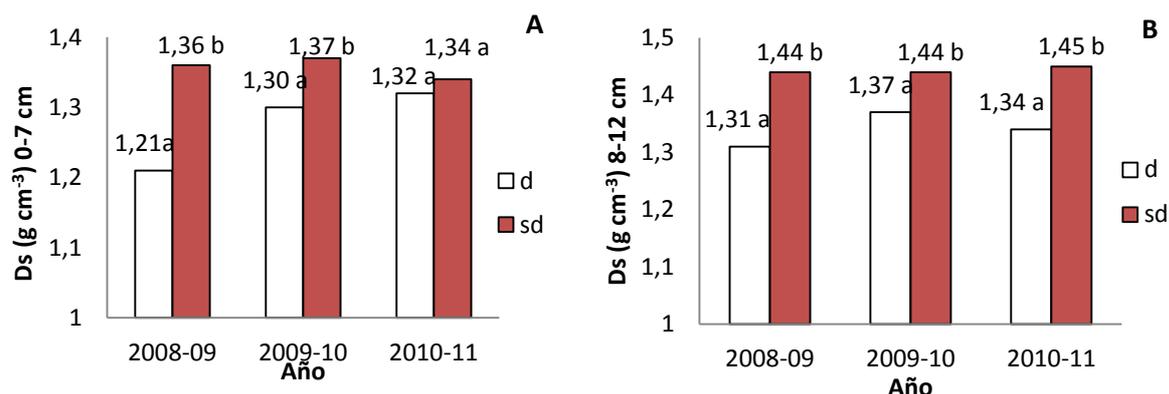


Figura 1-7. Densidad aparente del suelo (D_s , g cm^{-3}) a nivel superficial (de 0-7 cm) A y subsuperficial (8-12) B, para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción $NC \times \text{Año}$. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P < 0,05$.

El establecimiento de niveles críticos de D_s provee una herramienta útil para el monitoreo de la condición estructural del suelo. Según Daddow & Warrington (1983) la D_s crítica disminuye al aumentar el contenido de limo+arcilla del suelo, ya que la textura del suelo tiene un efecto importante sobre el tamaño medio de los poros. Suelos de textura más finas (limo y arcilla) tendrán diámetros de poros más pequeños y una mayor resistencia a la penetración de las raíces en una densidad aparente inferior a un suelo de textura más gruesa con mayor tamaño de poros.

Griffith *et al.* (1977) determinaron valores críticos de $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$ para suelos arenosos, y de $1,4$ a $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ para suelos franco-arcillo-limosos. Considerables investigaciones se han realizado a nivel nacional y mundial en relación a los efectos de la labranza sobre las propiedades físicas del suelo y su incidencia en el comportamiento de varios cultivos (Larson,

1964; Lal, 1979; Brown *et al.*, 1985; Baker, 1987; Derpsch *et al.*, 1991; Bravo, 1993; Marcano *et al.*, 1994).

Aunque algunas veces los resultados son contradictorios, muchos investigadores coinciden que en aquellos sistemas donde se perturba el suelo con labranza convencional se consiguen mejores propiedades físicas en la capa sometida a laboreo que en la mayoría de los sistemas conservacionistas (mayor macroporosidad y menor Ds).

En la figura 1-8 A y B se muestra el valor de RP superficial y subsuperficial para las distintas campañas de soja según el NC. En la C1: 2008-09, la RP fue superior en suelos sd (2,30 y 2,64 MPa) respecto a los d (1,12 y 1,47 MPa); por lo cual la RP disminuyó luego del pasaje del paratill en un 51 y 44 %, respectivamente con relación a los suelos sd. Sin embargo, el efecto de la labranza vertical y profunda sobre dichas variables suele ser transitorio; ya que, por ejemplo, por impacto de las gotas de lluvia, el suelo puede recompactarse y disminuir la macroporosidad, lo cual tiene una influencia muy fuerte sobre el comportamiento del agua del suelo (Adeoye, 1982; Lindstrom & Onstad, 1984).

En este ensayo se observó el efecto residual de la descompactación en las campañas siguientes con valores de RP menores del suelo con respecto a los tratamientos sd, tanto superficial y subsuperficial, en la C2: un 36 y 29 % y C3: un 25 y 39 % a un año y medio y dos años y medio del pasaje del paratill respectivamente, siendo estas diferencias significativas.

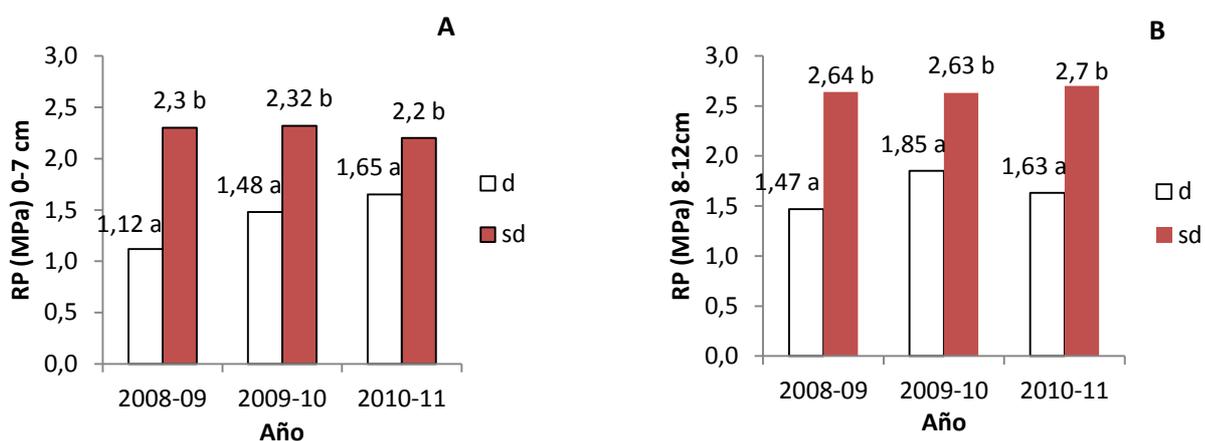


Figura 1-8. Resistencia a la penetración (RP, MPa) del suelo superficial (de 0-7 cm) (A) y subsuperficial (de 8-12 cm) (B) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)] según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)] Apertura de la interacción NC*Año. Letras distintas dentro de cada año marcan diferencias significativas $P < 0,05$.

Los valores de residualidad encontrados en la bibliografía son reportados por Vilche *et al.* (2004), poniendo de manifiesto la funcionalidad del escarificador después de un año y medio de haber sido efectuado. Busscher *et al.* (2000) comprobaron que los efectos del subsolado son de corta duración, solo para una estación de cultivo. Varsa *et al.*, 1997 observaron el incremento de la densidad de raíces de maíz y el aumento de rendimiento, en un suelo franco limoso. En estos suelos el efecto de descompactación se mantuvo por cuatro años sin enmiendas químicas adicionales.

La resistencia ofrecida por el suelo que causa limitaciones severas al crecimiento de las plantas varía con las especies. Al respecto, Threadgill (1982) concluye que valores superiores a 1,5 MPa comprometen o dificultan el normal desarrollo radicular y por encima de 2,5 MPa el crecimiento puede detenerse. Para soja, se considera que a 2,5 MPa la tasa de crecimiento radical es afectada (Materechera *et al.*, 1991). Considerando que la fuerza aplicada por las raíces varía sólo dentro de un rango limitado (Gill & Bolt, 1955; Misra *et al.*, 1988), la variabilidad interespecífica en la tolerancia a RP se relacionaría con el diámetro de las raíces y su interacción con la geometría de los poros del suelo.

Las raíces fibrosas, dado su reducido diámetro, serían más aptas para desarrollarse en suelos con alta resistencia a la penetración que las raíces pivotantes (Taylor & Ratliff, 1969). La resistencia a la penetración es más sensible que Ds en la detección de capas compactadas (Krüger, 1996), aunque la Ds resulta más estable al ser menos afectada por el contenido de humedad del suelo (Vepraskas, 1984).

En la Figura 1-9 A y B se observa la Pa para los tratamientos d y sd durante las tres campañas en la capa superficial (0-7cm) y sub-superficial (8-12 cm) del suelo. Los tratamientos d presentaron durante la C1: 2008-09 los mayores valores de Pa superficial (24,4%) con diferencias significativas respecto a los tratamientos sd (16,9%); éstas diferencias se mantuvieron durante la C2 en tanto que en la C3 no fueron significativas, sin llegar a valores limitantes para el normal crecimiento del cultivo (Figura 1-9 A).

En tanto que, la Pa sub-superficial (Figura 1-9 B) de los tratamientos sd fue un 39, 23 y 35 % menor con respecto a los d para las C1, C2 y C3 respectivamente con diferencias significativas, encontrándose por debajo de los valores críticos citados por Stirzaker *et al.* (1996) que consideró adecuado un valor de 13%. Más recientemente, Kay *et al.* (2006) e Imhoff *et al.* (2010b) indicaron que valores próximos o mayores a 15 % son necesarios para mantener el flujo de oxígeno en niveles óptimos para las raíces de especies sensibles, como es el caso de la soja.

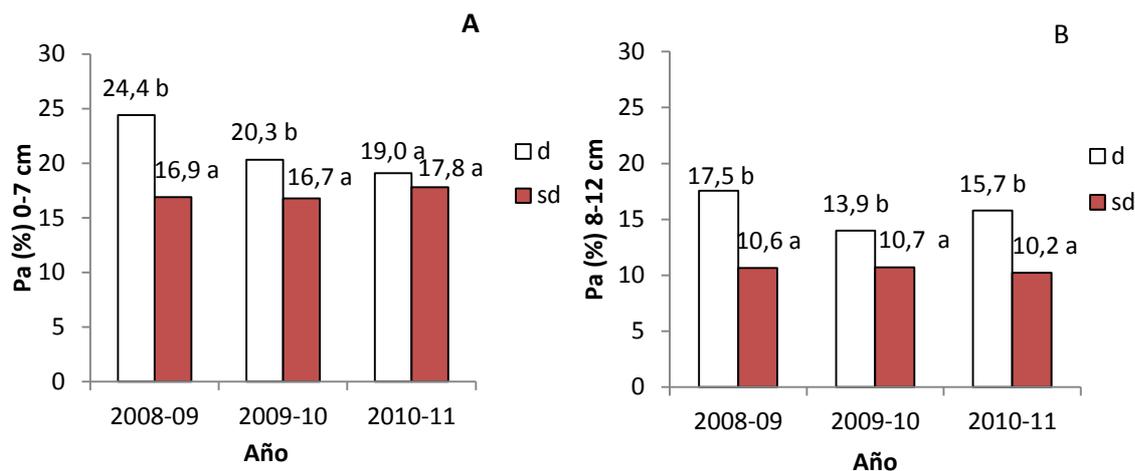


Figura 1-9. Porosidad de aireación (Pa, %) del suelo superficial (de 0-7 cm) (A) y subsuperficial (de 8-12 cm) (B) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)]. según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NC*Año. Letras distintas dentro de cada año marcan diferencias significativas $P < 0,05$.

El deterioro de la estructura edáfica se caracteriza, entre otros aspectos, porque aumenta la proporción de agregados muy pequeños y/o muy grandes, reduciéndose fundamentalmente la macroporosidad. Esto tiene consecuencias negativas directas al aumentar la resistencia mecánica del suelo (Pilatti *et al.*, 2006; Ghiberto *et al.*, 2007) disminuyendo la captación y circulación de agua y la disponibilidad de oxígeno. Valores menores a 10 % de aeración son limitantes para la mayoría de los cultivos (Da Silva *et al.*, 1994, 2004; He *et al.*, 1996), próximos a los valores obtenidos en los tratamientos sd subsuperficial (Figura 1-9 B).

Cuando la Dsr supera el valor de 90 %, valor considerado como crítico por Lipiec & Hatano (2003) el rendimiento de los cultivos puede verse afectado, en la figura 1-10 A se observan los valores de Dsr superficial no llegan a superar ese valor tanto en los tratamientos d y sd, en tanto que sub-superficialmente sd podría limitar el rendimiento al superar el valor crítico de 90% en las tres campañas (Figura 1-10 B).

El efecto residual de la descompactación se manifestó en mayor magnitud en la variable de suelo RP, medida en la última campaña soja C3: 2010-11 al cabo de dos años, siendo un 25 y 39 % menor con respecto a los tratamientos sd superficial y subsuperficial respectivamente. En tanto que la Ds, Pa y Dsr superficial la residualidad se mantuvo durante un menor plazo hasta la C2 (1 año), sin manifestarse diferencias significativas en la C3 con

respecto a los tratamientos sd, pero sí en la capa de suelo subsuperficial siendo 7,5 % y 7,3 % menor la Ds y Dsr y 35 % mayor la Pa medida en la C3 respectivamente.

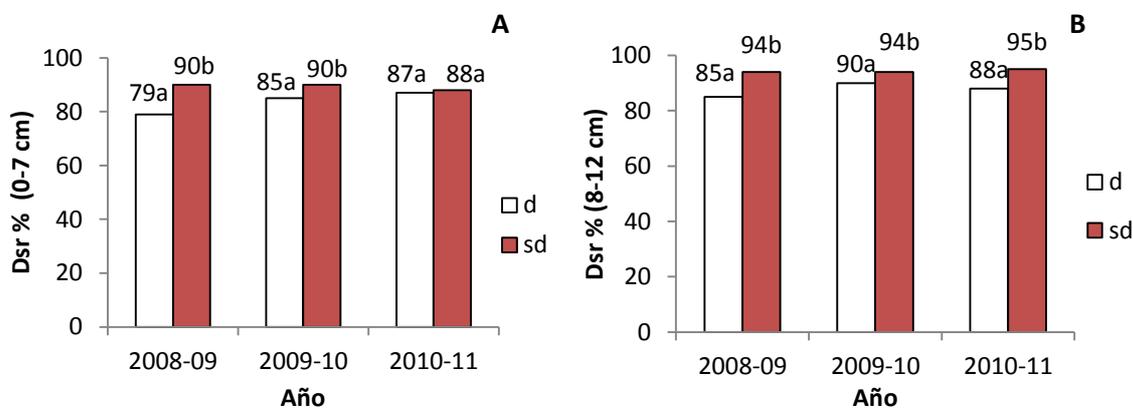


Figura 1-10. Densidad de suelo relativa (Dsr, %) superficial (de 0-7 cm) (A) y subsuperficial (de 8-12 cm) (B) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)]. según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NC*Año. Letras distintas dentro de cada año marcan diferencias significativas $P < 0,05$.

4- Intervalo hídrico óptimo (IHO) e índice de días de estrés (SWD)

El Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) es la fracción de agua edáfica fácilmente utilizable por los cultivos, durante la cual el suelo puede ser penetrado por las raíces sin mayor resistencia y la aeración no limita la respiración radical.

El IHO ha sido ampliamente utilizado con diferentes fines, por ejemplo para evaluar la calidad de suelos, el efecto de sistemas de manejo sobre una clase de suelos, para determinar qué propiedad física restringe la productividad de los cultivos, entre otros (Da Silva *et al.*, 1994; Benjamín *et al.*, 2003; Lapen *et al.*, 2004).

El IHO está conformado por un límite superior e inferior, el primero es θ_{CC} —agua retenida en capacidad de campo— si garantiza una aceptable capacidad de aire (θ_{Pa}); de lo contrario, el límite se alcanza cuando θ_{Pa} no restringe la respiración radical. El límite inferior queda determinado por la variable de mayor valor entre θ_{RP} (contenido hídrico edáfico por debajo del cual las raíces restringen su crecimiento), y θ_{PMP} (contenido hídrico en el punto de marchitez permanente).

En nuestro trabajo el área conformada por el IHO determinado a diferentes densidades al inicio del ensayo fue notoriamente superior en los tratamientos d respecto a los sd, a ambas

profundidades (Figura 1-11 y 1-12). La calidad física del suelo en ellos es diferente debido a que la θ_{Pa} y la θ_{RP} del suelo actúan como limitantes a valores de D_s diferentes.

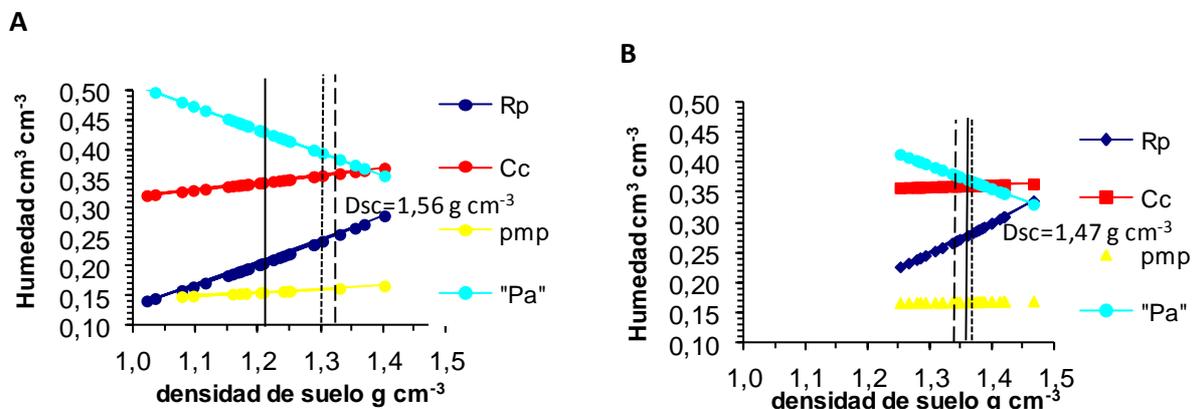


Figura 1-11. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (D_s) para θ críticos de porosidad de aeración (Pa), capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en suelos descompactados (A) y sin descompactar (B) superficialmente (0-7cm). D_{sc} = D_s crítica [IHO (intervalo hídrico óptimo) = 0]. Las líneas indican la D_s medida antes de la siembra de soja en las distintas campañas (línea continua C1: 2008/09, línea puntos C2: 2009/10 y línea discontinua C3: 2010/11).

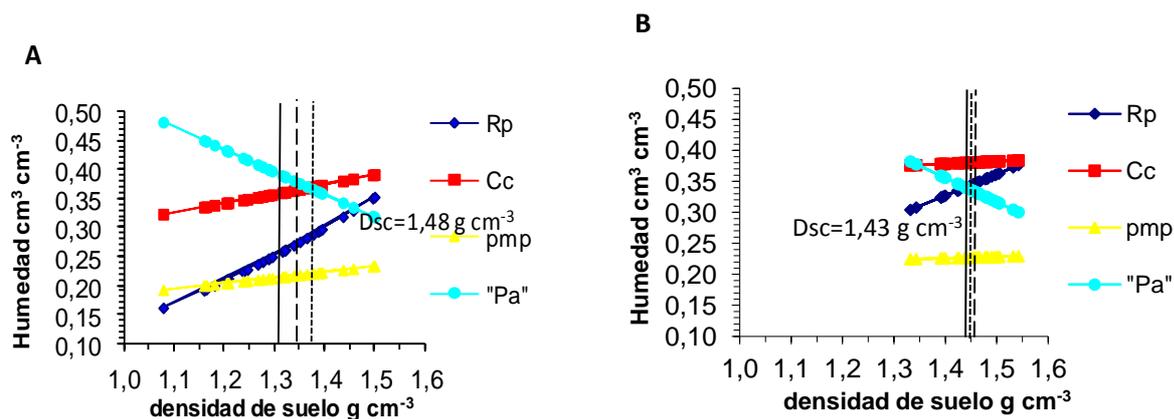


Figura 1-12. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) con la densidad de suelo (D_s) para θ críticos de porosidad de aereación (Pa), capacidad de campo (CC), resistencia del suelo a la penetración (RP) y punto de marchitez permanente (PMP) en suelos descompactados (A) y sin descompactar (B) subsuperficialmente (8-13 cm). D_{sc} = D_s

crítica [IHO (intervalo hídrico óptimo)= 0]. Las líneas indican la D_s medida antes de la siembra de soja en las distintas campañas (línea continua C1:2008/09, línea puntos C2: 2009/10 y línea discontinua C3: 2010/11).

La mejor calidad física de suelo se observa superficialmente (0-7cm) en los suelos d, donde la θ_{Pa} limita (es decir que comienza a reducir el intervalo correspondiente al agua disponible) a un valor de $D_s = 1,37 \text{ g cm}^{-3}$ y la θ_{RP} a una $D_s = 1,08 \text{ g cm}^{-3}$, siendo la D_{sc} (donde el IHO= 0) de $1,56 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 1-13 A). En los tratamientos sd la θ_{Pa} comienza a limitar a una $D_s = 1,37 \text{ g cm}^{-3}$ igual a d, mientras que la θ_{RP} limita en todo el rango de D_s siendo el valor de D_{sc} menor que en d = $1,47 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 1-13 B). En ninguna de las tres campañas la D_s medida antes de la siembra de soja señalada con líneas verticales en la figura superó los valores de D_{sc} determinados.

En la zona subsuperficial (8-13cm) de los suelos d la θ_{Pa} limita a una $D_s = 1,35 \text{ g cm}^{-3}$ y la θ_{RP} comienza a restringir al IHO desde una $D_s = 1,18 \text{ g cm}^{-3}$, siendo la $D_{sc} = 1,48 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 1-14 A), en tanto que en sd la θ_{Pa} comienza a limitar a una $D_s = 1,34 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que la θ_{RP} limita en todo el rango de D_s siendo el valor de $D_{sc} = 1,43 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 1-14 B), en esta situación la D_s medida antes de la siembra de soja fue igual o superior a la D_{sc} en las tres campañas.

Valores de D_s mayores o iguales a la D_{sc} ocurren cuando el suelo presenta condiciones severas de degradación estructural (Benjamín *et al.*, 2003; Leão *et al.*, 2006; Reichert *et al.*, 2009), aunque es difícil de predecir el impacto de la D_s debido a que el crecimiento de las plantas es un proceso dinámico en el que ocurren diferentes adaptaciones morfológicas y fisiológicas cuando el ambiente se torna estresante. Sin embargo, los autores coincidieron en señalar que, en última instancia, generalmente se verificó disminución de la productividad (Da Silva & Kay, 1997a; Benjamín *et al.*, 2003; Da Silva & Kay, 2004; Wheaton *et al.*, 2008).

El aumento de D_s ocasionó incremento en θ_{RP} y disminución de θ_{Pa} en suelos d y sd, pero no afectó a θ_{CC} y θ_{PMP} en los suelos sd. Resultados similares encontraron Zou *et al.* (2001) e Imhoff *et al.* (2006) para suelos de textura similar. El límite inferior del IHO en todos los casos en los suelos sd y en la mayoría de los d fue θ_{RP} . Dicha situación indicaría que el crecimiento del cultivo sería afectado por la elevada RP del suelo antes de que su contenido hídrico llegue al PMP.

La relación positiva entre RP y D_s se explica porque la compactación del suelo incrementa el contacto entre las partículas y, por lo tanto, la fricción que se produce entre

ellas, y, entre las partículas y la raíz cuando éstas tratan de deformar la matriz del suelo para penetrarlo (Vepraskas, 1984). Por otro lado, la RP decrece con el incremento de la humedad del suelo debido a que la película de agua que envuelve las partículas facilita su movimiento (Camp & Gill, 1969). En suelos muy duros, la absorción de agua y nutrientes puede convertirse en limitante a causa de la dificultad que las raíces tienen para penetrar en el suelo (Stirzaker *et al.*, 1996; Brown *et al.*, 2006; Bengough *et al.*, 2011). Con respecto a θ Pa, reemplazó a θ CC como límite superior del IHO en suelos d y sd, superficial o subsuperficial, a partir de D_s mayores de 1,37 o 1,35 y 1,34 g cm⁻³. Estos datos indicaron que la falta de aire puede, comprometer el normal intercambio gaseoso suelo-atmósfera resultando perjudicial para el sistema radical, especialmente en suelos sd a mayor profundidad.

El comportamiento de RP con respecto a D_s y θ concuerda con lo reportado por varios autores (Da Silva *et al.*, 1994; Tormena *et al.*, 1999; Imhoff *et al.*, 2000; Leão *et al.*, 2006). El modelo ajustado (ecuación 3) explicó 88% y 80% de la variabilidad de los datos de RP para suelos d y sd (Tabla 1-8).

En la Tabla 1-9 se observa los valores críticos de contenido hídrico del suelo θ para RP, CC, PMP, Pa e IHO según la densidad aparente del suelo (D_s) al inicio de cada campaña de soja, correspondientes a las figuras analizadas anteriormente (Figuras 1-13 y 14 A y B). El θ IHO fue mayor en los suelos d respecto a los sd en la capa de suelo superficial y subsuperficial en un 46 y 90 % en C1; 18 y 88% en C2 y 18 y 100% en C3 respectivamente.

Tabla 1-8. Parámetros de ajuste de la curva de resistencia a la penetración para suelos descompactados (d) y sin descompactar (sd) para la profundidad superficial (0-7 cm) y subsuperficial (8-13 cm). $RP = a * \theta^b * D_s^c$ (3).

Parámetros	d	sd	d	sd
	Sup.(0-7 cm)		Sub-sup.(8-13 cm)	
a	0,0156	0,2274	0,0212	0,0303
b	-2,5269	-1,1692	-2,3844	-2,7443
c	5,6700	2,9330	5,6382	3,9934
r ²	0,88	0,80	0,84	0,88

El contenido hídrico del suelo para mantener una $RP = 2,5$ MPa (θ RP) -por encima de la cual se restringe el crecimiento radical-, fue mayor en los suelos sd con respecto a los d y aumentó con la D_s . El indicador IHO permitió establecer que existen dos condiciones físicas de suelo, un ambiente de mejor calidad física, constituido por los suelos d y, el otro de inferior calidad física conformado por los tratamientos sd.

Tabla 1-9. Contenido hídrico crítico del suelo (θ) $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ [para RP (2,5 MPa)= resistencia a la penetración, CC (0,01 MPa)= capacidad de campo, PMP(1,5 MPa)= punto de marchitez permanente, Pa (10%)= porosidad de aireación] e intervalo hídrico óptimo (IHO) según densidad del suelo (Ds) al inicio de cada campaña de soja (C1:2008/09; C2:2009/10 y C3:2010/11) según el nivel de compactación (NC) descompactados y sin descompactar, superficial (0-7 cm) y subsuperficial (8-13 cm).

Campaña	C1: 2008/09				C2: 2009/10				C3: 2010/11			
	Profundidad (0-7 cm)		(8-13cm)		(0-7 cm)		(8-13cm)		(0-7 cm)		(8-13cm)	
NC	d	sd	d	sd	d	sd	d	sd	d	sd	d	sd
Ds	1,21	1,36	1,31	1,44	1,30	1,37	1,37	1,44	1,32	1,34	1,34	1,45
θ RP	0,19	0,28	0,26	0,34	0,24	0,27	0,27	0,34	0,25	0,27	0,27	0,35
θ CC	0,34	0,36	0,36	0,38	0,36	0,36	0,36	0,38	0,36	0,37	0,37	0,38
θ PMP	0,15	0,22	0,22	0,23	0,16	0,16	0,16	0,23	0,16	0,22	0,22	0,22
θ Pa	0,45	0,37	0,39	0,34	0,39	0,37	0,37	0,34	0,38	0,38	0,38	0,33
θ IHO	0,15	0,08	0,10	0,01	0,11	0,09	0,09	0,01	0,11	0,09	0,09	0,00

Da Silva & Kay (1997a) estimaron la frecuencia de permanencia del contenido de agua del suelo fuera del IHO y concluyeron que el crecimiento del cultivo de maíz fue menos restringido cuando el θ del suelo estuvo dentro de los límites del IHO medido de 0 - 20 cm de profundidad en distintas texturas y densidades de suelo. Específicamente, el crecimiento de la parte aérea de las plantas fue correlacionado negativamente con la frecuencia con que el agua en el suelo permaneció fuera del intervalo. Da Silva & Kay (1996) también demostraron que los cultivos que crecen en suelos con IHO estrechos son más vulnerables a las sequías y precipitaciones elevadas que aquellos que crecen en suelos con IHO más amplios.

En este trabajo, en suelos sd el IHO tuvo menor amplitud que en d, como se mostró anteriormente, aumentando así la probabilidad de ocurrencia de situaciones de estrés. Con base en el IHO y en la dinámica hídrica del período en que se desarrollaron los cultivos, se determinó para la profundidad de suelo de 20 cm el WSD. El valor resultó mayor en las parcelas Asd y Bsd con respecto a las Ad y Bd (|-72,2| y |-72,6| vs. |-23,3| y |-20,3|) como promedio de las tres campañas. Valores absolutos mayores de WSD indican períodos de mayor estrés por encontrarse el contenido hídrico del suelo fuera de los límites del IHO. Su relación con el rendimiento será analizado dentro del tema siguiente (ver sección 5 “Variables ecofisiológicas del cultivo”).

5- Variables ecofisiológicas del cultivo

5-1. Caracterización del crecimiento

a) Índice de área foliar (IAF), porcentaje de radiación interceptada (%RI) y biomasa total

Los métodos de análisis del crecimiento son herramientas útiles para describir la respuesta de las plantas a variaciones en el ambiente (Hunt, 1982), principalmente en las etapas más críticas del cultivo donde se define el rendimiento, durante la fructificación e inicio del crecimiento de los granos de soja (Jiang & Egli, 1995; Egli, 1997).

En la tabla 1-10 se presenta el análisis de la varianza de las variables de cultivo IAF, %RI y Biomasa total en los estados fenológicos R1, R4, R6 y R8, en este último solamente para biomasa. No hubo interacción entre los factores de tratamiento (NF, NC y Año) en la variable IAF, biomasa total en R1 y R8, %RI en R4 y R6, por lo tanto se analizaron los efectos puros de cada factor; en tanto que el % RI en R1 y biomasa total en R4 y R6 se determinó interacción entre NF*Año ($P < 0.0001$, $P 0.0365$ y $P 0.0301$) respectivamente, analizándose los efectos conjuntos de NF y Año.

Tabla 1-10: Análisis de la varianza del índice de área foliar (IAF), porcentaje de radiación interceptada (% RI) y biomasa total ($g m^{-2}$); en diferentes estados fenológicos del cultivo de soja (R1= inicio de floración; R4= plena fructificación; R6= máximo tamaño de semilla; R8=plena madurez) según nivel de fertilización (NF), de compactación (NC), año y sus interacciones.

		IAF			%RI			Biomasa total			
		R1	R4	R6	R1	R4	R6	R1	R4	R6	R8
NF	A	3,5 b	5,1 a	3,2 a	84,3	92,5 a	75,06 b	463,8 b	665,5	915,7	872,3 a
	B	3,0 a	5,4 a	3,1 a	75,9	91,5 a	71,2 a	425,7 a	623,9	837,6	842,8 a
NC	d	3,2 a	5,4 a	3,4 b	81,9 b	94,7 b	75,18 b	468,6 b	651,3	926,8 b	922,4 b
	sd	3,2 a	5,0 a	2,9 a	78,3 a	89,2 a	71,1 a	420,8 a	638,1	826,5 a	792,6 a
Año	2008/09	2,5 a	2,7 a	2,1 a	68,6	82,08 a	60,7 a	283,4 a	484,3	716,5	612,2 a
	2009/10	3,3 b	7,5 c	4,6 c	91,1	97,8 b	85,3 c	557,6 c	781,2	1070,9	1195 c
	2010/11	3,9 c	5,5 b	2,7 b	80,7	96,1 b	73,4 b	493,2 b	668,5	842,5	765,5 b
Análisis de la varianza											
NF		0,0393	ns	ns	<0,0001	ns	<0,0001	0,0334	0,023	0,0009	ns
NC		ns	ns	0,018	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	ns	0,0001	0,0045
Año		<0,0001	<0,0001	0,0001	0,0012	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
NF*NC		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		ns	ns	ns	<0,0001	ns	ns	ns	0,0365	0,0301	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$).

Al inicio de la floración (R1) el IAF fue un 17 % superior en el NF A con respecto a B y según el NC el IAF en R6 fue un 17 % superior en el nivel d con respecto a sd ($P<0,05$). En la C1 se alcanzaron los menores valores de IAF en R1, R4 y R6 con respecto a las C2 y C3, por debajo del rango de valores críticos (para interceptar el 95 % de la RFAinc) establecidos para soja de aproximadamente 3 a 4,5 (Kantolic *et al.*, 2004). En la C2 el IAF fue superior en R4 y R6 un 177% y 120% y un 26% y 70% con respecto a las campañas C1 y C3 respectivamente con diferencias significativas.

El %RI en R1, R4 y R6 fue superior en un 4,6%, 6,1% y 5,6% en el nivel d con respecto a sd respectivamente ($P<0,05$). En la C1 2008/09 el %RI en R 4 y R6 fue menor con respecto a las C2 y C3 ($P<0,05$), en tanto que en la C2 2009/10 el %RI en R6 fue un 40% y 16% superior a las C1 y C3 respectivamente.

Si analizamos la B total en R1 ésta fue un 9% y 11% superior en el nivel de fertilización A y compactación d, con respecto a B y sd ($P<0,05$), resultando en la C2 un 96% y 13% superior la producción de biomasa respecto a las C1 y C3, respectivamente (Tabla 1-9). Esta mayor producción de biomasa en R1 para la dosis más alta de P (NF A) se podría explicar debido a que el cultivo alcanzó antes una mayor tasa de absorción de P respecto a la dosis baja (NF B), debido a la mayor concentración de P permitiendo una mayor llegada de este nutriente a la raíz por difusión (Barber, 1984).

Con respecto a la radiación interceptada del análisis de la interacción NF*Año (Figura 1-13) las diferencias fueron significativas para el %RI en R1, a favor del NF A con respecto a B en un 4,5% y 26% durante las C2 y C3 respectivamente.

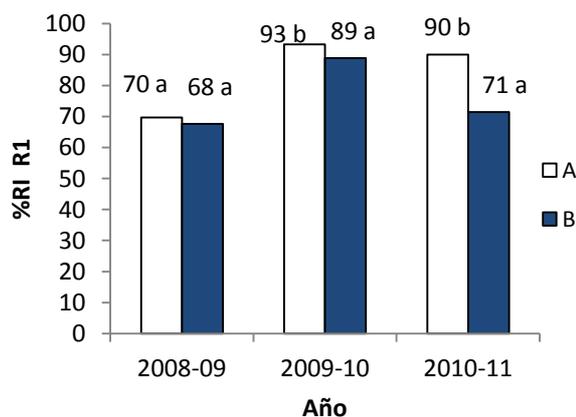


Figura 1-13: Porcentaje de radiación interceptada (%RI) en el estado fenológico R1 (inicio de floración) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de fertilización NF [alta (A) y baja (B)]. Apertura de la interacción NF*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P\leq 0,05$.

En la C2 la B total en los estados fenológicos R4 y R6 (Figuras 1-14 y 1-15) fue un 14 y 16% superior en el nivel de alta fertilización con respecto a B respectivamente ($P < 0,05$), respuesta que no se observó en las campañas C1 y C3. En cuanto a la producción de B total en R8 se observa que en suelos d se logró un 16,4% más de B total, con respecto a los sd; estos datos concuerdan con lo hallados por Alzugaray *et al.* (2008) para un cultivo de maíz, donde encontraron diferencias positivas a favor de la producción de MS aérea en suelos d en relación a sd.

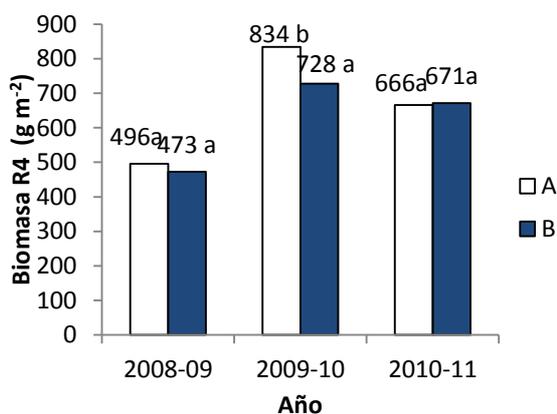


Figura 1-14: Biomasa total ($g\ m^{-2}$) en el estado fenológico R4 (plena fructificación) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de fertilización NF [alta (A) y baja (B)]. Apertura de la interacción NF*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$.

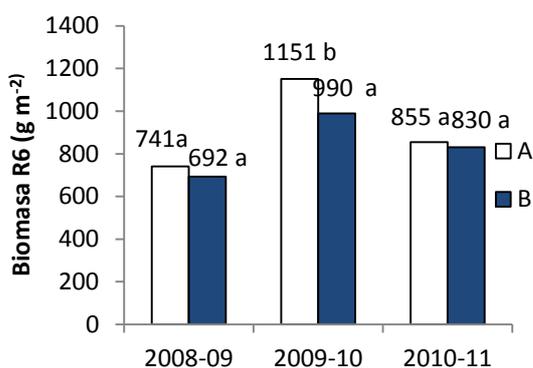


Figura 1-15: Biomasa total ($g\ m^{-2}$) en el estado fenológico R6 (máximo tamaño de semillas) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de fertilización NF [alta (A) y baja (B)]. Apertura de la interacción NF*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$.

La producción de biomasa en R8 fue diferente entre campañas, C2 95% y C3 25% superior con respecto a C1 ($P < 0,05$) (Tabla 1-10), sin presentarse interacción entre NF*Año, donde en la C2 se venían obteniendo mayores producciones de biomasa en R4 y R6 en el NF A como se mencionó, ya que los tratamientos con baja fertilización en esta última etapa de R6 a R8 acumularon más biomasa debido probablemente a un mayor contenido de agua en el suelo como se observa en la figura 1-5.

b) *Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y duración del área foliar (DAF)*

En la Tabla 1-11 se presenta el análisis de la varianza de la TCC (en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y la DAF ($\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$) para el estadio fenológico R4-R6. No hubo interacción entre los factores de tratamiento (NF, NC y Año) en la variable DAF, pero en la TCC se determinó interacción entre NC*Año y NC*NF ($P \leq 0.0271$ y $P \leq 0.0278$), respectivamente. Por lo tanto, se analizaron los efectos principales de cada factor en DAF y los efectos conjuntos de NC, NF y Año en TCC.

La DAF durante R4-R6 fue un 11% superior en el nivel de compactación d con respecto a los sd ($P \leq 0.0092$). En la C2 la DAF fue un 99% y 28 % superior con respecto a las campañas C1 y C3, respectivamente. Dicha situación permitió determinar una mayor duración de los niveles máximos de intercepción de la radiación, contrastando con la baja intercepción en C1 y la marcada caída al final de la etapa de llenado en C3.

Tabla 1-11. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y duración del área foliar (DAF, $\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$) en el período de crecimiento R4-R6 de soja, según los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] y de compactación [NC, sin descompactar (sd) y descompactado (d)], año y sus interacciones. Análisis de varianza.

Período de crecimiento R4-R6			
		TCC	DAF
NF	A	8,0	129,8 a
	B	6,8	127,3 a
NC	d	8,7	135,7 b
	sd	6,0	121,4 a
Año	2008/09	6,4	84,8 a
	2009/10	10,3	168,9 c
	2010/11	5,4	131,9 b
Análisis de la varianza			
NF		0,0217	ns
NC		<0,0001	0,0092
Año		<0,0001	<0,0001
NF*NC		0,0278	ns
NF*Año		ns	ns
NC*Año		0,0271	ns
NF*NC*Año		ns	ns

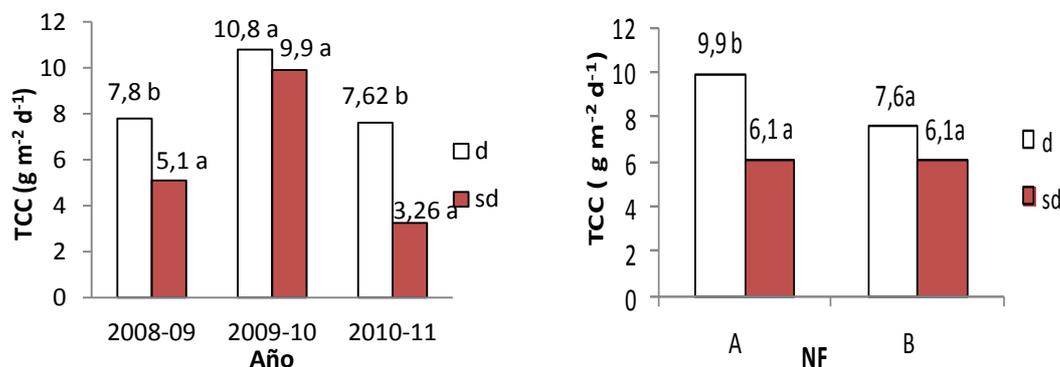
Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$).

En la figura 1-16 se presenta la TCC (R4-R6) para las distintas campañas según NC. Las mayores tasas de crecimiento durante este período permitirían disponer de un mayor establecimiento de granos y, por lo tanto, un mayor Rdto de grano.

En la C1: 2008/09 debido a las condiciones climáticas secas durante la mayor parte del ciclo del cultivo, las TCC estuvieron por debajo de los valores alcanzables en años normales, donde el nivel d presentó una TCC 53% mayor con respecto al nivel sd. Según Shibles & Weber (1965, 1966) la TCC está estrechamente relacionada con la interceptación de radiación, alcanzando su máximo valor cuando el canopeo es capaz de interceptar el 95% de la radiación incidente (Gardner *et al.*, 1985b). Algunos autores, como Board & Harville (1994), sugirieron tasas de hasta $15 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ entre R2-R5 para lograr rendimientos superiores a 4000 kg ha^{-1} .

En la C2: 2009/10 los niveles d y sd presentaron las mayores tasas absolutas ($10,8$ y $9,9 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ respectivamente) sin diferencias significativas ($P > 0,05$). En la C3 el nivel d presentó una TCC 133% mayor con respecto al nivel sd siendo estas diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Esto se debió a las condiciones de deficiencia de agua registradas en este período, donde los suelos sd presentaron menor contenido hídrico en todo el perfil del suelo (0-1,6 m), manifestando el cultivo una abrupta pérdida de AF, menor %IR y, por lo tanto, menores TCC.

En la figura 1-17 se presenta el efecto de los tratamientos (NF*NC). Para el NF A la TCC fue un 62% superior en d respecto a sd, en tanto que, para el NF B no presentó diferencias significativas según NC (d vs sd).



*Figura 1-16: Tasa de crecimiento del cultivo en el período de crecimiento (R4-R6) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NC*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$.*

*Figura 1-17: Tasa de crecimiento del cultivo en el período de crecimiento (R4-R6) para los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] según nivel de compactación [NC, descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NF*NC. Letras distintas dentro de cada NF indican diferencias significativas $P \leq 0,05$.*

c) Rendimiento (Rdto.), componentes del Rdto. e índice de cosecha (IC)

Para Rdto. y P1000 hubo interacción entre NC*Año, sin diferencias significativas según NF. Las variables $N^{\circ} G m^{-2}$, $N^{\circ} V m^{-2}$ y $N^{\circ} pl m^{-2}$ e IC (%) no presentaron interacciones, por lo cual se analizaron los efectos principales de los factores NC, NF y entre los diferentes años (Tabla 1-12).

El rendimiento logrado en C1 fue un 29% superior $-53,8 g m^{-2}$ en los suelos d con respecto a los sd, en tanto que en C3 esta diferencia debida al efecto residual de la descompactación fue del 22% $-43,7 g m^{-2}$ (Figura 1-20).

Tabla 1-12. Análisis de la varianza para Rendimiento (Rdto) y sus componentes [$N^{\circ} pl m^{-2}$ = número de plantas m^{-2} ; $N^{\circ} V m^{-2}$ = número de vainas m^{-2} ; $N^{\circ} G m^{-2}$ = número de granos m^{-2} ; P1000= peso de mil granos] e índice de cosecha (IC%) según los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] y de compactación [NC, sin descompactar (sd) y descompactado (d)], años 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010-11 (C3) y sus interacciones.

Componentes del Rendimiento Soja (cv RA 725)

		N° pl m ⁻²	N° V m ⁻²	N° G m ⁻²	P1000 (g)	Rdto (g m ⁻²)	IC %
NF	A	22,7 a	1841,2 a	2520,9 a	109,9 a	296,2 a	34 a
	B	21,4 a	1722,2 a	2636,1 a	109,2 a	282,0 a	34 a
NC	d	21,7 a	1829,8 a	2689,7 b	111,5	304,6	34 a
	sd	22,5 a	1741,5 a	2467,7 a	107,6	273,6	34 a
Año	2008/09	24,1 b	1567,3 a	2014,1 a	105,9	213,5	35 b
	2009/10	21,2 a	2399,3 b	3385,1 c	130,1	438,5	37 b
	2010/11	20,5 a	1377,8 a	2336,4 b	92,7	215,3	29 a
Análisis de la varianza							
NF		ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC		ns	ns	0,0496	ns	0,0078	ns
Año		0,0019	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0019
NF*NC		ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC*Año		ns	ns	ns	0,0487	0,0458	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$); diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

Estos datos concuerdan con los hallados por Martino (1998); Bonel *et al.* (2005); Bonel & Montico (2007) y Mon (2007), quienes argumentaron un aumento del rendimiento debido a la descompactación profunda dada por el paratill. Terminiello *et al.* (2007) determinaron sobre un suelo franco limoso que el pasaje de un descompactador mejoró el Rdto de un cultivo de soja en un 16,3% conducido en SD, en condiciones de alta impedancia del suelo.

Busscher *et al.* (2006) también informaron incrementos de Rdto en soja de 36 g m⁻² para tratamientos d en relación a los sd en suelos franco-arenosos, donde la labranza fue más dominante que el tipo de suelo. Para otros cultivos también se encontraron respuestas en el Rdto. a la descompactación del suelo, Feldamn & Domier (1970) para maíz del 10-20%, Botta *et al.* (2006) para girasol del 13-24%. Álvarez *et al.* (2009) encontraron que en suelos franco-limosos la descompactación aumentó el rendimiento de maíz en un 5,5%, logrando efectos positivos de corto plazo sobre la resistencia a la penetración, sin efecto residual sobre el rendimiento de los cultivos subsiguientes, por otra parte Mon (2007) evidencia que los tratamientos de subsolado en dos series de suelo con elevado contenido de limo, aún después de tres años de aplicados presentan incrementos productivos importantes.

En la C2 no se observaron respuestas en Rdto. al efecto residual de la descompactación realizada en C1 (Figura 1-18). Sadras *et al.* (2005) concluyeron que los beneficios sobre el Rdto se esperan que sean menores en estaciones extremadamente secas o extremadamente húmedas y, cuando el suelo por debajo de la zona de compactación esté seco. Barber & Díaz (1992) informaron una relación inversa entre la respuesta de soja a suelos d y lluvias estacionales por encima de 760 mm. La verdadera respuesta al NC dependió de las condiciones estacionales, cantidad inicial y distribución de agua en el perfil del suelo, que permitieron mantener el suelo húmedo disminuyendo la RP, debido a que estas variables están inversamente relacionadas.

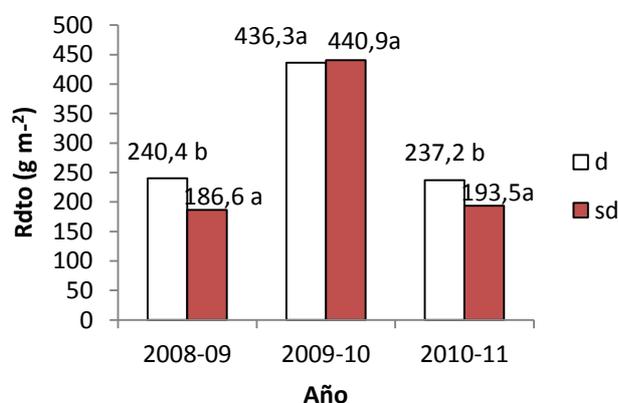


Figura 1-18: Rendimiento (Rdto. g m⁻²) para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NC*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$, según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

No se observó diferencia en Rdto según el nivel de fertilización con fósforo ($P > 0,05$) (Tabla 1-12), por lo cual éstos resultados sugieren que la compactación del suelo fue más importante como factor limitante del Rdto que la fertilidad fosfórica del mismo.

Por otra parte los niveles de respuesta en rendimiento a la fertilización con P dependen del nivel inicial de P en el suelo, en este ensayo entre 7,3 a 8,3 mg kg⁻¹, y las dosis aplicadas, de 12 a 14 kg P ha⁻¹ en baja y 26 kg P ha⁻¹ en alta fertilización suficiente para sostener el nivel de producción del cultivo en las distintas campañas. Máximas respuestas en rendimiento del cultivo de soja se observaron con la aplicación de dosis de P entre 5 a 7 kg P ha⁻¹ en suelos con niveles por debajo de 12 mg kg⁻¹ de P (Salvagiotti *et al.*, 2013).

No se observó el efecto de los tratamientos (NF*NC, $P > 0,05$) sobre el Rdto., por lo cual la falta de respuesta significativa a la fertilización con P fue independiente del nivel de compactación del suelo. Esto difiere de lo reportado por otros autores, como Beutler & Centurion (2004), que encontraron que la fertilización con P incrementó el rendimiento de soja comparado con un testigo sin fertilizar para un mismo nivel de compactación, debido a una asociación entre la acción del fertilizante fosforado y la disponibilidad del nutriente para la planta facilitando la absorción por raíces más cortas.

Si bien el IAF, biomasa total y %RI en R1 fue mayor en el nivel de alta fertilización y la TCC R4-R6 fue superior para el tratamiento Ad, esto no se tradujo en un mayor rendimiento, debido principalmente a las condiciones de sequía durante la C1 y al estrés terminal en C3 que afectó el número y peso de los granos.

El número de granos m^{-2} ($N^{\circ}gr m^{-2}$) difirió significativamente según los años o campañas. En la C2 este componente fue un 68% y 45% mayor a las C1 y C3, respectivamente. El efecto residual de la descompactación se manifestó logrando un 9% más de granos que los suelos sd, sin presentar diferencias según el NF.

El P1000 no mostró diferencias según el NC en C1 y C2, pero sí en C3, siendo un 16% inferior en los suelos sd con respecto a d (Figura 1-19). Esto se atribuye al estrés hídrico ocurrido durante el estado de llenado de grano (cuando el número de granos ya se ha fijado), que acortó la duración de esta fase al acelerar la senescencia foliar y la madurez fisiológica (Tabla 1-2) reduciendo el peso de los granos y el Rdto. Este hecho se relaciona con la caída de la TCC R4-R6 en sd (Figura 1-17).

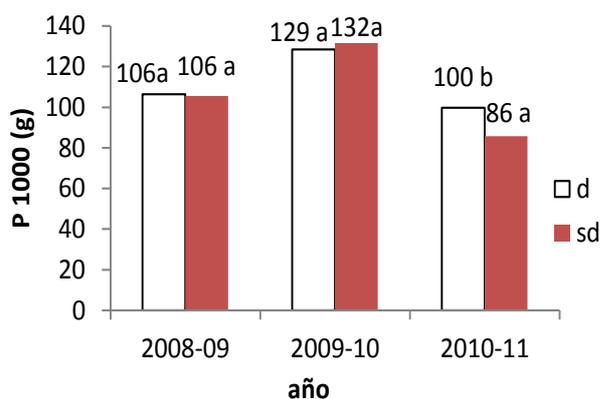


Figura 1-19: Peso de mil granos (gramos) [P1000 (g)] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NC*Año. Letras

distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

5.2- Índice de días de estrés (WSD) y crecimiento radical del cultivo de soja

Según Benjamin *et al.* (2003) conocer la dinámica hídrica en el suelo y algunas propiedades físicas de los suelos permite mejorar la predicción del Rdto. de los cultivos o explicar los rendimientos obtenidos con distintas prácticas de manejo. Este autor demostró que la correlación de Rdto. de maíz con el índice de días de estrés (WSD) fue mayor que con Ds o IHO.

A través de un análisis de regresión los menores rendimientos se asociaron de manera lineal a los mayores índices de estrés y a los tratamientos sd en las C1 ($R^2 = 0,95$) y C3 ($R^2 = 0,93$); en tanto que, los d mostraron menores índices de estrés.

La C2, caracterizada como año húmedo, presentó los mayores rendimientos y baja relación con el WSD ($R^2 = 0,27$), para un rango de estrés similar con respecto a los tratamientos d de las C1 y C3, esto se debe a que el índice se determinó para evaluar cambios en el agua del suelo en sólo los primeros 20 cm de profundidad.

Para las tres campañas en su conjunto el valor de R^2 fue de 0,53, indicando que aproximadamente la mitad de la variabilidad del rendimiento es explicado por el índice de estrés (Figura 1-20). Por los resultados de este estudio, el WSD fue eficiente para evaluar cambios debido a diferentes prácticas de manejo, ocurrido durante la estación de crecimiento del cultivo de soja que afectaron el Rdto.

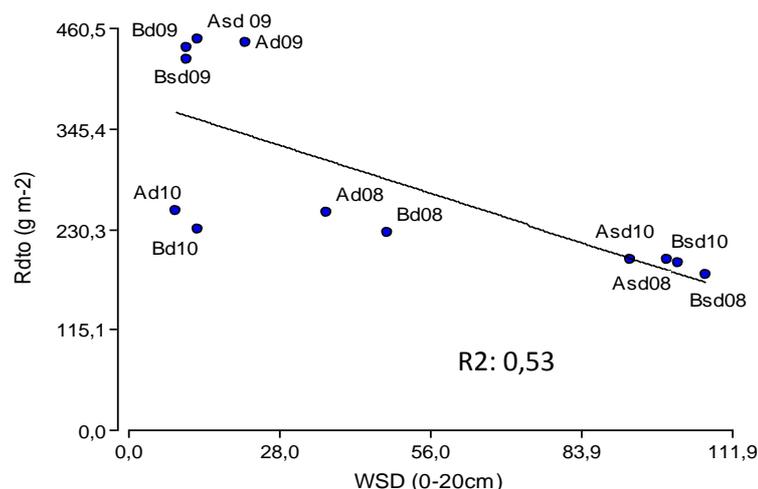


Figura 1-20. Rendimiento (Rdto) en función del índice de días de estrés hídrico (WSD) para las campañas de soja C1:2008/09 (08), C2:2009/10 (09) y C3:2010/11 (10) para los tratamientos [Ad (alta fertilización descompactado), Asd (alta fertilización sin

descompactar), *Bd* (*baja fertilización descompactado*) y *Bsd* (*baja fertilización sin descompactar*)].

La diferencia en rendimiento según el NC (d vs sd) podría deberse a una menor exploración radicular por parte del cultivo, generado por la mayor resistencia mecánica del suelo. De la medición de la densidad de raíces en la C1 en los primeros 0-7 y 8-15 cm de suelo en el surco y entresurco del cultivo de soja en los estados fenológicos V3, R3 y R6 se obtuvieron menores densidades de raíces con diferencias significativas en el NC sd subsuperficial (8-15 cm) medidas en el surco (S) (Tabla 1-13), sin diferencias a nivel superficial (0-7cm). Los datos y análisis estadísticos para la profundidad (0-7 cm) no se presentan en esta tesis.

Dicha situación podría haber determinado una reducción en la captación de nutrientes, sobre todos en aquellos de menor movilidad edáfica, como el P. Los suelos con mayor compactación son menos productivos, debido a la reducción de la aireación para el buen crecimiento de las raíces y la absorción de nutrientes, para lograr el máximo Rdto. del cultivo (Gil *et al.*, 1993). La reducción del Rdto del cultivo en suelos compactados es consecuencia de una menor tasa de elongación celular y del aumento del número de células, incrementando así el diámetro de la raíz de la planta (Benghough & Mullins, 1990). Esta reducción en la longitud de la raíz provoca la exploración de un volumen de suelo más pequeño, disminuyendo la absorción de agua y nutrientes, lo que representa la menor productividad en los suelos compactados.

*Tabla 1-13: Densidad longitudinal radical en el surco (S) y entresurco (ES) ($cm\ cm^{-3}$) del cultivo de soja C1:2008/09 en distintos momentos (V3, R3 y R6) según el nivel de compactación (NC) sin descompactar (sd) y descompactado (d) y el nivel de fertilización (NF) alta (A) y baja (B) y la interacción de los factores (NF*NC). Análisis de varianza según el test de LSD de Fisher LSD, *diferencia significativa ($P<0,05$).*

		S/V3	S/R3	S/R6	ES/V3	ES/R3	ES/R6
NC	sd	0,262 a	0,825 a	0,486 a	0,138 a	0,598 a	0,435 a
	d	0,553 b	1,203 b	1,072 b	0,135 a	0,671 a	0,459 a
NF	B	0,371 a	0,985 a	0,673 a	0,118 a	0,673 a	0,491 a
	A	0,33 a	1,032 a	0,887a	0,146 a	0,573 a	0,396 a
	Bsd	0,235	0,664	0,445	0,103	0,702	0,503
	Asd	0,286	0,973	0,537	0,124	0,496	0,364
	Bd	0,395	1,302	0,823	0,136	0,653	0,485
	Ad	0,517	1,106	1,328	0,165	0,664	0,427
Análisis varianza							
NC		*	*	*	ns	ns	ns
NF		ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC*Nf		ns	ns	ns	ns	ns	ns

En la C3 el menor IC% con respecto a las C1 y C2 se encuentra correlacionada con la estratificación del desarrollo radical del cultivo. Las raíces correspondientes a cada tratamiento no ocuparon el espacio de igual manera, por lo que el efecto residual de la d y el NF del suelo, modificaron la distribución en profundidad de las raíces. Al comparar el área bajo la curva de la densidad longitudinal de las raíces en cada tratamiento se observó que los d presentaron mayor desarrollo radical en el estrato superior del suelo (15 cm), 43% del desarrollo. En los estratos medios (25 cm) e inferior (35 cm) los porcentajes fueron menores, 20 y 37%; 36 y 21% para Ad y Bd, respectivamente.

Lo contrario se observó con los tratamientos sd. El desarrollo radical en el estrato superior fue menor dentro de la profundidad total medida, 17 y 24% para Asd y Bsd, respectivamente. El mayor desarrollo radical en estos tratamientos se encontró en el estrato medio para Asd (51%) y en el estrato inferior para Bsd (45%) (Tabla 1-14).

Tabla 1-14 Área bajo la curva de la densidad longitudinal de raíces ($ABC \delta lr \text{ cm}^2$) para los distintos tratamientos [Ad (alta fertilización descompactado), Asd (alta fertilización sin descompactar), Bd (baja fertilización descompactado) y Bsd (baja fertilización sin descompactar)] a distintas profundidades (15, 25 y 35 cm) y profundidad total medida (0-35 cm)

ABC δ lr								
Tratamientos	15 cm		25 cm		35 cm		0 - 35 cm	
Ad	452,33 a	43 %	207,00 a	20 %	392,00 a	37 %	1051,33 a	100 %
Bd	700,00 a	43 %	584,00 ab	36 %	334,67 a	21 %	1618,33 a	100 %
Asd	427,67 a	17 %	1257,67 b	51 %	758,33 a	32 %	2444,67 a	100 %
Bsd	368,33 a	24 %	465,67 ab	31 %	675,37 a	45 %	1509,33 a	100 %

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$); *: diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

Los resultados del ABC δ lr mostraron una correlación positiva ($R^2 = 0,84$) entre el Rdto. y el desarrollo radical en el estrato superior del suelo (15 cm); sin embargo, en el estrato inferior (35 cm), la relación fue negativa ($R^2 = 0,89$). En el estrato medio (25 cm) y la profundidad total medida (0-35 cm), la correlación encontrada fue baja y semejante entre ellas con valores de R^2 de 0,198 y 0,204, respectivamente (Figura 1-21).

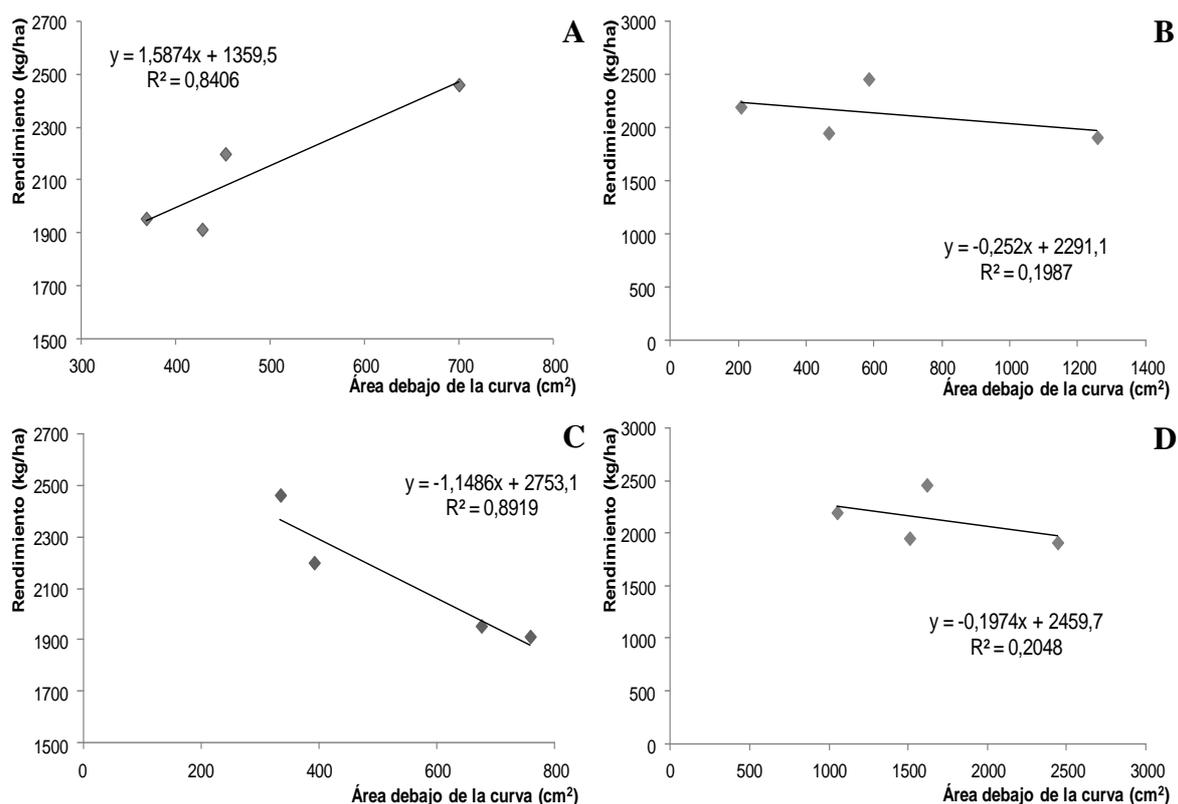


Figura 1-21 Correlación entre el área bajo la curva de la densidad longitudinal de raíces y el rendimiento alcanzado por el cultivo para diferentes profundidades [15 cm (A), 25 cm (B), 35 cm (C) y 0-35 cm de profundidad (D)].

Cuando se compara el desarrollo radical alcanzado en la profundidad total medida producto de la suma de todos los estratos en cada tratamiento (0-35 cm de profundidad), no existen diferencias entre tratamientos (Tabla 1-14). Esto se debería a que, aunque los suelos sd presenten mayor Ds y RP en superficie, las condiciones se compensan por un sistema de macroporos más extenso a mayores profundidades, que favorece el crecimiento y la distribución de las raíces (Rasse & Smucker, 1998). De lo expresado anteriormente el mayor desarrollo radical en los d se debe a la mejor aireación, menor RP y Ds dentro del estrato superior. Estas nuevas condiciones propician en el ambiente edáfico una mejor condición para el desarrollo biológico en el mismo (Alzugaray *et al.*, 2008), así como beneficios en las propiedades físicas del suelo (Swain, 1975).

Por otra parte en suelos de diferentes texturas de la región Pampeana, se encontró que la abundancia de raíces del cultivo de soja en siembra directa y convencional, estaba negativamente relacionado con el contenido de arcilla, demostrando que las propiedades del subsuelo, y no los sistemas de labranza, fueron el principal efecto del crecimiento de las raíces de la soja (Micucci & Taboada, 2006).

5-3.Eficiencia de uso de los recursos agua, radiación y fósforo

En la Tabla 1-15 del análisis de varianza se observa que para EUR BT ciclo y G no hubo interacción entre los factores de tratamiento (NC, NF, Año) por lo tanto se analizaron los efectos principales, en tanto que para la RFAi acumulada durante el ciclo del cultivo y la EUR en el período (R4-R6) existieron interacciones analizándose la apertura de las mismas. En cuanto a la EUR_G, no se encontraron diferencias significativas según NC y NF, pero sí entre años presentando la C2 un valor 70 y 90% superior con respecto a C1 y C3, respectivamente.

La EUR BT ciclo fue un 12,1% mayor en el NC d con respecto a sd (1,30 vs. 1,16) y, en la C2 un 48 y 44% superior respecto a C1 y C3, respectivamente (Tabla 1-15). Valores de EUR BT de 1,17-2,08 g MJ⁻¹ fueron publicados por Caviglia *et al.* (2004) para dos campañas de soja de segunda en Balcarce. Por otro lado, es importante destacar que bajo condiciones de estrés la EUR suele presentar variaciones (Muchow *et al.*, 1993), siendo notablemente menor que en situaciones sin limitantes hídricas ni nutricionales. Dicha afirmación se reflejó al comparar los valores obtenidos en las C1 y C3 (seca y levemente seca) con respecto a C2 (húmeda).

Tabla 1-15. Análisis de la varianza para Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada durante el ciclo (RFAi acum ciclo) y eficiencia de uso de la radiación (EUR) [en función de la biomasa acumulada durante el ciclo total (EUR BT ciclo), biomasa acumulada en el período R4-R6 (EUR BT R4-R6) y rendimiento en grano (EUR G)] del cultivo de soja, según los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] y de compactación [NC, sin descompactar (sd) y descompactado (d)], años 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010-11 (C3) y sus interacciones.

		RFAi acum	EUR BT	EUR BT	EUR G
		(ciclo)	(R4-R6)	(ciclo)	
		(MJ)	g m ⁻² MJ ⁻¹		
NF	A	691,2	1,10	1,25 a	0,42 a
	B	678,1	0,98	1,22 a	0,41 a
NC	d	701,7	1,21	1,3 b	0,43 a
	sd	667,6	0,87	1,16 a	0,40 a
Año	2008/09	584,2	1,24	1,05 a	0,36 a
	2009/10	764,8	1,10	1,56 b	0,57 b
	2010/11	704,9	0,78	1,09 a	0,30 a
Análisis de la varianza					
NF		0,0044	ns	ns	ns
NC		<0,0001	<0,0001	0,0239	ns
Año		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
NF*NC		ns	0,0175	ns	ns
NF*Año		0,0232	ns	ns	ns
NC*Año		<0,0001	0,0204	ns	ns
NF*NC*Año		<0,0001	ns	ns	ns

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$); diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

En la figura 1-22 se presenta la interacción NC*NF*año para RFAi acumulada durante el ciclo del cultivo de soja. Bajo condiciones hídricas limitantes de la C1, la RFAi acum mejoró en suelos descompactados (d) para los niveles de alta y baja fertilización fosforada, en un 22 y 11% respectivamente respecto a los suelos sd. En la C2 y C3 los tratamientos con alto y bajo nivel de fertilización no presentaron diferencias según el NC (d o sd).

Cuando la disponibilidad de agua no es limitante, la cantidad transpirada por el cultivo depende, fundamentalmente, de la radiación interceptada por su canopeo. La radiación solar es la fuente de energía utilizada tanto en el proceso transpiratorio como en el de fijación de CO₂. La cantidad de radiación solar interceptada y acumulada por un cultivo depende de la

duración del ciclo y de la dinámica de interceptación, fuertemente ligada a la evolución del IAF. Este se genera con la aparición y expansión de las hojas y es el producto del número de hojas y del tamaño de las mismas (Maddonni & Otegui, 1996).

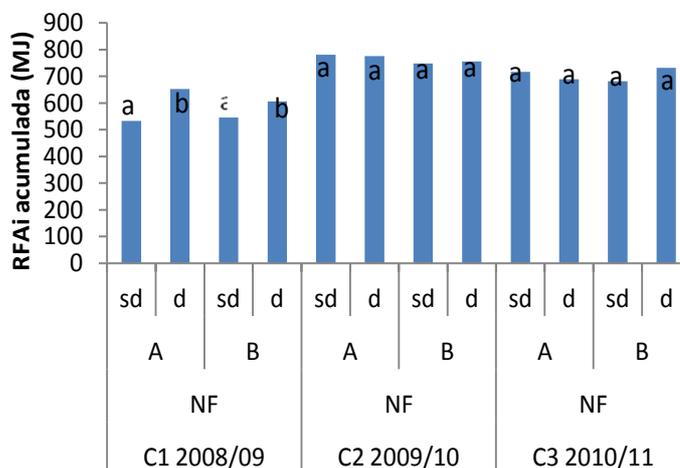


Figura 1-22: Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada durante el ciclo del cultivo de soja [RFAi acum ciclo (MJ)] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según niveles de fertilización [alta (A) y baja (B)] y niveles de compactación [sin descompactar (sd) y descompactado (d)]. Apertura de la interacción NC*NF*Año. Letras distintas dentro de cada NF indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

En la figura 1-23 se compara la EUR_BT (R4-R6) dentro de cada año según el NC (d, sd) encontrándose diferencias significativas en las C1 y C3, donde la EUR en d con respecto a sd fue un 31% (1,41 vs. 1,07 g MJ⁻¹) y 131% (1,09 vs. 0,47 g MJ⁻¹) superior respectivamente, en tanto que para C2 estas diferencias no fueron significativas. Estos valores se encuentran dentro del rango citado por Andriani *et al.* (1991) que reportaron EUR_ BT en R4-R6 de 1,07-1,50 g MJ⁻¹ con sequía inducida. Si bien la EUR BT (ciclo) fue más baja en la C1, debido al estrés hídrico, en el período de crecimiento R4-R6 la EUR en d fue alta (1,41 g m⁻² MJ⁻¹), debido a la llegada de las lluvias en R4 que permitieron al cultivo recuperarse.

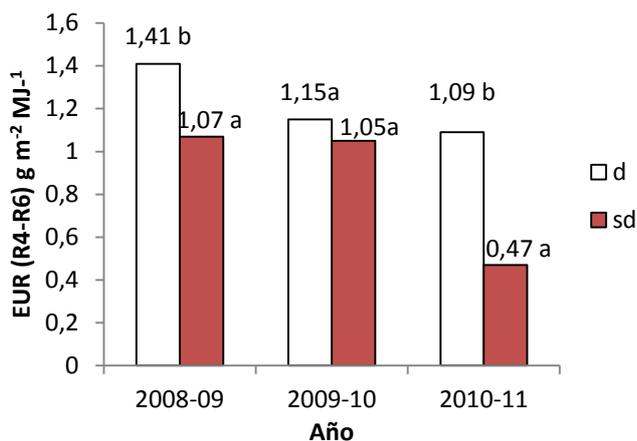


Figura 1-23: Eficiencia uso de la radiación para el período de crecimiento R4-R6 [EUR (R4-R6, g m⁻² MJ⁻¹)] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NC*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

La EUR_BT (R4-R6) presentó diferencias significativas según los tratamientos (NF*NC), donde para el NF alta (A) los tratamientos descompactados presentaron un 63% más de eficiencia que los sd, en tanto que para el NF baja (B) estas diferencias no fueron significativas (Figura 1-24). La mayor fertilización con P y un suelo en mejores condiciones físicas, pudo favorecer la nodulación y la fijación biológica de N aumentando el contenido de N en hoja manteniendo una mayor tasa de fijación de CO₂ con el aumento en la EUR-BT. La sensibilidad de la tasa de fotosíntesis a cambios en el contenido de N en hoja fueron estudiados por Sinclair & Horie (1989) como fuente importante de variación en la EUR, donde ante bajos contenidos de N en hoja una mejora produce aumentos en la EUR.

El agua disponible es, generalmente, el principal factor que limita el crecimiento y Rdto. de los cultivos en condiciones de secano (Boyer, 1982). Por lo tanto, el factor clave para alcanzar mejores resultados en la agricultura de secano es tratar de maximizar el uso del agua por parte de los cultivos (Dardanelli *et al.*, 2003).

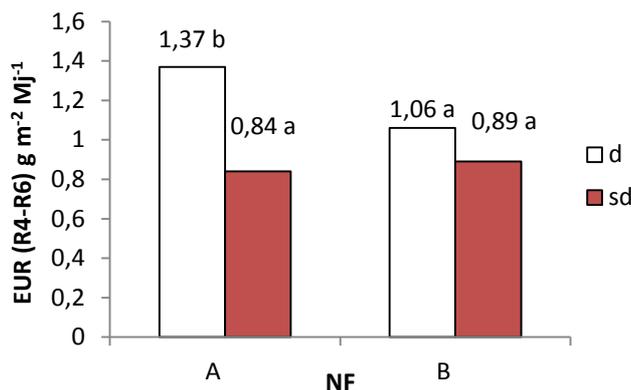


Figura 1-24: Eficiencia uso de la radiación para el período de crecimiento R4-R6 [EUR (R4-R6, g m⁻² MJ⁻¹)] para los niveles de fertilización [NF, alta (A) y baja (B)] según los niveles de compactación [NC, descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NF*NC. Letras distintas dentro de cada NF indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

En la Tabla 1-16 se detalla la EUA para la producción de grano (EUA_G) y B total (EUA_BT); no se presentaron interacciones significativas entre los factores de tratamiento (NF, NC) en los distintos años, por lo cual se analizó el efecto de los factores principales. En la C2 la EUA_G fue un 67 y 73% superior, al igual que la EUA_BT en un 70 y 35%, con respecto a C1 y C3 respectivamente, siendo estas diferencias significativas. En cuanto al NC los tratamientos d presentaron un 21,8% más de EUA_BT respecto a sd (2,01 vs 1,65) ($P < 0,05$).

El efecto de la descompactación contribuyó al aumento de la EUA con respecto a los sd, pudiéndose deber a la menor proporción del uso de agua destinada a evaporación (pérdida improductiva), aumentando la relación transpiración T/ETcaj a través de la reducción de la evaporación del suelo, dado por la mayor cobertura de la canopia en las etapas iniciales del cultivo y la mayor duración del área foliar en (R4-R6) como se mencionó anteriormente. La cantidad absoluta de evaporación depende de la cobertura de la canopia, del humedecimiento de la superficie del suelo, del tipo de suelo y de la demanda atmosférica (Wallace *et al.*, 1991).

Se sabe que el P incrementa la EUA y la tolerancia de los cultivos a la sequía a través del desarrollo temprano del cultivo que reduce la evaporación del agua del suelo favoreciendo la transpiración del cultivo (Andrade *et al.*, 2000). Esta respuesta no se observó en la EUA_G y B ya que no presentaron diferencias significativas según el NF.

Los valores hallados en este trabajo se encuentran dentro de los estimados por otros autores. Micucci & Álvarez (2003) reportaron valores de $0,91 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ de EUA_G para el cultivo de soja en Balcarce e intervalos de $0,5$ a $1,1 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, así como valores entre $0,30$ y $0,90 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ Kantolic (2009). Valenzuela *et al.*, 2009, hallaron valores de EUA_BT y G en cultivos de soja para la misma región de $1,8$ y $0,55 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ respectivamente.

Tabla 1-16. Eficiencia en el uso del agua del cultivo de soja en función de la biomasa total (EUA_BT, $\text{g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$) y de la producción de granos (EUA_G, $\text{g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$) para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) según nivel de fertilización (A= alta y B= baja) y de compactación (d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones.

		EUA_G	EUA_BT
		$\text{g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$	$\text{g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$
NF	A	0,63 a	1,80 a
	B	0,63 a	1,86 a
NC	d	0,65 a	2,01 b
	Sd	0,60 a	1,65 a
Año	2008/09	0,52 a	1,39 a
	2009/10	0,87 b	2,36 c
	2010/11	0,49 a	1,74 b
Análisis de la varianza			
NF		ns	ns
NC		ns	0,0025
Año		<0,0001	<0,0001
NF*NC		ns	ns
NF*Año		ns	ns
NC*Año		ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$).

En la Tabla 1-17 se observa del análisis de la varianza que el fósforo absorbido total (P_abs total) y la eficiencia de uso del P en grano (EUP_G [kg grano kg^{-1} P aplicado]) no presentaron interacciones significativas, por lo cual se analizó el efecto de los factores principales (NF, NC); en tanto que la eficiencia de recuperación de P en planta (EFR_P [$\text{kg P absorbido kg}^{-1}$ P aplicado]), eficiencia fisiológica de P en grano (EFP_G [kg grano kg^{-1} P

absorbido]) y balance de P (P aplicado en fertilizante – P exportado en grano) presentaron interacciones significativas analizándose la apertura de las mismas.

El P absorbido total por el cultivo fue un 15,2% mayor en los suelos d con respecto a sd y un 9,1% mayor para el NF alto (A) con respecto a bajo (B) ($P < 0,05$). Esto estaría asociado a la mayor exploración del suelo d por parte de las raíces y, por lo tanto, mayor superficie de suelo explorada para extraer P. Como el P es relativamente inmóvil, el efecto de la compactación del suelo en la absorción de P se relaciona, principalmente, con la configuración del sistema radicular. En general, un sistema de raíces restringido y baja accesibilidad al P en suelos compactados resulta en una menor cantidad de P total absorbido (Barracough & Weir, 1988; Misra *et al.*, 1988; Müller *et al.*, 1990; Lipiec & Stepniewski, 1995). Durante la C2 se dio la mayor absorción de P, siendo en promedio un 84% superior con respecto a las otras campañas, debido a los altos rendimientos obtenidos y las buenas condiciones hídricas.

El efecto de la compactación sobre el transporte de nutrientes por las raíces depende del nivel de compactación del suelo y del suministro de agua y nutrientes. En condiciones de alta fertilidad y buen contenido de agua del suelo, la compactación moderada puede tener un efecto beneficioso. Esto puede ser debido a una mayor retención de agua y conductividad hidráulica en el caso de transporte de flujo de masa (Kemper *et al.*, 1971), al aumento del coeficiente de difusión de iones (Warncke & Barber, 1972) o a un aumento de la concentración de iones en el suelo.

Sin embargo, incrementos de la D_s por encima de ciertos valores, pueden conducir a una disminución del coeficiente de difusión, como resultado de la mayor tortuosidad de los poros y la restricción de la penetración de las raíces. El flujo masal es un mecanismo importante en el transporte de N, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Cl; como la difusión lo es en el transporte de P, Zn y K. La aireación del suelo, dependiente del contenido de agua y el grado de compactación (Stepniewski *et al.*, 1994) es otro factor que influye en la transformación de nutrientes y la absorción.

La EFP_G no presentó diferencias significativas según el NC, obteniéndose valores entre 148,2 a 163,3 kg de granos por kg P absorbido medido en R8; lo que es igual a una necesidad de 6,7-6,1 kg P absorbido por tn de grano producido, respectivamente. En tanto que, los kg P exportados por tn de grano fueron entre 5,05 a 5,45 kgP tn⁻¹. Las tasas de extracción de P que realiza el cultivo de soja son variables, un trabajo de Bermudez *et al.* (2014) cita valores entre 4,0 a 4,2 kgP tn⁻¹ de grano producido para diferentes dosis y momentos de aplicación de P.

Tabla 1-17. Fósforo absorbido total (P_{abs} total), eficiencia fisiológica (EFP_G) y de uso (EUP_G) del P en grano, eficiencia de recuperación de P en planta (EFR_P) y balance de P (P aplicado en fertilizante – P exportado en grano) para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) según nivel de fertilización (A= alta y B= baja) y de compactación (d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones.

		P abs total	EFP G	EFR P	EUP G	Balance
		kg P	kg kg Pabs⁻¹	kg Pabs kg Papl⁻¹	kg kg P apl⁻¹	P apl.-P exp. G
NF	A	19,2 b	152,7	0,78	120,4 a	10,4
	B	17,6 a	159,6	1,47	235,3 b	-2,3
NC	d	19,7 b	152,5 a	1,16 b	180,2 a	3,2
	sd	17,1 a	159,8 a	1,09 a	175,5 a	4,8
Año	2008/09	13,8 a	157,1	0,9	140,3 a	7,8
	2009/10	26,5 b	163,3	1,59	260,9 b	-3,5
	2010/11	14,9 a	148,2	0,88	132,3 a	7,8
Análisis de la varianza						
NF		0,0037	ns	<0,0001	<0,0001	<0,0001
NC		0,0026	ns	0,0022	ns	0,0102
Año		<0,0001	0,0419	<0,0001	<0,0001	<0,0001
NF*NC		ns	ns	ns	ns	0,0452
NF*Año		ns	0,0395	0,0064	ns	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns	0,0254
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$)

En la C3 la EFP_G fue significativamente mayor para el NF B con respecto a A produciendo más grano por unidad de P absorbido, en tanto que en C1 y C2 no hubo diferencias significativas (Figura 1-25). Cuando la EFR_P toma el valor de 1, el P absorbido por el cultivo es igual que al aplicado con el fertilizante. En las C1, C2 y C3 la EFR_P fue mayor a 1 en el nivel de baja fertilización, siendo estas diferencias significativas y en una magnitud del 66, 103 y 81% respectivamente respecto al NF A (Figura 1-26) obteniendo estas diferencias del P del suelo.

La EUP_G , surge de la $EFP_G * EFR_P$; donde para el NF B la eficiencia de uso del P aplicado fue un 95 % superior respecto a NF A como una medida de productividad. En la C2 se obtuvieron las mayores eficiencias de uso con respecto a C1 y C3 ($P < 0,05$) debido a los altos rendimientos obtenidos. Para el centro de Santa Fe, en suelos con P Bray1 menores a 10 ppm, la EUP_G fue de 344, 185 y 125 kg grano kg P⁻¹ para dosis de 10, 20 y 30 kg de P

respectivamente (Gutiérrez Boem & Salvagiotti, 2014) valores comparables con los de este ensayo (Tabla 1-17).

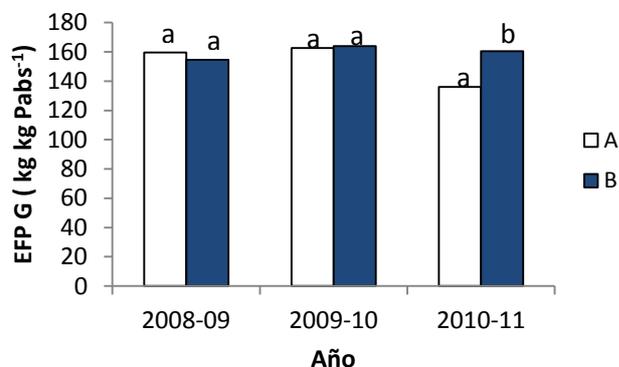


Figura 1-25: Eficiencia fisiológica del P para la producción de grano [EFP_G (kg de grano producido por kg de P absorbido, para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de fertilización [NF alto (A) y bajo (B)]. Apertura de la interacción NF*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

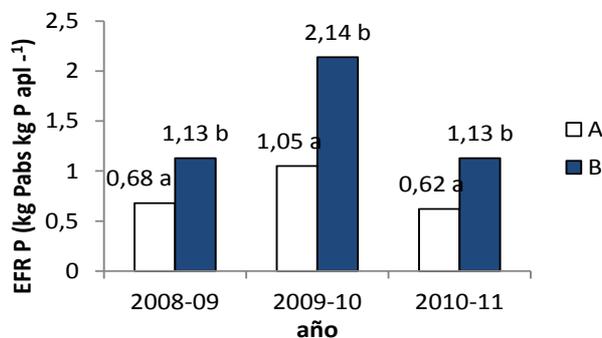


Figura 1-26: Eficiencia de recuperación del P en planta [EFR_P (kg de P absorbido sobre kg de P aplicado] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de fertilización [alta (A) y baja (B)]. Apertura de la interacción NF*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

En cuanto al balance P fue positivo en las C1 y C3 por los bajos rendimientos y negativo en la C2 por los altos rendimientos obtenidos teniendo en cuenta el P aplicado y el exportado en los granos. En C1 y C3 el balance fue positivo pero inferior en el nivel

descompactado (d) en un 32 y 27% respecto a los sd respectivamente, debido al mayor rendimiento y extracción de P en grano (Figura 1-27).

El balance de P en el NF A fue positivo e inferior en un 15% en los suelos d con respecto a sd, en tanto que para el NF baja el balance fue negativo en d y sd ($P > 0,05$) donde una parte del nutriente que se exportó con los granos provino del propio suelo teniendo en cuenta los valores deficitarios de P inicial (Figura 1-28).

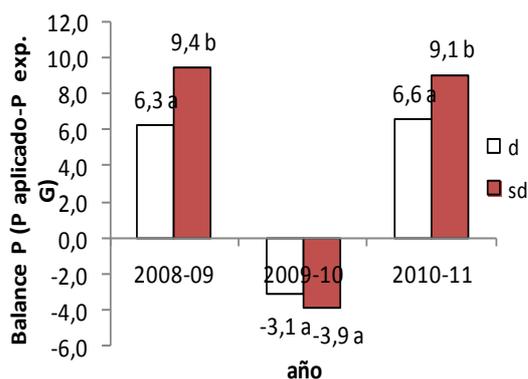


Figura 1-27: Balance de P [P aplicado-P exportado en grano] para las distintas campañas soja [2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3)], según los niveles de compactación [descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NC*Año. Letras distintas dentro de cada año indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

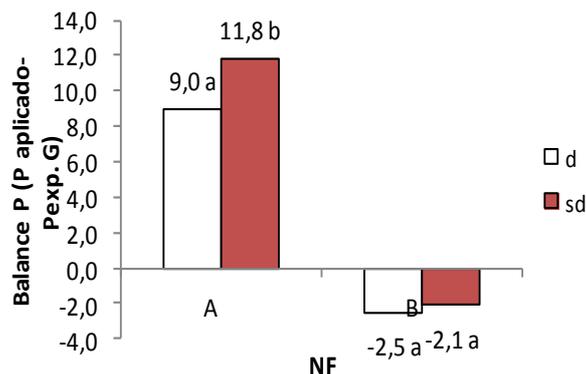


Figura 1-28: Balance de P [P aplicado-P exportado en grano] para los niveles de fertilización [NF alto (A) y bajo (B)], según los niveles de compactación [NC descompactado (d) y sin descompactar (sd)]. Apertura de la interacción NF*NC. Letras distintas dentro de cada NF indican diferencias significativas $P \leq 0,05$ según el test LSD ($\alpha = 0,05$).

En la tabla 1-18 se presenta el análisis de varianza para la concentración de P en grano y rastrojo de soja, no presentando diferencias significativas ni interacciones entre los factores NC, NF y año.

La compactación reduce la concentración de P mucho más en el rastrojo que en el grano (Lipiec & Stepniewski, 1995). En este trabajo se manifestó dicha tendencia, siendo la concentración de P en rastrojo un 8,8% ($602,3 \text{ mg kg}^{-1}$ vs. $655,5 \text{ mg kg}^{-1}$) y en grano 1,9%

menor (0,51% vs. 0,52%) en suelos sd vs. d ($P > 0,05$). La bibliografía indica concentraciones de P en grano de soja variables, desde 0,43 a 0,64% (Berardo, 2003).

Tabla 1-18: Análisis de la varianza para concentración en % de P en grano (%P G) y P en rastrojo soja (mg kg^{-1}) para las campañas 2008/09 (C1), 2009/10 (C2) y 2010/11 (C3) según nivel de fertilización (NF A= alta y B= baja) y de compactación (d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones.

		% P G	P rastrojo mg kg^{-1}
NF	A	0,52 a	650,1 a
	B	0,51 a	607,6 a
NC	d	0,52 a	655,5 a
	sd	0,51 a	602,3 a
Año 2008/09		0,52 a	652,6 a
2009/10		0,52 a	572,4 a
2010/11		0,51 a	661,6 a
Análisis de la varianza			
NF		ns	ns
NC		ns	ns
Año		ns	ns
NF*NC		ns	ns
NF*Año		ns	ns
NC*Año		ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns

Letras diferentes, dentro de una misma columna, indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$).

6- Análisis de correlación entre variables de suelo y cultivo para las diferentes campañas de soja

El coeficiente de correlación de Spearman es una medida de la magnitud de la asociación entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales. Del análisis para las tres campañas (Tabla 1-19) se manifiesta una correlación positiva y significativa entre las variables de cultivo como EUA y EUR (G y BT) -cuadrante superior izquierdo-. Este tipo de asociaciones entre EUR y EUA concuerdan con datos reportados para girasol y trigo (Sadras *et al.*, 1991; Caviglia & Sadras, 2001) y para soja y el doble cultivo trigo/soja (Caviglia *et al.*, 2004). La Pa (sup y prof) se correlacionó negativamente con la Ds y la RP (sup y prof) y éstas se correlacionaron positivamente entre sí

en forma significativa -cuadrante inferior derecho-. No se encontraron correlaciones significativas entre las variables de suelo y cultivo -cuadrante inferior izquierdo- para las tres campañas en su conjunto.

*Tabla 1-19. Matriz de correlación: coeficientes de correlación de Spearman entre variables de suelo [densidad aparente superficial y profunda (Ds, sup y prof); porosidad de aireación superficial y profunda (Pa, sup y prof); resistencia a la penetración superficial y profunda (RP, sup y prof)] y del cultivo de soja [eficiencia de uso de radiación en biomasa total y en grano (EUR_BT y EUR_G); eficiencia de uso del agua en biomasa total y en grano (EUA_BT y EUA_G); peso de mil granos (P1000); número de granos por m² (Nº_G m⁻²); rendimiento (Rdto), fósforo absorbido total (Pabs t) y eficiencia uso del P para la producción de grano (EUP_G)] para las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11. (*P<0,05: correlación significativa. ns: correlación no significativa).*

	Rdto	Nº Gm-2	P1000	EUAG	EUABT	EUR G	EUR BT	P abs t	EUP-G	Ds(sup.)	Ds (prof)	RP (Sup)	RP(prof)	Pa (sup)
Rdto.														
Nº Gm-2	0,87*													
P1000	0,75*	0,45*												
EUAG	0,92*	0,81*	0,73*											
EUABT	0,77*	0,73*	0,51*	0,75*										
EUR G	0,88*	0,68*	0,86*	0,91*	0,62*									
EUR BT	0,81*	0,73*	0,66*	0,8*	0,91*	0,74*								
P abs total	0,93*	0,84*	0,7*	0,81*	0,83*	0,8*	0,89*							
EUP-G	0,8*	0,72*	0,66*	0,82*	0,72*	0,75*	0,7*	0,71*						
Ds (sup.)	-0,28 ns	-0,06 ns	-0,13 ns	-0,27 ns	-0,26 ns	-0,25 ns	-0,23 ns	-0,16 ns	-0,14 ns					
Ds (prof)	-0,2 ns	-0,11 ns	-0,09 ns	-0,06 ns	-0,32 ns	-0,14 ns	-0,38 ns	-0,34 ns	-0,07 ns	0,48*				
RP (Sup)	-0,33 ns	-0,14 ns	-0,14 ns	-0,26 ns	-0,35 ns	-0,25 ns	-0,26 ns	-0,26 ns	-0,22 ns	0,96*	0,55*			
RP (prof)	-0,21 ns	-0,02 ns	-0,1 ns	-0,12 ns	-0,32 ns	-0,21 ns	-0,32 ns	-0,26 ns	-0,06 ns	0,77*	0,74*	0,84*		
Pa (sup)	0,33 ns	0,15 ns	0,12 ns	0,26 ns	0,35 ns	0,24 ns	0,26 ns	0,25 ns	0,2 ns	-0,96*	-0,54*	-1*	-0,82	
Pa (prof)	0,19 ns	0,01 ns	0,09 ns	0,1 ns	0,31 ns	0,19 ns	0,3 ns	0,25 ns	0,05 ns	-0,77*	-0,74*	-0,84*	-1*	0,83*

Sin embargo, analizando las campañas C1 (seca) y C3 (moderadamente seca), donde las condiciones físicas de suelo limitaron el crecimiento del cultivo, se encontraron correlaciones significativas (Tabla 1-20). El Rdto, la EUA_G y el P abs t se correlacionaron significativamente en forma positiva con la Pa (sup y prof) y negativamente con la Ds y RP (sup y prof). La práctica de descompactación suele presentar mayor impacto sobre el rendimiento en condiciones de estrés hídrico moderado, siendo este impacto mínimo o nulo en condiciones de estrés hídrico severo o de alta humedad (Sadras *et al.*, 2005). Los suelos con mayor Ds y RP disminuyeron la absorción de P por un menor tamaño del sistema radical restringiendo el acceso al agua de capas de suelo más profundas, afectando el rendimiento y la eficiencia de uso del agua para la producción de grano.

Tabla 1-20: Variables de suelo [densidad de suelo superficial y profunda (Ds , sup y prof); porosidad de aireación superficial y profunda (Pa, sup y prof); resistencia a la penetración superficial y profunda (RP, sup y prof)] y del cultivo de soja [eficiencia de uso de radiación en biomasa total y en grano (EUR_BT y EUR_G); eficiencia de uso del agua en biomasa total y en grano (EUA_BT y EUA_G); peso de mil granos (P1000); número de granos por m² (N°_G m-2); rendimiento (Rdto), fósforo absorbido total (Pabs t) y eficiencia uso del P para la producción de grano (EUP_G)] para las campañas 2008/09 y 2010/11 (campaña seca y moderadamente seca, respectivamente). Coeficientes de correlación de Spearman entre variables de suelo y cultivo, (*P<0,05: correlación significativa ns: correlación no significativa).

	Rdto.	N° Gm-2	P1000	EUAG	EUABT	EUR G	EUR BT	P abs t.	EUP-G
Ds(sup.)	-0,83*	-0,35 ns	-0,45 ns	-0,78*	-0,46 ns	-0,78*	-0,53*	-0,62*	-0,45 ns
Ds (prof)	-0,56*	-0,23 ns	-0,15 ns	-0,74 *	-0,52*	-0,3 ns	-0,59*	-0,68*	-0,11 ns
RP (sup)	-0,82*	-0,43 ns	-0,36 ns	-0,63*	-0,63*	-0,65*	-0,5*	-0,69*	-0,52*
RP(prof)	-0,6*	-0,25 ns	-0,36 ns	-0,54 *	-0,63 *	-0,64 *	-0,67 *	-0,76 *	-0,34 ns
Pa (sup)	0,83*	0,45 ns	0,33 ns	0,64*	0,64*	0,63*	0,5*	0,7*	0,5*
Pa (prof)	0,61*	0,24 ns	0,36 ns	0,70 *	0,64*	0,62*	0,67*	0,76*	0,35 ns

CONCLUSIONES

Tomando como base el rendimiento como variable de respuesta, el nivel de compactación del suelo fue más importante como factor limitante que la fertilidad química del mismo, debido a que la respuesta en Rdto del cultivo de soja fue mayor en los tratamientos d vs. sd, en tanto que respecto a la dosis de fertilización fosforada, no fue significativa. En los tratamientos d se verificó que, con el transcurso del tiempo, tanto la Ds como la RP aumentaron mientras que Pa fue decreciendo, pero sin llegar a valores similares a los tratamientos sd, destacando la persistencia del efecto residual de la descompactación inicial sobre la Ds, RP y Pa.

No se encontraron correlaciones significativas entre variables de suelo y cultivo para las tres campañas en su conjunto, pero sí para C1 (seca) y C3 (moderadamente seca), poniendo de manifiesto que la limitante compactación estuvo condicionada por el contenido hídrico del suelo.

CAPÍTULO II

VARIABLES METEOROLÓGICAS, DE SUELO Y ECOFISIOLÓGICAS QUE EXPLICAN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE TRIGO

INTRODUCCIÓN

El cultivo de trigo es el cereal invernal de mayor importancia en Argentina, tanto para la alimentación básica de la población como para la producción. Es un eslabón fundamental en la conservación del recurso suelo de los sistemas productivos, en los que domina el cultivo de soja. En las campañas 2012 (C1), 2013 (C2) y 2014 (C3) se sembraron en promedio 4023744 ha de trigo en nuestro país y, 690604 ha en la provincia de Santa Fe, con rendimientos promedios alcanzados de 2801, 2129 y 2775 kg ha⁻¹, respetivamente (SiiA, 2015). El rendimiento (Rdto.) puede ser explicado por un modelo simple analizando sus componentes numéricos, como son el número de granos (NG) y el peso final de los mismos, producto de la tasa y duración del llenado. Numerosas evidencias han mostrado que de estos dos componentes, el NG producidos es el que mejor explica las variaciones en el Rdto. final, más que cualquier cambio en el peso individual (Slafer *et al.*, 2003).

El Rdto. potencial del trigo, como el de cualquier otro cultivo, depende primariamente de la radiación capturada y de la temperatura incidente para un genotipo determinado. En condiciones de secano está limitado por el consumo de agua durante el ciclo, siempre que los demás aspectos de manejo hayan sido cubiertos adecuadamente (nutrición, sanidad, siembra y genética).

Comprender el desarrollo fenológico de un cultivo es un aspecto clave, no sólo para establecer la adaptabilidad del mismo a distintos ambientes, sino también para identificar los períodos críticos en los que se define el rendimiento (Miralles *et al.*, 2007) y, consecuentemente, desarrollar estrategias de manejo tendientes a cubrir los requerimientos de agua y nutrientes.

Por lo expuesto, el manejo del agua previo a la siembra es de fundamental importancia y requiere considerar aquellos factores que inciden tanto sobre la captación como sobre la eficiencia de almacenaje y uso de la misma. Para mejorar la captación de agua debemos evitar encostramientos superficiales, pisoteos, compactación subsuperficial, que fundamentalmente limitan y afectan la infiltración de agua y la penetración radical (Glinski & Lipiec, 1990).

La calidad física de los suelos se refiere fundamentalmente a parámetros como la resistencia mecánica, la transmisión y el almacenaje de agua en la zona de exploración de las raíces. Estas propiedades físicas determinan, en parte, la adaptación de cualquier medio dado para el crecimiento de las plantas.

Arvidsson & Hakansson (1996), definen la compactación como el aumento de la densidad aparente del suelo (D_s) como resultado de las cargas o presiones aplicadas al mismo, expresando su magnitud por el aumento de la D_s y de la resistencia a la penetración de las raíces (RP). Además, sostienen que las principales causas de la compactación del suelo son las presiones generadas por el paso de rodados e implementos agrícolas, el pisoteo animal y el reacondicionamiento de las partículas de suelo en planteos de trabajo sin laboreo.

Otros factores que influyen en la compactación de los suelos son: bajos contenidos de MO, suelos sin residuos en superficie, altas concentraciones de sodio y de otros agentes dispersantes, tránsito de maquinaria con alta humedad en el suelo, el manejo de los suelos, los sistemas de cultivo y las condiciones climáticas (Voorhees, 1987). Otros autores afirman también que cuando el suelo permanece sin ser trabajado, como en el caso de los sistemas basados en SD, la consolidación natural tiende a incrementar la D_s , lo cual se agrega a la acción de agentes compactantes como la maquinaria, los animales y las lluvias (Martino, 2003; Gil, 2007).

Con respecto a lo anterior, Martino (2003) sostiene que el aflojamiento del suelo causado por el laboreo favorece la infiltración de agua, la aireación y el desarrollo de raíces. Por esta razón, en los sistemas basados en el laboreo del suelo, los problemas de compactación son en cierta forma disimulados, al menos durante breves períodos de tiempo.

La compactación afecta además otras propiedades del suelo como la porosidad de aeración (P_a), la conductibilidad hidráulica y la infiltración del agua. Potencialmente puede alterar la morfología y fisiología de las plantas (Bingham, 2001; Passioura, 2002) y, consecuentemente, reducir el crecimiento y Rdto de los cultivos.

La presencia del trigo en la secuencia es importante por su capacidad de exploración radicular. El crecimiento de raíces, en especial de gramíneas, es uno de los principales factores que contribuyen a regenerar la estructura del suelo (Gerster *et al.* 2010). Los cultivos de nuestra región tienen diferentes capacidades para explorar áreas densificadas, estando la capacidad de exploración de estas áreas condicionada al nivel de humedad del perfil. Cuando el suelo se encuentra con valores de humedad cercanos a capacidad de campo (θ_{CC}), la resistencia que presenta al crecimiento de las raíces es sustancialmente menor que cuando está seco, permitiendo una mejor exploración radicular (Bennie & Botha, 1986).

Por otra parte, por el tipo de cobertura y su distribución, al ser un cultivo que se implanta en líneas cercanas (17 a 21 cm), presenta características favorables para sistemas de SD continua por una mejor ocupación del suelo por las raíces.

La implementación de la SD puede mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos puesto que contribuyen, en general, a mantener o incrementar el nivel de carbono orgánico (CO) del suelo (Franzluebbers *et al.*, 1999; Dexter, 2004). Si bien, estas labranzas conservacionistas son importantes para reducir la degradación del suelo, en algunas situaciones pueden también conducir a un exceso de compactación, (Ferrerías *et al.*, 2000; Schjøning & Rasmussen, 2000; Fabrizzi *et al.*, 2005) aumentando la resistencia a la penetración y en algunos casos la densidad aparente del suelo (Álvarez *et al.*, 2004; Díaz Zorita *et al.*, 2002a) atribuible a la ausencia de remoción del suelo, sumado al efecto compactante derivado del pasaje de maquinarias (Botta *et al.*, 2004).

La biomasa producida por unidad de agua consumida expresa la eficiencia con la cual un órgano o un cultivo fijan carbono en relación con el agua evapotranspirada y, se define como EUA. En la región centro de la provincia de Santa Fe la EUA promedio para la producción de grano de trigo fue de $8,5 \text{ kg_gr mm}^{-1}$ de agua consumida o evapotranspirada (ETc), si bien se pueden alcanzar elevadas eficiencias en el uso del agua que está acumulada en el suelo (Villar, 2010). Ensayos de variedades de trigo conducidos durante varios años en campos de productores en el sudeste de Córdoba y sur de Santa Fe, han permitido medir eficiencias de entre 10 y 15 kg_gr mm^{-1} de agua total utilizada por el cultivo medida hasta 1,5 m. Para el caso de trigo, tanto el cultivo antecesor como el sistema de labranza modificarán la acumulación de agua en el suelo durante el final del verano y el otoño y, por lo tanto, la disponibilidad hídrica inicial del cultivo (Fraschina *et al.*, 2005).

Otra variable importante es el momento en que ocurre un déficit de agua. Si el mismo ocurre alrededor de floración afectará el NG, mientras que si el déficit se produce después de floración lo que se afectará es el peso de los mismos (Miralles *et al.*, 2003).

El desarrollo del sistema radical es uno de los factores más importantes en la captación y EUA al incidir sobre la relación transpiración/evaporación (Amir *et al.*, 1991). Otro factor tendiente a optimizar esta relación es la cobertura del suelo, que, al reducir las pérdidas por evaporación incrementa la EUA (Prasad & Power, 1991).

La EUA resulta condicionada por la disponibilidad de N del cultivo durante su ciclo. El contenido de NO_3 a la siembra es un aspecto a considerar, pero no menos importante es el N que el suelo puede aportar por mineralización durante el período siembra-floración. En dicha etapa el cultivo normalmente consume el 80% del total del N requerido. Por ello, la

estrategia de manejo del agua no puede limitarse sólo a captarla y almacenarla, sino que desde un manejo estratégico de la nutrición existe la posibilidad de influir sobre la EUA (Quiroga *et al.*, 2003).

El Nitrógeno (N) es el principal elemento requerido para la producción de los cultivos de granos. Deficiencias de este nutriente reducen la expansión foliar, provocan su prematura senescencia y afectan la tasa fotosintética, dando como resultado una menor producción de MS y grano (Echeverría *et al.*, 2005). Villar (1999) señala que la absorción de N en el cultivo de trigo es muy baja en sus primeras etapas de desarrollo y que una inadecuada sincronización entre la oferta (suelo+fertilizante) y la demanda es una de las causas de baja eficiencia de uso. Esto es particularmente importante en situaciones donde el costo de la aplicación de fertilizante llega a representar la tercera parte de los costos de producción del cultivo. Este autor indica además que existen estudios que muestran diferencias genotípicas en la absorción temprana de N en trigo. La eficiencia más alta está asociada con una B aérea y radical mayor (Golik & Chidichimo, 2007).

La respuesta a la fertilización se relaciona en forma directa con la demanda del nutriente, la cual se incrementa al aumentar el Rdto potencial. Por este motivo, aquellos factores que reducen la expectativa de Rdto, reducen también la eficiencia de uso del N (EUN) expresado.

Ambos factores, agua y N, condicionarían además la eficiencia de uso de la radiación (EUR). Al respecto, Castellarín *et al.* (2007) señalan que son escasos los estudios que reportan las diferencias en la EUA y la EUR entre distintos genotipos de trigo según la disponibilidad de N.

Golik y Chidichimo (2007), informan acerca de descensos en la concentración de nutrientes en los tejidos de los cultivos en respuesta a reducciones de enraizamiento a causa de la compactación. La menor absorción de nutrientes en un suelo compactado puede ser compensada por una absorción más alta en otras partes del perfil con condiciones favorables.

En lo que respecta al N se producen modificaciones en su dinámica, entre las que se destacan la menor tasa de mineralización de N orgánico, alteración de las propiedades hídricas del suelo y del estado de aireación del suelo, lo cual contribuye a pérdidas de N por desnitrificación (Rodríguez & Giambiagi, 1995).

La eficiencia de uso del N (EUN) por el cultivo puede ser definida en base a la producción de la biomasa total (B) o de granos (G). La EUN y sus componentes, la eficiencia fisiológica (EF) y la eficiencia de recuperación (EFR), constituyen un aspecto clave a

considerar en el manejo del N. Novoa y Loomis (1981) definieron a la EUN y sus componentes de la siguiente manera: (i) $EUN_{B \text{ o } G} = \text{kg}_{B \text{ o } G} / \text{kgN disponible}$ (ii) $EFN_{B \text{ o } G} = \text{kg}_{B \text{ o } G} \text{ total producido} / \text{kgN absorbido}$ (iii) $EFR_{N \text{ B o } G} = \text{kgN absorbido en B o G} / \text{kgN disponible}$.

La eficiencia fisiológica con la que las plantas utilizan el N (EFN) depende de las características de la especie y la disponibilidad de N. Para el trigo la EFN media está alrededor de $30 \text{ kg}_{gr} \text{ kgN}_{abs}^{-1}$ (kg de granos por kg de N absorbido). Los coeficientes de requerimientos de N que se utilizan en los modelos de balance son la inversa de esta eficiencia, lo que da para trigo unos 30 a 35 kgN tn_{gr} (Echeverría & Videla, 1998). En cuanto a la eficiencia de absorción o recuperación del N, el otro componente de la EUN, es muy variable de acuerdo a las condiciones edafo-climáticas, del manejo del suelo, demanda del cultivo y disponibilidad de N (N del suelo, mineralizado y aplicado con el fertilizante).

En tal sentido, la utilización de prácticas de manejo que permitan mejorar la eficiencia de uso de N (EUN), producirían un gran impacto en los sistemas productivos con implicancias sobre la sustentabilidad y la calidad del recurso suelo (Keeney, 1982; Meisinger & Randall, 1991).

Por lo hasta aquí expuesto, el presente trabajo tuvo como objetivo aportar información que contribuya a entender los efectos residuales de la descompactación del suelo y de la fertilización nitrogenada sobre la calidad física del suelo y su relación con las variables eficiencias de uso del agua, radiación y N y el Rdto en el cultivo de trigo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1- Caracterización agrometeorológica

En la Tabla 2-1 se presentan las precipitaciones que caracterizaron cada una de las campañas de trigo. Si comparamos las lluvias registradas desde un mes antes de la siembra y durante el ciclo del cultivo hasta el mes de noviembre, si bien durante noviembre las lluvias no afectan al cultivo por encontrarse próximos a madurez fisiológica, con respecto a la media de los últimos 15 años -para el mismo período-, podemos diferenciar distintos escenarios desde el punto de vista hídrico. La C1 y la C3 presentaron valores de precipitaciones por encima de la media histórica, mientras que la C2 estuvo muy por debajo, indicando condiciones de escasa oferta hídrica proveniente de las lluvias.

Tabla 2-1. Lluvias (mm) desde mayo a noviembre para las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3). Promedio histórico (1998 a 2011) y diferencia en mm con respecto al promedio histórico [Dif.(+ -) H].

Mes	C1	C2	C3	Histórico (1998/2011)
mayo	24	56	66	51
junio	13	5	42	39
julio	68	10	13	26
agosto	3	8	32	30
septiembre	90	68	42	55
octubre	87	36	186	105
noviembre	210	54	143	139
Total	495	237	524	446
Dif.(+)-H	49	-209	78	

Desde el punto de vista de la generación del Rdto el ciclo del trigo se puede dividir en tres períodos: i) el de expansión del área foliar, ii) el de crecimiento de las espigas (PCE) y, iii) el de llenado de granos. El primer período comienza con la emergencia, abarcando el macollaje del cultivo hasta mediados de encañazón (E-ME). Durante el segundo período las espigas (sin incluir granos) ganan la mayor parte del peso seco que alcanzan una semana después de anthesis, cuando queda definido el NG m⁻² (Abbate & Cantarero, 2007), el cual se delimitó desde ME (Z3.4) hasta A+7d (anthesis más siete días) (Z7.05) y, por último, el período de llenado de granos donde se define el peso de los mismos (Tabla 2-2).

En cuanto a la caracterización climática (Tabla 2-3) para la C1 podemos decir que las condiciones fototermales fueron favorables para lograr altos rendimientos. Temperaturas moderadas para la época durante el PCE y una oferta de radiación un 5 y 25% superior con respecto al promedio histórico en el mes de septiembre y octubre respectivamente, determinaron valores de cociente fototermal (Q) [$Q = RFA_i / (T_m - T_b)$], donde: RFA_i= radiación fotosintéticamente activa incidente, T_m= temperatura media, T_b= temperatura base] de 0,98 MJ m⁻² día⁻¹ °C⁻¹, tomando una T_b para el intervalo definido como crítico de 4,5 °C (Fischer, 1985). Sin embargo, los últimos días de octubre se registraron temperaturas máximas por encima de los 36 °C que hicieron que el Q disminuya (Figura 2-1 y 2-2), incidiendo en la etapa de llenado efectivo del grano. Ambientes de menor calidad por menores valores de Q probablemente resultan en menores rendimientos. Esto ha sido confirmado por varios autores (Fischer, 1985; Caviglia *et al.*, 2001; Lázaro & Abbate, 2012), que indican que el Q da cuenta de la mayor parte de las variaciones en el Rdto potencial del trigo.

Tabla 2-2. Detalle de fechas de ocurrencia de las distintas etapas fenológicas del cultivo de trigo para las campañas 2009, 2010 y 2011. Fecha de siembra (FS). DDE: días desde la emergencia del cultivo. Duración de las etapas en días: desde emergencia a mediados de encañazón (E-ME), período de crecimiento de la espiga (PCE) y llenado de granos (LL). Tiempo térmico TT ($^{\circ}\text{C día}^{-1}$), temperatura base (Tb, $^{\circ}\text{C}$) y sumas térmicas durante el ciclo del cultivo.

E. fenológico	Trigo 2009 FS: 3/06/2009					Trigo 2010 FS: 11/06/2010					Trigo 2011 FS: 16/06/2011				
	Z3.1	Z3.4	Z6.5	Z7.05	MF	Z3.1	Z3.4	Z6.5	Z7.05	MF	Z3.1	Z3.4	Z6.5	Z7.05	MF
Fecha ocurrencia	24-ago	18-sep	13-oct	20-oct	13-nov	06-sep	21-sep	15-oct	22-oct	19-nov	09-sep	23-sep	16-oct	21-oct	12-nov
DDE (días)	74	99	122	129	153	79	94	118	123	151	78	89	112	117	139
Etapas	E-ME		PCE		LL	E-ME		PCE		LL	E-ME		PCE		LL
Duración etapas (días)	99		32		24	94		31		28	89		28		22
TT ($^{\circ}\text{C día}$)	980		383		313	844		395		309	824		388		270
Tb $^{\circ}\text{C}$	3,3		4,5		8,9	3,3		4,5		8,9	3,3		4,5		8,9
Suma térmica ciclo			1676 $^{\circ}\text{C día}$					1548 $^{\circ}\text{C día}$					1482 $^{\circ}\text{C día}$		

Tabla 2-3. Temperatura media (Tx, $^{\circ}\text{C}$) y radiación fotosintéticamente activa incidente (Rad, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), promedio mensual e histórico (1934-2009) para las campañas de trigo 2009, 2010 y 2011.

	2009		2010		2011		Histórico	
	Tx	Rad	Tx	Rad	Tx	Rad	Tx	Rad
junio	11,6	5,2	12,5	4,4	12,2	3,8	12,9	4,1
julio	10,5	5,4	10,7	5,6	11,8	4,6	12,1	4,4
agosto	16,1	6,9	12,1	8,3	12,5	6,3	13,1	5,8
setiembre	13,6	8,2	15,7	8,6	17,2	9,1	15,6	7,8
octubre	19,2	11,5	17,7	11,2	18,5	9,6	18,7	9,2
noviembre	24	10,6	21,6	12,2	24,4	12,1	21,5	11,0

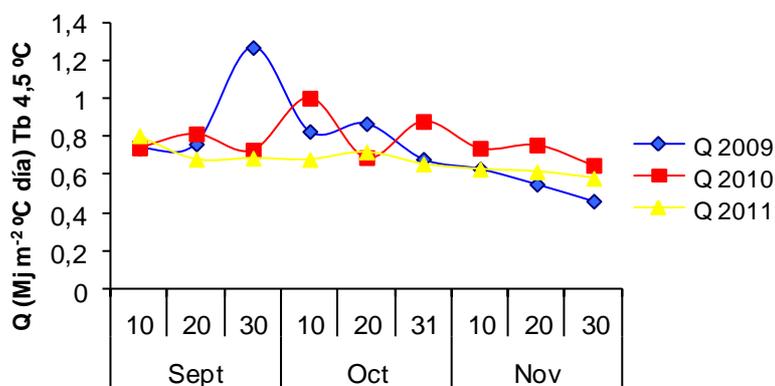


Figura 2-1. Cociente fototermal (Q) durante el período crítico y llenado de granos del cultivo de trigo en campañas 2009, 2010 y 2011.

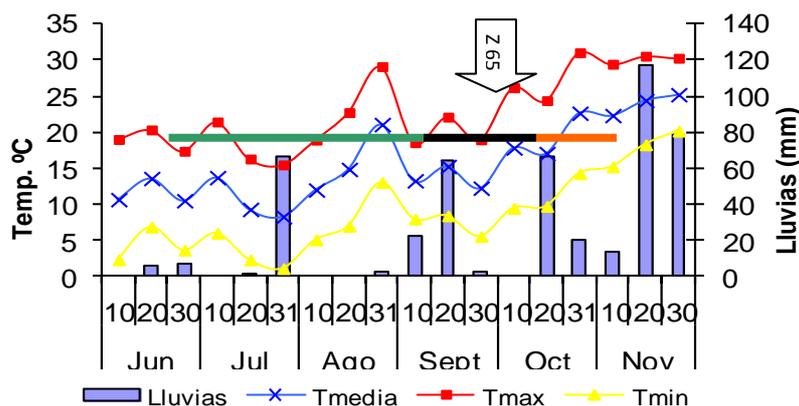


Figura 2-2. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas (Temp.; Tmedia, Tmáx y Tmín) y de las precipitaciones (Lluvias) durante el ciclo del cultivo de trigo 2009 (C1). La flecha indica la etapa fenológica de antesis (Z6.5, 50% de anteras visibles).

Las precipitaciones de principios de otoño fueron muy deficitarias (44,7 mm) y la consecuencia fue la escasa reserva de agua útil en el perfil, con valores dentro del rango de los 165 a 183 mm de agua útil hasta 1,6 m de profundidad -según los tratamientos medidos antes de la siembra-. En la 'etapa I' -el período de expansión foliar- la situación fue algo deficitaria y promediando la 'etapa II' -crítica de encañazón del cultivo- no presentó estrés hídrico hasta antesis e inicio de llenado de granos; para luego, en la 'etapa III' -efectiva de llenado- volver a condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas (Figura 2-2).

En la C2 las lluvias durante el inicio del otoño fueron escasas, pero debido a los elevados registros estivales las reservas edáficas a la siembra fueron muy buenas (239 a 256 mm de agua útil hasta 1,6 m de profundidad). Esta situación permitió que, a pesar de la escasez de las lluvias durante los meses de invierno, no se manifiesten síntomas de estrés hídrico durante el período de crecimiento vegetativo hasta el regreso de las primeras precipitaciones de comienzos de septiembre (Figura 2-3).

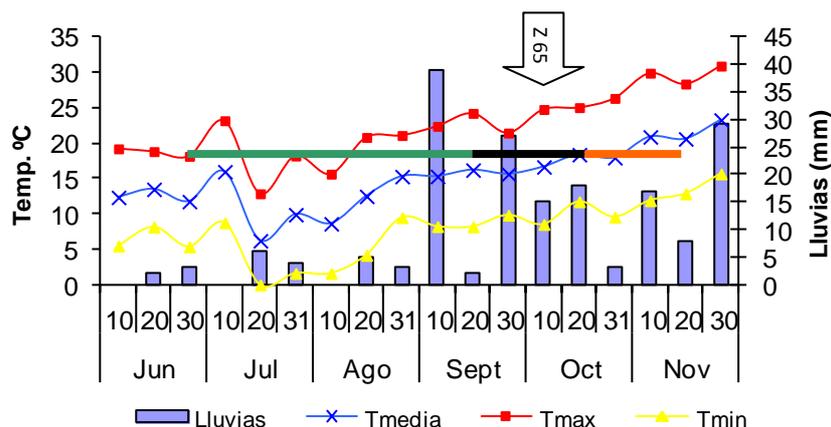


Figura 2-3. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas (*Temp.*; *Tmedia*, *Tmáx* y *Tmín*) y de las precipitaciones (*Lluvias*) durante el ciclo del cultivo de trigo 2010 (C2). La flecha indica la etapa fenológica de antesis (Z6.5, 50% de anteras visibles).

El balance general indicó un año con una oferta hídrica escasa, con demandas de agua del cultivo insatisfechas en el período de llenado de grano. Esta última etapa es de menor importancia relativa, ya que se define el componente de Rdto menos relevante (peso unitario de los granos), mientras que el número de granos, que se determina durante el PCE, contó con una adecuada oferta hídrica.

En la Tabla 2-2 se puede observar que la duración el PCE fue similar entre las C1 y C2 y, levemente menor en la C3.

La temperatura media alrededor de antesis estuvo entre 15 y 18 °C (Figura 2-3), valores reportados como óptimos para la definición del NG por espiga (Calderini *et al.*, 1999; Wardlaw *et al.*, 1989; Ferris *et al.*, 1998). Las condiciones fototermales fueron favorables para lograr altos rendimientos, con temperaturas moderadas e inferiores a las esperadas para la época durante el PCE y una oferta de radiación alta. Dicha situación permitió lograr altos Q, con $Q = 0,81 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \text{ °C}^{-1}$, al igual que durante la etapa de llenado donde los valores de Q fueron superiores a las campañas C1 y C3 (Figura 2-1). Por lo tanto, ubicar el período crítico en el mes de octubre (mes de mayor Q, s peligro de heladas) significó colocar al cultivo en mejores condiciones para la obtención de altos rendimientos. Sin embargo, no siempre las variaciones de rendimientos en trigo en condiciones no potenciales (sin riego) se deben sólo a variaciones en el Q (Magrin, *et al.*, 1993).

Durante la C3 se obtuvieron los menores valores de Q ($Q= 0,69 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1} \text{ °C}^{-1}$) con respecto al resto de las campañas para el PCE (Figura 2-1). Este valor coincide con el valor medio para la zona de Rafaela (distante 50 km al oeste del lugar de realización del ensayo), informado por Villar & Astegiano (2004) para el período 15/9 al 10/10, donde ocurre el período crítico del trigo en dicha región.

Las lluvias de fin del verano y otoño permitieron comenzar el ciclo del cultivo con una buena reserva de agua útil en el perfil (255 a 273 mm hasta 1,6 m de profundidad) (Figura 2-4). Desde la siembra hasta encañazón las lluvias fueron escasas, aunque la oferta de agua fue cubierta por las reservas del suelo hasta la etapa inicial del PCE. Desde antesis en adelante las lluvias fueron buenas, con registros abundantes a fines de octubre las cuales permitieron recomponer las reservas y llegar al fin del ciclo con buena disponibilidad hídrica. Esto último no se tradujo en mayores rendimientos con respecto a las campañas anteriores, tema que será abordado más adelante.

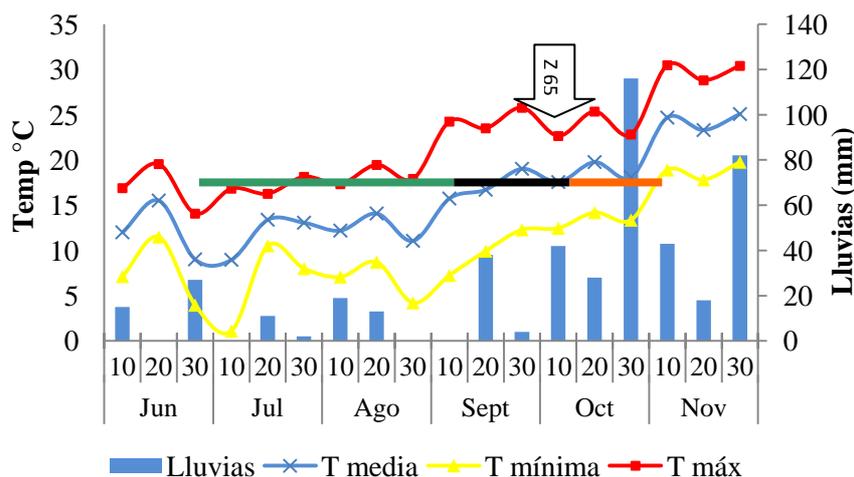


Figura 2-4. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas ($Temp.$; T_{media} , $T_{máx}$ y $T_{mín}$) y de las precipitaciones ($Lluvias$) durante el ciclo del cultivo de trigo 2011 (C3). La flecha indica la etapa fenológica de antesis (Z6.5, 50% de anteras visibles).

2- Balance hídrico

Los datos de la Tabla 2-4 caracterizan el ambiente general de desarrollo y crecimiento del cultivo. Corresponde al período comprendido entre la siembra (3, 11 y 16 de junio) y la madurez fisiológica del cultivo (13, 19 y 12 de noviembre) para las C1, C2 y C3, respectivamente.

Tabla 2-4. Condiciones ambientales durante el desarrollo del cultivo de trigo en las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3). Precipitación efectiva (Pe); evapotranspiración de referencia (ETo); coeficiente de cultivo (Kc); evapotranspiración de cultivo (ETc); déficits o excesos hídricos (Def. o Exc.).

	Meses	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Total
C1	Pe (mm)	19	44,3	0,4	61,9	58,2	109	292
	ETo (mm)(*)	43,1	65,6	105	83,6	148	94,1	538
	Kc (**)	0,3	0,4	0,75	1	1,15	0,25	
	ETc (mm)	12,9	26,2	78,9	83,6	170	23,5	376
	Déf. o Exc. (mm)(***)	6,1	18,0	-78,0	-21,7	-111	86	-100
	Meses	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Total
C2	Pe (mm)	5	10	8	68	36	25	158
	ETo (mm)(*)	38,2	45,3	62,3	78,9	126	99,4	451
	Kc (**)	0,3	0,4	0,75	1,0	1,15	0,25	
	ETc (mm)	11,4	18,1	46,5	78,9	145	24,8	324
	Déf. o Exc. (mm)(***)	6,4	-8,1	-38,5	-10,9	-109	0,2	-167
	Meses	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Total
C3	Pe (mm)	27	13,1	32	34,4	166	52	324
	ETo (mm)(*)	20,6	52,5	79,4	136	131	120	536
	Kc (**)	0,3	0,4	0,75	1,0	1,15	0,25	
	ETc (mm)	6,2	21	59,5	136	150	29,8	403
	Déf. o Exc. (mm)(***)	21,2	-8	-27	-102	16	22,2	-78

(*) Calculado por el método de Penman-Monteith.

(**) Fuente: Estudio FAO (2000), Riego y Drenaje, 33.

(***) Déf. o Exc. = Pe-ETc.

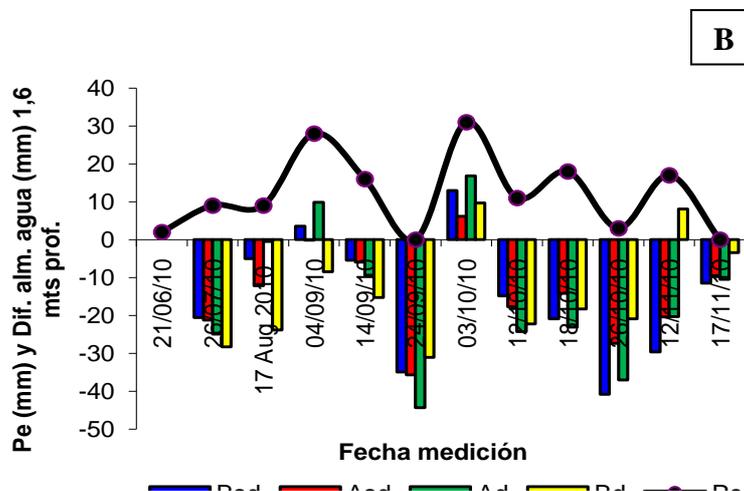
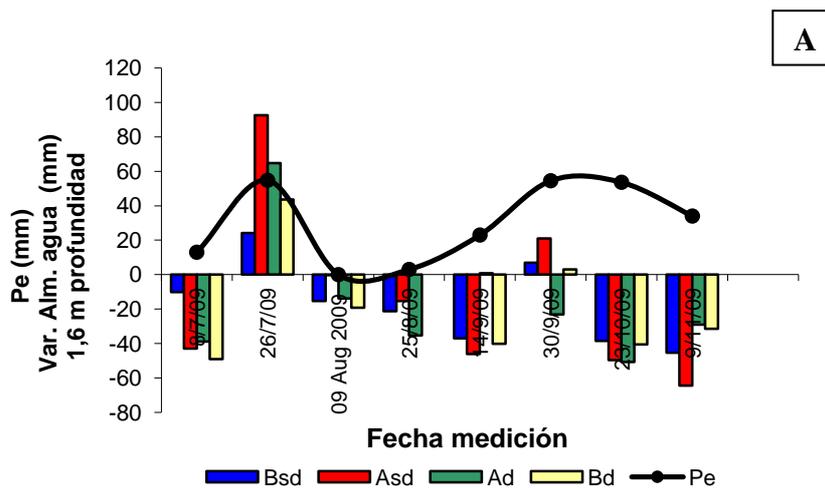
La ETc será máxima cuando el cultivo esté plenamente abastecido de agua y nutrientes. Su determinación puede ser realizada con métodos indirectos (Allen *et al.*, 2006) como el producto de la ETo por el Kc único o dual. Estos coeficientes fueron determinados en una diversidad de ambientes y cultivos.

El requerimiento hídrico durante el ciclo del cultivo de trigo representado por la ETc fue de 376, 324 y 403 mm en tanto que la Pe fue de 291, 158 y 324 mm para las C1, C2 y C3,

respectivamente. El balance de agua para todo el ciclo (Pe-ETc) fue negativo en todas las campañas, donde la C2 mostró el mayor déficit (-167 mm) (Tabla 2-4). Estimaciones sobre la evolución de la demanda promedio de consumo para el cultivo con una serie de 22 campañas (1973/94) mostraron un déficit promedio de 161 mm de lluvias durante el ciclo (Villar, 2010).

El agua almacenada a la siembra en el perfil del suelo, la distribución de las lluvias y los momentos de ocurrencia de los déficits o excesos de agua son los que impactaron en mayor o menor medida sobre el crecimiento y componentes del Rdto como se discutirá más adelante.

La ETcaj representa el consumo de agua en las condiciones del ensayo, la cual se calculó para cada tratamiento como $ET_{caj} = Pe \pm \Delta Alm$; donde: Pe= precipitación efectiva acumulada entre intervalos de medición y ΔAlm = variación del almacenaje de agua en el suelo para los intervalos de medición de humedad hasta 1,6 m de profundidad (Figura 2-5).



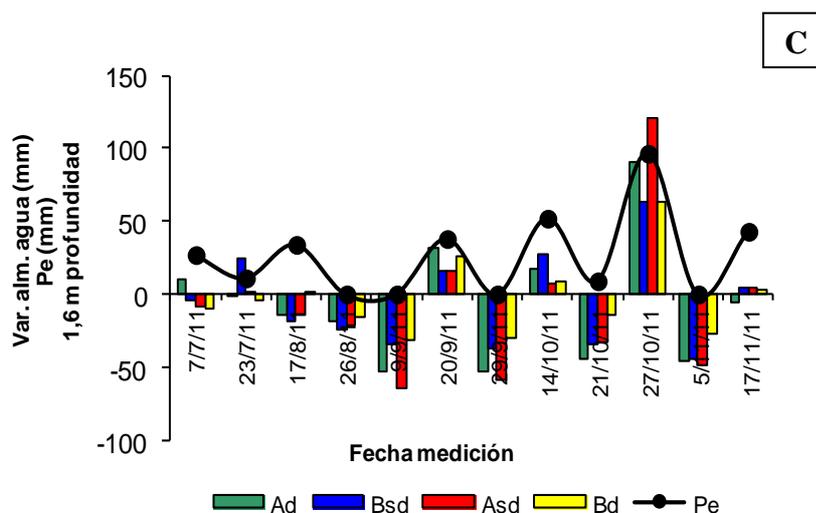


Figura 2-5. Variación del almacenaje de agua total del suelo (Var. Alm. Agua) y precipitación efectiva acumulada (Pe) en función de los intervalos de medición para las campañas de trigo 2009 (A), 2010 (B) y 2011 (C) según los tratamientos alta fertilización descompactado (Ad), baja fertilización sin descompactar (Bsd), alta fertilización sin descompactar (Asd) y baja fertilización descompactado (Bd).

En todas las campañas en general, la ETcaj estimada para cada tratamiento (Tabla 2-5) fue similar o cercana a los requerimientos de agua del cultivo estimados (ETc) (Tabla 2-4). Este aspecto también fue señalado por Camussi & Marano (2008), denotando la coincidencia entre ETcaj y ETc cuando se analiza todo el ciclo del cultivo, debido principalmente al aporte de agua almacenada en el suelo. El análisis de los datos de ETcaj mostró que no hubo diferencias significativas según NF y NC ni interacciones significativas; solo diferencias según el año ($P < 0,05$). En la C3 se lograron los mayores valores de ETcaj, con 370,8 mm y en la C2 se obtuvieron los menores valores (318,8 mm).

Estos datos concuerdan con los citados por Albarenque *et al.* (2010), quienes para un suelo molisol simularon la ETcaj durante el período de crecimiento de un trigo de ciclo largo calcularon, en promedio, 361 mm de ETcaj. Marano *et al.* (2004), para trigos de ciclo largo sembrados en Esperanza Santa Fe, midieron ETcaj de 378 mm y Caviglia *et al.* (2004) para trigos de ciclo corto en Paraná, 313 a 334 mm de ETcaj.

Tabla 2-5. Evapotranspiración ajustada o real del cultivo de trigo (ETcaj) para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) según nivel de fertilización (A= alta y B= baja), nivel de compactación (d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones.

		Etcaj (mm)
NF	A	352,6 a
	B	347,5 a
NC	d	349,7 a
	sd	350,4 a
Año 2009		360,4 b
2010		318,8 a
2011		370,8 c
Análisis de la varianza		
NF		ns
NC		ns
Año		<0.0001
NF*NC		ns
NF*Año		ns
NC*Año		ns
NF*NC*Año		ns

ns: no significativo ($P > 0,05$) según el test LSD.

3- Condiciones químicas y físicas del suelo

3-1. Determinaciones químicas

Los resultados de P asimilable, %MO, N total, S-SO₄, N-NO₃ y pH al inicio de cada campaña de trigo sobre rastrojo del antecesor soja, pueden observarse en la Tabla 2-6.

Los valores de MO fueron medio-bajo para la zona según Conti (2000) sin diferir entre los niveles de los factores principales (C y F) y años. El contenido de P varió entre 7,3 a 10,6 ppm sin diferencias significativas según NF, NC y entre años, manteniéndose por debajo de los valores considerados críticos para trigo -entre 14 y 19 ppm- (Barberis *et al.*, 1987; Echeverría & García, 1998; Ron & Loewy, 2000; Echeverría *et al.*, 2005; García, 2002).

No se realizó fertilización con fuente azufrada. El S presentó valores entre 10 y 11 ppm valores próximos al nivel crítico de 10 mg kg⁻¹ definido por Johnson & Fixen (1990), si bien los niveles de S-sulfatos en suelo en pre-siembra no se han podido asociar con las respuestas en rendimiento (García *et al.*, 2010).

La disponibilidad de N del suelo en pre-siembra (N-NO₃⁻) a 60 cm de profundidad estuvo por debajo de los niveles citados como críticos, de 92 kg ha⁻¹ para centro y sur de Santa Fe para trigos de 3500 a 4000 kg ha⁻¹ de rendimiento (Salvagiotti *et al.* 2004), en ambos

niveles de fertilización y compactación del suelo sin diferencias estadísticas. En 2011 la disponibilidad de N fue mayor con respecto a C1 y C2 ($P < 0,05$) pudiéndose deber a un mayor aporte de N por mineralización del rastrojo de soja del cultivo antecesor, debido al estrés hídrico que sufrió el cultivo durante el llenado de grano que pudo afectar la removilización de N y la calidad del rastrojo con una menor relación C/N.

La oferta de N ($N_{\text{suelo}} + N_{\text{mineralizado}} + N_{\text{aportado como fertilizante}}$) y fósforo, fue de 138-14, 125-10 y 130-20 kgN o P ha^{-1} para los tratamientos de alta fertilización; mientras que en los de baja fertilización la oferta de N y P fue de 110-7, 95-5 y 105-0 kgN o P ha^{-1} para las C1, C2 y C3, respectivamente.

En la figura 2-6 se presenta la evolución del P en los 20 cm de profundidad del suelo para la secuencia de cultivos T/S-T/S-T y al final del ensayo luego de la cosecha del trigo 2011.

El valor inicial de P medido antes de la siembra de soja 2008 fue de 7,3 ppm (valor no representado en la figura ya que corresponde a una muestra de suelo compuesta para todo el ensayo), en el inicio de la C2: Trigo 2010 se obtuvieron los menores valores de P en el nivel de baja fertilización debido a los altos rendimientos del cultivo antecesor soja (C2: 2009/10) donde el fósforo extraído en grano fue mayor que al aplicado con fertilizante, obteniendo el resto del suelo. Al final del ensayo el nivel de P aumentó un 94% y 9,5% para el nivel de alta y baja fertilización respectivamente, con respecto al nivel inicial, debido al balance positivo de P para la campaña de soja C1 y C3 por los bajos rendimientos obtenidos, siendo mayor el nivel de residualidad del P en el NF A debido al mayor aporte de P a la siembra de soja y la suma del efecto residual de P aportado a la siembra de trigo, logrando una mayor reposición de P al suelo. En soja, dosis de 20 kg P ha^{-1} pueden lograr un balance casi neutro, o positivo con dosis de 24 a 30 kg P ha^{-1} . Aplicaciones de 40 kg P ha^{-1} para la región centro de Santa Fe, mostraron una mayor reposición de P al suelo (Gutiérrez Boem & Salvagiotti, 2014). En el presente ensayo la suma del aporte de P aplicado a trigo y soja estuvo entre 36 a 46 kg P ha año^{-1} para el nivel alto y entre 14 a 20 kg P ha año^{-1} para el nivel bajo de fertilización, logrando en ambos casos aumentar el P en el suelo (Figura 2-6).

Tabla 2-6: Análisis de la varianza para Materia orgánica (%MO), fósforo extractable (P), azufre (S-S04), nitrógeno de nitratos (kg N ha^{-1}), nitrógeno total (Nt%) y pH al inicio de cada campaña de trigo [2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3)] según los factores principales C (compactación) y F (fertilización) en sus dos niveles d y sd (descompactado y sin

descompactar), alta y baja (A y B) respectivamente y sus interacciones. Profundidad de muestreo: 0-20 cm, $N-NO_3^-$ (0- 60 cm).

		MO (%)	P (ppm)	S-S04 (ppm)	Nt (%)	N-NO3 (kg ha ⁻¹)	pH
NF	A	2,5 a	9,9 a	11,7 a	0,147 a	59,3 a	6,2 a
	B	2,5 a	7,7 a	10,3 a	0,148 a	64,4 a	6,2 a
NC	d	2,5 a	9,6 a	10,9 a	0,146 a	61,7 a	6,2 a
	sd	2,5 a	7,9 a	11,1 a	0,148 a	62,5 a	6,2 a
Año	C1 2009	2,4 a	7,9 a	11,5 a	0,145 a	60,3 a	6,2 a
	C2 2010	2,6 a	7,3 a	9,8 a	0,147 a	49,8 a	6,2 a
	C3 2011	2,6 a	10,6 a	11,7 a	0,150 a	76,7 b	6,3 a

Análisis de la varianza

NF	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Año	ns	ns	ns	ns	*	ns
NF*NC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC*Año	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*NC*Año	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias entre tratamientos según el test LSD ($P \leq 0,05$).

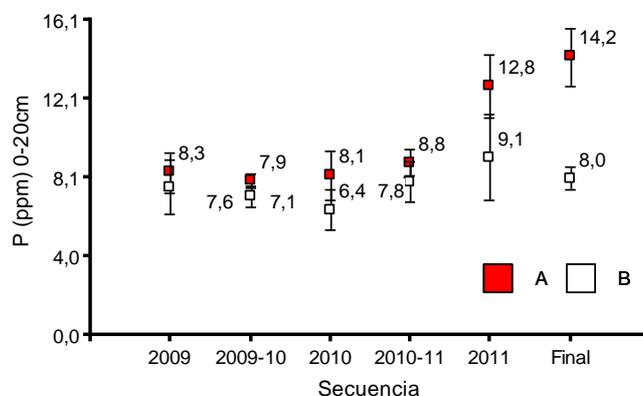


Figura 2-6: Evolución del fósforo extractable (P) en ppm, según nivel de fertilización A o B en la secuencia de cultivo trigo 2009; soja 2009/10, Trigo 2010, soja 2010/11, trigo 2011 y final ensayo. Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

3-2. Cambios en las propiedades físicas del suelo

En la Tabla 2-7 se presenta el análisis de la varianza de Ds, RP, Pa y Dsr a dos profundidades, superficial (sup, 0-7 cm) y sub-superficial o profunda (prof, 8-13 cm). Los

valores de RP corresponden a θ_{CC} , donde el suelo tiene la máxima capacidad de retención de agua y los valores de resistencia mecánica son mínimos. Dichos parámetros fueron evaluados para cada tratamiento durante las tres campañas, antes de la siembra de trigo sobre rastrojo de soja.

Tabla 2-7. Densidad de suelo (D_s), densidad de suelo relativa (D_{sr}), resistencia a la penetración (RP) y porosidad de aireación (Pa) a dos profundidades [superficial (*sup*, 0-7 cm) y profunda (*prof*, 8-13 cm)] para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) según nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) y nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) y sus interacciones. ANOVA= análisis de la varianza.

		D_s (g cm ⁻³)		RP (MPa)		Pa (%)		Dsr (%)	
Profundidad		(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)	(0-7 cm)	(8-12 cm)
NF	A	1,32 a	1,39 a	1,84 a	2,19 a	18,3 a	12,6 a	0,87	0,91 a
	B	1,33 a	1,39 a	1,90 a	2,11 a	18,8 a	12,9 a	0,86	0,91 a
NC	d	1,29	1,36 a	1,54	1,80	20,20	14,3 b	0,84	0,89 a
	sd	1,35	1,42 b	2,30	2,55	17,00	11,2 a	0,89	0,93 b
Año	2009	1,29	1,40 a	1,73	2,23	20,40	12,6 a	0,85	0,92 a
	2010	1,36	1,37 a	2,07	2,25	17,21	12,0 a	0,89	0,92 a
	2011	1,31	1,37 a	1,96	2,05	18,14	13,6 a	0,86	0,90 a
Análisis de la varianza									
NF		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC		<0,0001	0,0005	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0006
Año		<0,0001	ns	<0,0001	ns	<0,0001	ns	0,0015	ns
NF*NC		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC*Año		0,0004	ns	0,0003	0,0003	<0,0001	ns	0,015	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns= no significativo ($P > 0,05$).

La D_s , Pa y Dsr a nivel prof sólo presentaron diferencias por efecto del NC, donde los tratamientos d lograron mejores condiciones físicas con respecto a los sd, siendo la D_s y Dsr un 4,3 y 4,2% inferior respectivamente y la Pa un 27% superior (Tabla 2-7).

Se detectaron interacciones significativas entre NC*Año para las variables de suelo D_s , Pa y Dsr a nivel sup y RP sup y prof. No se manifestó el efecto combinado de los factores

(NF*NC), por lo cual la fertilización no modificó significativamente el NC del suelo en las tres campañas de trigo analizadas.

De la apertura de la interacción NC* Año se observa en las Figuras 2-7 y 2-8 que los tratamientos d en C1: 2009 presentaron mejor condición física ya que la Ds, RP y Dsr (sup) fueron un 9.5, 48 y 10% inferiores con respecto sd respectivamente, y la Pa (sup) un 37% superior, mostrando una respuesta residual a la descompactación significativa y de mayor magnitud con respecto a C2: 2010 y C3: 2011, donde las variables de suelo Ds, Dsr a nivel superficial no manifestaron diferencias significativas según el NC; en tanto que la RP -sup y prof- (Figura 2-8) fue inferior en los tratamientos d con respecto a los sd en un 15 y 20% en la C2 y al final del ensayo, en la C3 en un 27,6 y 21,7% respectivamente y la Pa (sup) un 11% superior en d vs sd (19,2 vs 17,1%) ($P < 0.05$).

Aunque algunas veces los resultados son contradictorios, muchos investigadores coinciden que en aquellos sistemas donde se perturba el suelo se consiguen mejores propiedades físicas (mayor macroporosidad y menor Ds) en la capa sometida a laboreo, que en la mayoría de los sistemas conservacionistas. Sin embargo, el efecto de la labranza sobre dichos parámetros puede ser transitorio, ya que por impacto de las gotas de lluvia el suelo puede recompactarse y disminuir la macroporosidad, lo cual tiene una influencia muy fuerte sobre el comportamiento del agua del suelo (Adeoye, 1982; Lindstrom & Onstad, 1984).

Los valores de residualidad reportados por Vilche *et al.* (2004) ponen de manifiesto la funcionalidad del escarificador después de un año y medio de haber sido efectuado permitiendo una mayor infiltración del agua en el suelo, mientras que Busscher *et al.* (2000) comprobaron que los efectos del subsolado fueron de corta duración, solo por una estación de cultivo sobre los rendimientos de soja y trigo.

En los suelos de la Pampa Ondulada, Puricelli & Legasa (1973), en experiencias de subsolado, mostraron que el efecto en el horizonte B textural no persiste por más de dos años por el elevado contenido de arcillas expandibles. Por otro lado, Mon (2007) evidenció que tratamientos de subsolado, aún después de tres años de aplicados, presentan incrementos productivos importantes. Twomlow *et al.* (1994) en suelos franco-arcillo-limosos encontraron residualidad de hasta 3 años en la densidad y resistencia de penetración del suelo luego del descompactado profundo, Varsa *et al.* (1997) como resultado de labranzas profundas a 0,4, 0,6 y 0,9 m con un subsolador reportaron residualidades de cuatro años sobre las mismas variables y suelos franco-limosos con mejoras en el rendimiento de maíz y, Fukunaka (1980) residualidades sobre el suelo de hasta cinco y seis años.

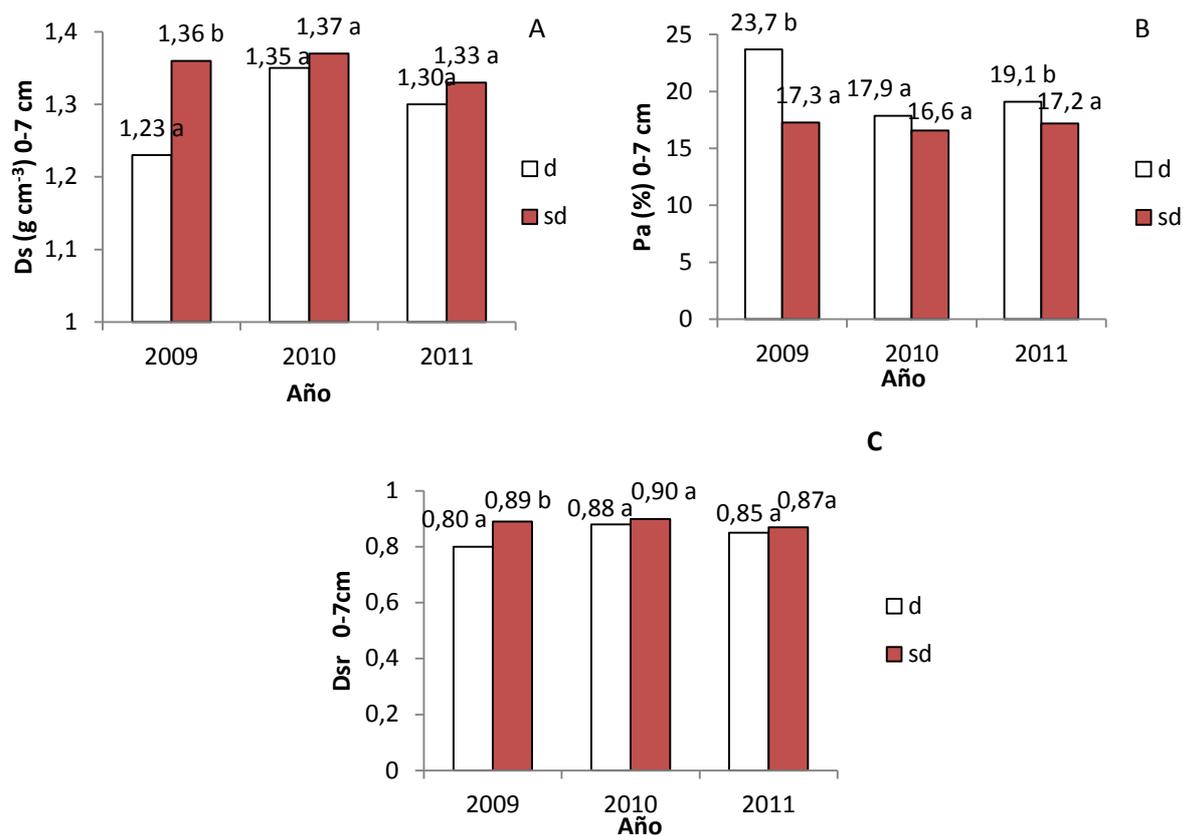
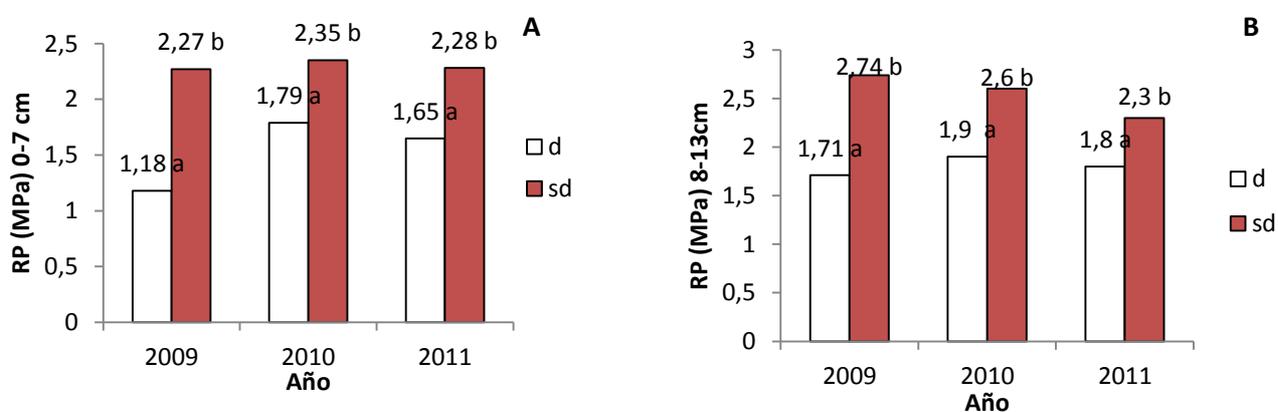


Figura 2-7: Análisis de las interacciones entre nivel de compactación y año (NC*Año). Densidad de suelo superficial (D_s sup) (A), porosidad de aireación superficial (P_a sup) (B), densidad de suelo relativa superficial (D_{sr} sup) (C) en función de las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) según nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar). Superficial: de 0-7 cm. Letras diferentes dentro de un mismo año indican diferencias entre NC según el test LSD ($P \leq 0,05$)



*Figura 2-8: Análisis de las interacciones entre nivel de compactación y año (NC*Año). Resistencia a la penetración superficial y profunda (RP sup y RP prof) (A y B) en función de las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) según nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar). Superficial: de 0-7 cm; profundo: de 8-13 cm. Letras diferentes dentro de un mismo año indican diferencias entre NC según el test LSD ($P \leq 0,05$)*

En la figura 2-9 se muestra los cambios a través del tiempo y según la secuencia de cultivos S-T/S-T/S-T de las variables de suelo Ds, RP y Pa sup y prof. Los suelos que fueron descompactados con paratill (d) incrementaron con el transcurso del tiempo la Ds y la RP y disminuyeron el %Pa tanto superficial como en profundidad en forma marcada desde S2008 hasta T2010 (a dos años del pasaje del paratill) para luego a partir de S2010-11 presentar cierta estabilidad hasta el final del ensayo. En tanto que los suelos sd mostraron estabilidad en los valores de Ds, RP y Pa sup y prof en los primeros años con tendencia de mejora al final del ensayo.

La Ds sup y prof en los suelos d aumentó un 7,4 y 3,4% y en sd disminuyó un 2,2 y 4,1% respectivamente desde S2008 hasta el final del ensayo llegando a valores similares a d, por lo cual la residualidad de la descompactación del suelo con paratill no se manifestó (Figura 2-8 A).

La RP sup y prof en los suelos d aumentó un 46 y 20% y en sd disminuyó 1,3 y 11,5% respectivamente desde S2008 hasta al final del ensayo, donde los valores en d (sup y prof) fueron un 27,3% y 21,7% inferiores con respecto sd respectivamente, manifestándose el efecto residual de la descompactación (Figura 2-8 B). Esto podría deberse al efecto de las raíces del trigo sobre el suelo en la secuencia trigo/soja. Gerster *et al.*, (2010) encontraron que tanto la inclusión de gramíneas en la secuencia como la descompactación mecánica disminuyeron la RP, manteniéndose el efecto residual hasta 3 años después de realizada la labor, sin encontrar efectos directos o residuales de la descompactación sobre el rendimiento del cultivo de soja.

Los tratamientos d presentaron desde S2008 los mayores valores de Pa sup y prof, para ir disminuyendo a través del tiempo en un 21,7 y 18,1% al final del ensayo respectivamente, sin llegar a ser limitantes según los valores críticos citados por Stirzaker *et al.* (1996), quienes consideraron adecuado un valor de 13% de Pa. En los suelos sd la Pa sup se mantuvo estable por encima de los valores críticos de 13% citado por Stirzaker *et al.*

(1996) y más recientemente por Kay *et al.* (2006) e Imhoff *et al.* (2010a), quienes indicaron valores cercanos o mayores a 15% de Pa. En tanto que la Pa prof mejoró desde el inicio (10,6%) hasta el final del ensayo (12,9%) en un 21,6%, siendo estos valores limitantes teniendo en cuenta los umbrales citados anteriormente (Figura 2-8 C).

El incremento de la Pa juega un papel preponderante para el desarrollo del sistema radical de los cultivos. La densidad radical del cultivo de trigo pudo determinar la existencia de bioporos. La formación de estos bioporos en suelos compactados ha sido bien documentada (Williams & Weis, 2004; Sasal & Andriulo, 2005) y su liberación, al descomponerse las raíces originarias, explicaría la disminución de la RP y el aumento en la Pa profunda.

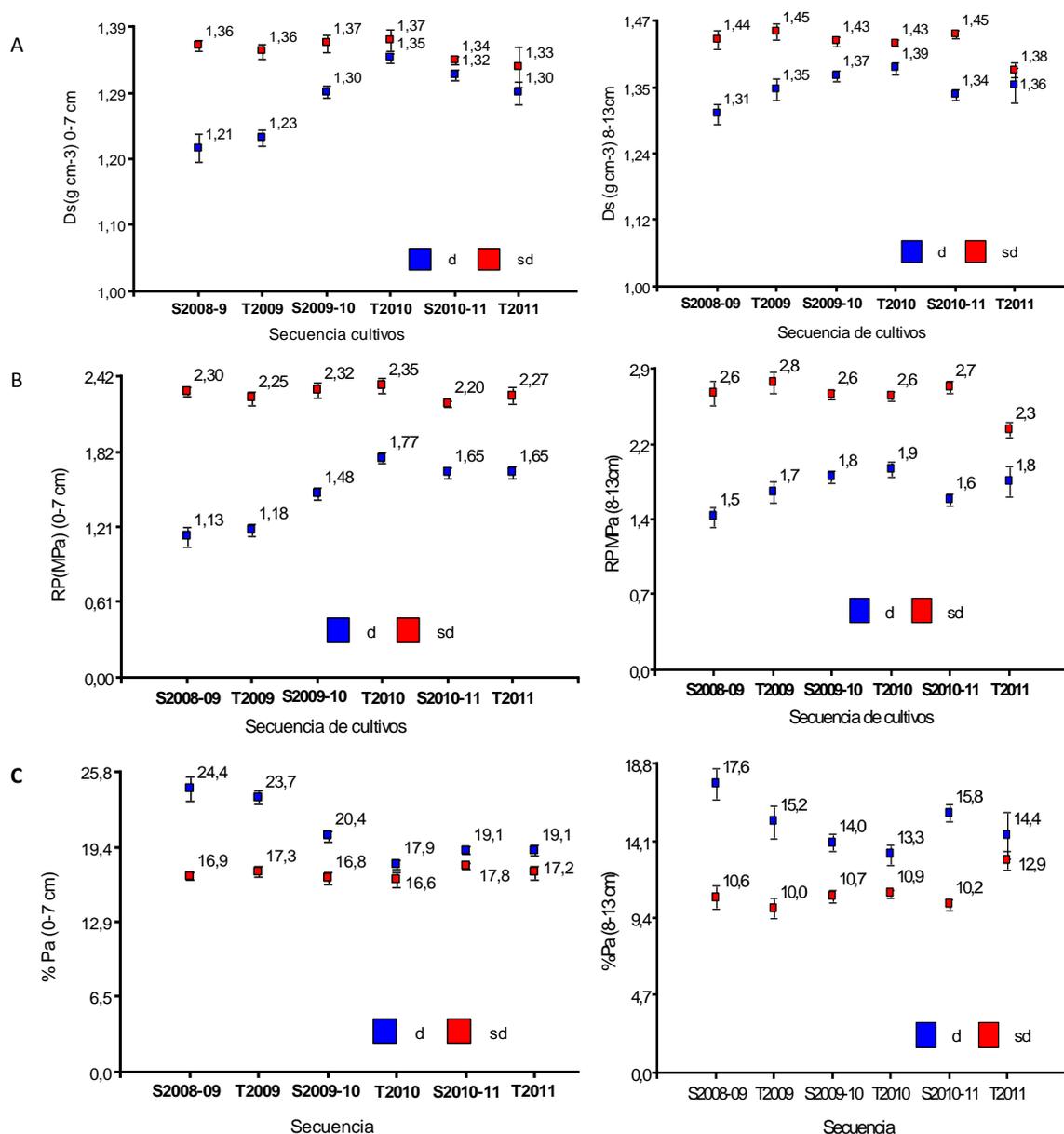


Figura 2-9: Evolución en el tiempo de la D_s (A), Resistencia a la penetración RP (MPa) (B) y Porosidad de aireación (%Pa) (C) superficial y profunda según nivel de compactación del suelo, descompactado (d) y sin descompactar (sd) respectivamente, en la secuencia de cultivos S-T/S-T/S-T.

3-3. Intervalo hídrico óptimo (IHO) e índice de días de estrés (WSD)

En este trabajo el área conformada por el IHO determinado a diferentes D_s fue notoriamente superior en los tratamientos d respecto a los sd en ambas profundidades como fue presentado en el capítulo anterior (Figuras 1-13 y 1-14, A y B). En la figura 2-10 se muestra que los suelos d superficial y subsuperficialmente tuvieron mayor IHO en la C1 ($\theta = 0,13$ y $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Dicho IHO fue variando en las campañas siguientes; siendo en la C2 menor el intervalo ($\theta = 0,096$ y $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y alcanzando una mejor situación en la C3 ($\theta = 0,11$ y $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Por otro lado, los suelos sd mostraron a ambas profundidades mejoras en el IHO al finalizar el ensayo C3 ($\theta = 0,10$ y $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), con respecto a la situación inicial C1 ($\theta = 0,08$ y $0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), sin llegar a igualar los valores de IHO de los suelos descompactados.

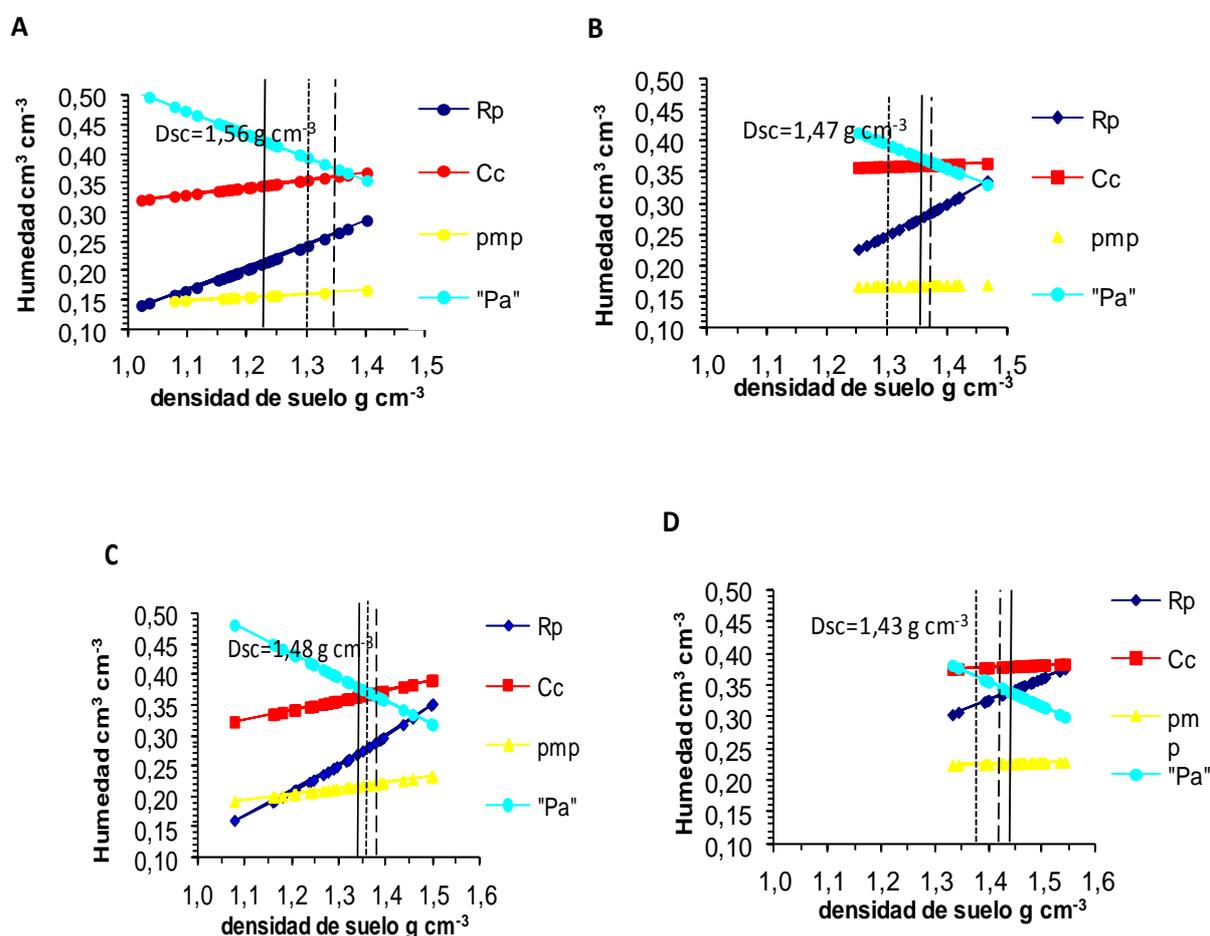


Figura 2-10. Variación del contenido hídrico volumétrico en el suelo (θ) en función de la densidad de suelo (D_s) según θ críticos de resistencia del suelo a la penetración (RP), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) y porosidad de aeración (P_a) para suelos descompactados y sin descompactar superficial (A y B) y subsuperficialmente (C y D) en un cultivo de soja. IHO= intervalo hídrico óptimo. D_{sc} = D_s crítica (IHO= 0). Líneas representan la D_s al inicio de las distintas campañas de trigo (C1= 2009 (línea continua), C2= 2010 (línea discontinua) y C3= 2011(línea de puntos).

Con base en el IHO y en la dinámica hídrica del período en que se desarrolló el cultivo de trigo en las diferentes campañas se determinó para la profundidad de suelo de 0-20 cm, el WSD. El valor resultó estadísticamente mayor en las parcelas Asd y Bsd con respecto a las Ad y Bd ($|-78,8|$ y $|-82,6|$ vs. $|-37,6|$ y $|-38,0|$) como promedio de las tres campañas (Figura 2-12). Valores absolutos mayores de WSD indican períodos de mayor estrés por encontrarse el contenido hídrico del suelo fuera de los límites del IHO.

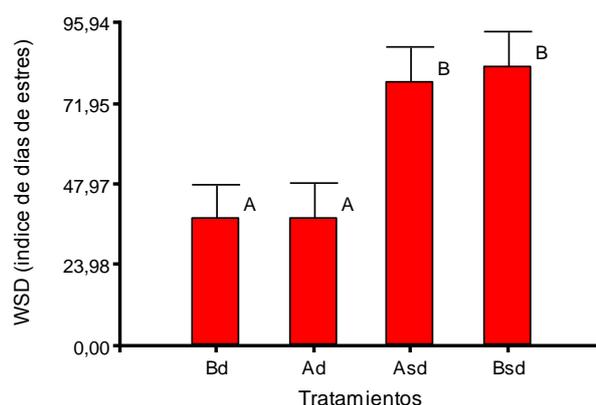


Figura 2-11. Índice de días de estrés (WSD) en función de los distintos tratamientos [alta fertilización descompactado (Ad), alta fertilización sin descompactar (Asd), baja fertilización descompactado (Bd) y baja fertilización sin descompactar (Bsd)]. Letras diferentes entre columnas indican diferencias significativas entre los tratamientos según el test LSD ($P \leq 0,05$).

4- Variables ecofisiológicas del cultivo

4-1. Caracterización del crecimiento

a) Materia seca acumulada y tasa de crecimiento del cultivo

En la tabla 2-8 se presenta el análisis de la acumulación de MS en diferentes momentos del ciclo del cultivo y la TCC entre I Enc y A+7d. La acumulación de MS en I Enc

y A+7d fueron un 21,6% y 34,5% superiores en el NF A con respecto a B. En C2 la MS acumulada fue superior a I Enc en un 274% y a M Enc en un 92% y 35% respecto a C1 y C3 respectivamente con diferencias significativas, debido principalmente a las mejores condiciones hídricas del suelo en ese período en C2, en tanto que la MS en A+7d no presentó diferencias significativas entre años y a MF fue un 23% y 18% inferior en C1 respecto C2 y C3 respectivamente. La TCC (I Enc hasta A+7d) en el nivel de alta fertilización A fue un 38% superior con respecto a B. Los valores encontrados de TCC a lo largo del estudio fueron superiores a los citados por Astegiano *et al.*, (2003), quienes informaron valores entre 8-10 g m⁻² día⁻¹ para la misma zona. Castellarín *et al.* (2005), trabajando con cultivares distintos, determinaron en secano valores TCC durante el período espiguilla terminal hasta antesis de 2,3-3,29 g m⁻² d⁻¹ y, bajo riego la TCC se incrementó de entre 5,7 y 8,4 veces.

No se observaron diferencias significativas como efecto principal del NC del suelo en la MS acumulada en los diferentes momentos del ciclo del cultivo. La MS a MF presentó interacción NF*NC por lo cual se analiza la apertura de la misma.

Tabla 2-8. Materia seca acumulada en diferentes momentos del cultivo de trigo [en inicio de encañazón (MS I Enc -Z3.1-), en mediados de encañazón (MS M Enc -Z3.4-), en antesis más siete días (A+7d -Z7.05-) y en madurez fisiológica (MS MF -Z9.0-)] y tasa de crecimiento del cultivo entre I Enc y A+7d (TCC I Enc-A+7d) según el nivel de fertilización (A= alta y B= baja), el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar), año (C1:2009, C2: 2010 y C3: 2011) y sus interacciones.

		MS I Enc	MS M. Enc	MS Antesis +7d	MS MF	TCC g m ⁻¹ día ⁻¹
		(g m ⁻²)	I Enc-Antesis +7d			
NF	A	197 b	454,4 a	1014 b	1084	16,4
	B	162 a	421,7 a	753,1 a	988,1	11,8
NC	d	190 b	458,6 a	896,9 a	1066,8	14,1
	sd	168 a	417,4 a	871,2 a	1005,2	14
Año	C1 2009	91,3 a	302,5 a	907,7 a	877,3 a	16,9
	C2 2010	352,7 b	581,6 c	902,3 a	1136,1 b	10,7
	C3 2011	94,4 a	429,9 b	842,3 a	1094,8 b	14,6
Análisis de la varianza						
NF		0,0009	ns	<0,0001	0,0012	<0,0001
NC		ns	ns	ns	0,0331	ns
Año		<0,0001	<0,0001	ns	<0,0001	<0,0001
NF*NC		ns	ns	ns	0,0404	ns
NF*Año		ns	ns	ns	ns	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns	0,0209
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	0,014

Letras distintas dentro de cada columna representan diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns= no significativo ($P > 0,05$) y diferencias significativas ($P \leq 0,05$).

La producción de MS_MF no presentó diferencias entre d y sd cuando la dosis de fertilización fue alta (Figura 2-12). Sin embargo, la caída por el descompactado es menor con respecto a sd con bajo N aportado por el fertilizante. Dicha situación puede ser explicada por una mayor absorción de nitrógeno en planta en suelos descompactados y mayor eficiencia fisiológica para la producción de biomasa en el nivel de baja fertilización como se discutirá más adelante al analizar las eficiencias en el uso de los recursos.

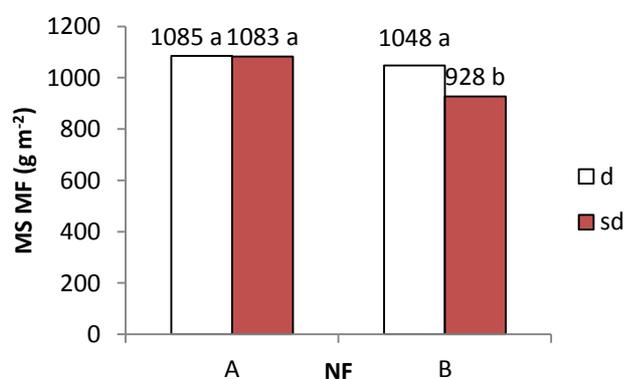


Figura 2-12. Apertura de la interacción NF*NC; Materia seca total a madurez fisiológica (MS_MF) en función del nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) según el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) [letras diferentes dentro de un mismo NF indican diferencias significativas entre NC ($P \leq 0,05$), según el test LSD ($\alpha = 0,05$)].

b- Índice de área foliar, porcentaje radiación interceptada y acumulada en distintos momentos del ciclo del cultivo de trigo

A lo largo de las tres campañas se determinó el IAF y el %RI en I Enc, M Enc y A+7d, además de la RFA interceptada y acumulada en todo el ciclo (Tabla 2-9). Sólo se encontraron diferencias a favor del NF A en el IAF en A+7d superando en un 14% el valor en B y para la RFA int acum logrando con alta fertilización acumular un 5% más de radiación con respecto a B. Esto puede estar asociado con lo propuesto por Calderini *et al.* (1997) quienes afirman que mayores disponibilidades de N no sólo determinan una mayor área foliar, sino también una mayor duración de la misma e intercepción de radiación. La radiación interceptada por un cultivo depende del AF y del coeficiente de extinción lumínica -k- y, es

negativamente afectada por la deficiencia de N a través de la reducción del AF (Massignam *et al.*, 2009, citados por Sandaña & Pinochet, 2011). El % RI en A+7d presentó interacción según NF*Año, donde en la C1 el cultivo de trigo no presentó diferencias según el NF, en tanto que en C2 y C3 el %RI fue un 8 y 12% superior en NF A vs B respectivamente (Figura 2-13).

Tabla 2-9. Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada a lo largo del ciclo (RFA int acum), índice de área foliar (IAF) y porcentaje de interceptación de la radiación fotosintéticamente activa incidente (%RI) del cultivo de trigo en diferentes momentos [en inicio de encañazón (I Enc -Z3.1-), en mediados de encañazón (M Enc -Z3.4-) y en antesis más siete días (A+7d -Z7.05-)] según el nivel de fertilización (A= alta y B= baja), el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) para distintos años 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) y sus interacciones.

		IAF (m ² m ⁻²)			RI (%)			RFA int acum
		I Enc	M Enc	A+7d	I Enc	M Enc	A+7d	(MJ m ⁻²)
NF	A	2,0 a	3,3 a	4,0 b	63 a	72 a	80	536,3 b
	B	1,9 a	3,1 a	3,5 a	64 a	70 a	76	511,3 a
NC	d	1,9 a	3,3 a	3,9 a	63 a	73 a	80 a	529,1 a
	sd	2,0 a	3,0 a	3,6 a	64 a	69 a	76 a	517,3 a
Año C1 2009		1,2 a	2,4 a	2,8 a	58 a	67 a	71	504,5 a
C2 2010		2,9 c	4,1 c	4,5 c	68 b	78 b	83	531,4 b
C3 2011		1,9 b	3,1 b	4,0 b	64 b	68 a	80	535,6 b
Análisis de la varianza								
NF		ns	ns	0,0001	ns	ns	0,0067	0,042
NC		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Año		<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0041	0,0001	<0,0001	0,002
NF*NC		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		ns	ns	ns	ns	ns	0,0276	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*Letras distintas dentro de cada columna representan diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns= no significativo ($P > 0,05$). *= diferencia significativa ($P \leq 0,05$).*

La C1 presentó los menores valores de IAF y %RI en todos los momentos medidos y la menor acumulación de RFA interceptada debido a la baja densidad de plantas y a las condiciones hídricas limitantes de la campaña. Los valores de IAF en I Enc fueron similares a

los publicados por Astegiano *et al.* (2003), quienes han encontrado valores entre 1,5 y 1,8 bajo condiciones de déficit hídrico. Mantener adecuados niveles de área foliar sana y funcional, a partir de este período en el cual el tallo y la espiga crecen en forma conjunta y en intensa competencia, es crucial para la determinación del NG por unidad de área. Esto es fundamental para lograr altas tasas de fotosíntesis, permitiendo así una mayor disponibilidad y partición de fotoasimilados hacia las espigas y, por lo tanto, un mayor NG (Calderini *et al.*, 1995).

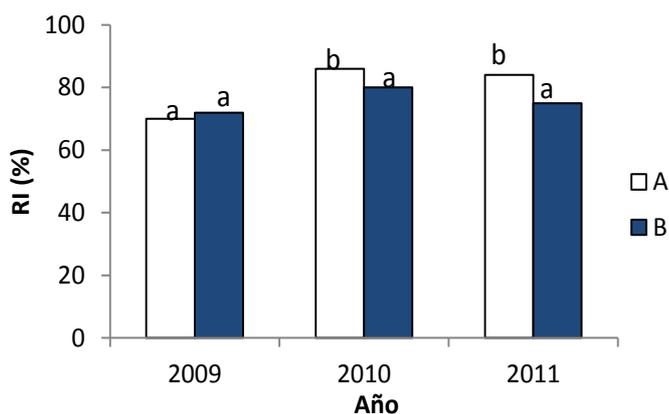


Figura 2-13. Porcentaje de radiación interceptada (% RI) en A+7d en trigo: Apertura de la interacción NF*año; RI (%) en función del nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) según años (C1: 2009, C2: 2010 y C3: 2011) [letras diferentes dentro de un mismo año indican diferencias significativas entre NF ($P \leq 0,05$), según el test LSD ($\alpha = 0,05$)].

En forma general, los mayores valores de IAF se alcanzaron en los tratamientos con alta dosis de fertilizante (a pesar de que sólo en A+7d las diferencias por NF fueron significativas). Además, en ningún caso se llegó al valor de IAF que intercepta el 95% de la radiación denominado como IAF crítico por la mayoría de los fisiólogos por dos razones: 1) la interceptación de radiación se aproxima asintóticamente a un máximo, lo que significa que el IAF para alcanzar el 100% de interceptación de radiación podría ser imposible de medir; 2) el 95% de interceptación bajo una máxima cantidad de radiación solar de $2300 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{seg}^{-1}$ significa que la radiación en el nivel inferior del canopeo es $115 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{seg}^{-1}$, siendo éste el punto de compensación lumínica para la mayoría de las especies. Incrementos del IAF por encima del 95% de interceptación resultaría en incrementos insignificantes de la TCC. Para el cultivo de trigo el 95% de interceptación de la radiación se alcanza a un valor de IAF de 4-4,5 (Gardner *et al.*, 1985a). Si bien en la C2 se llegó a valores de IAF de 4,5 la interceptación fue menor al 95%, la dificultad en lograr el IAF crítico podría deberse al menos

en parte, a la estructura de la planta de la variedad utilizada (menores valores k). Sin embargo, Massaro *et al.* (2003), en un relevamiento de más de 70 lotes de trigo en espigazón- antesis para un mismo espaciamiento entre líneas en el centro y sur de Santa Fe, encontraron que solo el 5% de los cultivos llegaban a interceptar el 95% de la radiación, mientras que el 68% tuvo valores entre 51 y 90% RI.

c- Componentes del rendimiento y rendimiento del cultivo de trigo

Tanto el NG m^{-2} como el Rdto presentaron respuestas similares y significativas según los factores NF, NC y año. El mayor NG m^{-2} y Rdto se obtuvieron en las dosis altas de N superando en un 14 y 13% los valores respecto a B, en tanto que según el NC en los suelos d se incrementaron un 7 y 4,7% respectivamente. Durante la C2: 2010 el Rdto superó en un 31% a las demás campañas. El P1000 y el IC no presentaron diferencias significativas según el NC del suelo siendo menores en la C3: 2011.

Tabla 2-10. Componentes del rendimiento [número de espigas por m^2 ($E \text{ m}^{-2}$), número de granos por m^2 (NG m^{-2}), peso de mil granos (P1000)], rendimiento (Rdto) e índice de cosecha (IC) del cultivo de trigo según el nivel de fertilización (A= alta y B= baja), el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) años 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) y su interacciones.

		$E \text{ m}^{-2}$	$\text{N}^{\circ} \text{G m}^{-2}$	P 1000 (g)	Rdto (g m^{-2})	IC (%)
NF	A	508,5	11596 b	29,9	346,2 b	32 a
	B	433,3	10162 a	30,0	305,6 a	31 a
NC	d	486,9 b	11224 b	29,7 a	333,4 b	32 a
	sd	454,8 a	10534 a	30,2 a	318,3 a	32 a
Año C1 2009		363,8	10337 a	28,5	294,2 a	34 b
C2 2010		514,5	11300 b	34,3	385,8 b	34 b
C3 2011		534,3	11001 b	27,1	297,6 a	27 a
Análisis de la varianza						
NF		<0,0001	<0,0001	ns	<0,0001	ns
NC		0,0172	0,0053	ns	0,0257	ns
Año		<0,0001	0,0054	<0,0001	<0,0001	<0,0001
NF*NC		ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		0,0001	ns	0,0424	ns	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns

Letras distintas dentro de cada columna representan diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns= no significativo ($P > 0,05$), diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

El P1000 y el $NE\ m^{-2}$ resultaron afectadas por la interacción NF*año. A través de un análisis de contrastes (Figuras 2-14 y 2-15) se observó en C2:2010 que en las parcelas de baja fertilización el P1000 aumentó un 6% con respecto a A, sin respuesta en C1 y C3, pudiéndose deber a una compensación entre el número de granos y el peso de los mismos en dicha campaña. Las $E\ m^{-2}$ fueron un 11 y 37% superiores en el NF A con respecto a B en C2 y C3 respectivamente, sin respuesta en C1 debido principalmente a las condiciones limitantes de agua durante el período de macollaje.

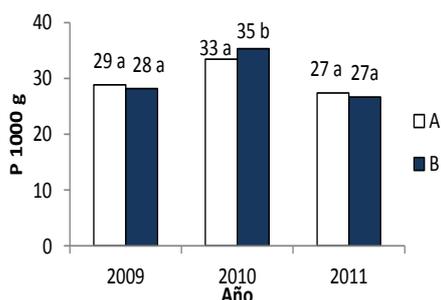


Figura 2-14. Apertura de la interacción NF*año; para el peso de mil granos expresado en gramos (P1000 g) en función del nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) según años (C1: 2009, C2: 2010 y C3: 2011) [letras diferentes dentro de un mismo año indican diferencias significativas entre NF ($P \leq 0,05$), según el test LSD ($\alpha = 0,05$)].

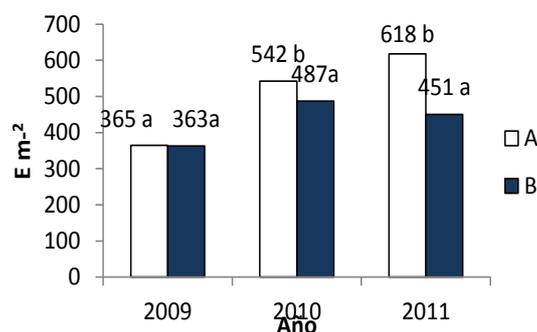


Figura 2-15. Apertura de la interacción NF*año; para el número de espigas por metro cuadrado ($E\ m^{-2}$) en función del nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) según años (C1: 2009, C2: 2010 y C3: 2011) [letras diferentes dentro de un mismo año indican diferencias significativas entre NF ($P \leq 0,05$), según el test LSD ($\alpha = 0,05$)].

Las variaciones en Rdto. se explicarían principalmente por el NG, coincidiendo con la bibliografía (Slafer & Rawson; 1994; Miralles & Slafer, 1999; Calderini *et al.*, 1999). Los valores de $E\ m^{-2}$ se encuentran dentro de los rangos presentados en diferentes trabajos. Astegiano *et al.* (2003) obtuvieron valores de $E\ m^{-2}$ de 250 a 350 para una campaña seca; mientras que, Invinkelried *et al.* (2013) citaron 430 a 540 $E\ m^{-2}$ para distintas dosis de fertilizante en el Departamento Las Colonias. Por otro lado, Oussible *et al.* (1992) concluyeron que la reducción del Rdto. en trigo en respuesta a la compactación del subsuelo era debido a la reducción en las $E\ m^{-2}$, respuesta que pudo observarse en el presente ensayo

con un 7% menos de $E\ m^{-2}$ logradas en sd vs. d. El peso de los granos también fue similar a los encontrados en la bibliografía, en trabajos como los de Astegiano *et al.* (2003) y Invinkelried *et al.* (2013) quienes obtuvieron valores entre 25 a 34 g en el P1000.

Para trigos en secano, Van Herwaard & Passioura (2001) y Passioura & Angus (2010) mencionan un IC alrededor del 40% de la B aérea. En este trabajo el IC estuvo alrededor del 33%, excepto en la C3 donde los valores fueron menores -27%, aproximadamente-. Estos datos de IC se asemejan a los reportados para esta región por Astegiano *et al.* (2003) -entre 30 a 40%-. La situación durante la C3 podría deberse a una menor duración del período de llenado (Tabla 2-2), durante el cual las temperaturas medias de noviembre fueron más altas (2,9 °C por encima del promedio histórico) y, que el cultivo estuvo expuesto a 10 días seguidos de temperaturas máximas superiores a 30 °C.

Reducciones entre el 3 al 5% en el peso de grano se han reportado por cada grado de aumento en la temperatura por encima de los 15 °C durante el período de llenado de grano, en experimentos bajo condiciones controladas y a campo (Wardlaw & Wrigley, 1994). También existe información que indica que los estreses térmicos son más negativos cuando ocurren en etapas tempranas del período de llenado en comparación con etapas más tardías (Nicolas *et al.*, 1984; Stone & Nicolas, 1994). Aumentos en la temperatura media durante el período de llenado determinarán un incremento en la tasa de acumulación de MS en el grano, acompañada de una reducción más que proporcional en la duración del período de llenado, disminuyendo el peso final de los granos (Slafer *et al.*, 2003).

d- Índice de días de estrés y rendimiento

Los valores de WSD (estimado para la profundidad de suelo de 0-20 cm) fueron mayores en Asd y Bsd con respecto a las Ad y Bd como promedio de las tres campañas como fue mostrado anteriormente. Valores absolutos mayores de WSD indican períodos de mayor estrés por encontrarse el contenido hídrico del suelo fuera de los límites del IHO, sin embargo al correlacionar el WSD con el Rdto logrado de trigo la misma fue baja a nula ($R^2= 0,01$) no explicando la variabilidad total del Rdto. Esto podría deberse a que éste índice contempla la variación del contenido hídrico fuera de los límites del IHO sólo en los primeros 20 cm del suelo, y se sabe que el Rdto de trigo tiene una alta relación con el agua acumulada en el perfil de suelo a mayor profundidad (Figura 2-16).

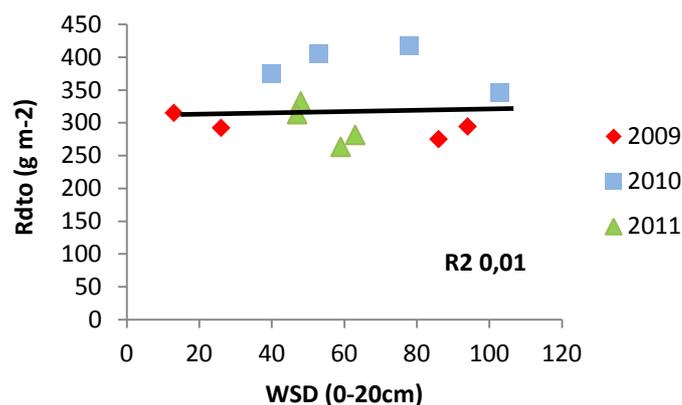


Figura 2-16. Rendimiento (Rdto) del cultivo de trigo en función del índice de días de estrés (WSD) para las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3).

4-2. Efecto residual de la descompactación, fertilización y campaña sobre la eficiencia de uso de los recursos: agua, radiación y nitrógeno

Se detectaron interacciones significativas entre los factores NF*NC para la EUA, tanto en grano como en B total. Además de dichas interacciones, se pudieron determinar diferencias en las distintas variables por efectos simples de NF y de campaña (Tabla 2-11).

La EUA_G fue un 45% y 51% mayor en C2 y la EUA_B un 44% y 20% superior respecto C1 y C3 respectivamente, siendo estas diferencias significativas. Los datos obtenidos de EUA_G estuvieron dentro de los valores citados para la región centro de la provincia de Santa Fe, promediando los $0,85 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ de agua evapotranspirada (ETcaj).

Los valores son similares a los publicados por Villar (2001) y Pergolini (2005), entre $0,79$ a $1,22 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; en tanto que, Dardanelli *et al.* (1997) en condiciones de riego suplementario obtuvieron $1,14 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ y Caviglia *et al.* (2004) hallaron valores entre $1,18$ a $1,34 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$. Van Herwaarden & Passioura (2001) mencionan un rango de EUA_B para trigo entre $4,5$ a $5,0$; en tanto que, Caviglia *et al.* (2004) valores de $4,27$ a $4,38 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ superiores a los hallados en este trabajo ($2,4$ a $3,6 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$).

La EUR sólo tuvo diferencias por efecto del NF en cuanto a la producción de granos. La mayor dosis de N permitió incrementar en un 10,5% la EUR_G $-0,63$ vs. $0,57 \text{ g m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$, obteniéndose las mayores eficiencias en la C2. Esta mejora en la EUR coincide con un aumento del 5% en la RFA int acum para el NF A (ver Tabla 2-9). La

EUR_B fue un 23% superior en la C2 respecto a C1 siendo esta diferencia significativa y 10 % superior con respecto a C3 sin ser significativa.

Tabla 2-11. Eficiencia de uso de la radiación en grano y en biomasa total (EUR_G y EUR_B) y eficiencia de uso del agua en grano y en biomasa total (EUA_G y EUA_B) para el cultivo de trigo según el nivel de fertilización (A= alta y B= baja), el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) y sus interacciones.

		EUR_G	EUR_B	EUA_G	EUA_B
		(g m ⁻² MJ ⁻¹)	(g m ⁻² MJ ⁻¹)	(g m ⁻² mm ⁻¹)	(g m ⁻² mm ⁻¹)
NF	A	0,63 b	1,9 a	0,9	3,1
	B	0,57 a	1,9 a	0,9	2,9
NC	d	0,61 a	1,9 a	1,0	3,1
	sd	0,56 a	1,9 a	0,9	2,9
Año	C1 2009	0,57 a	1,7 a	0,8 a	2,4 a
	C2 2010	0,70 b	2,1 b	1,2 b	3,6 c
	C3 2011	0,53 a	1,9 ab	0,8 a	2,9 b
Análisis de la varianza					
NF		0,0107	ns	<0,0001	0,0181
NC		ns	ns	0,0077	0,0133
Año		<0,0001	0,0066	<0,0001	<0,0001
NF*NC		ns	ns	0,0011	0,0002
NF*Año		ns	ns	ns	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns

Letras distintas dentro de cada columna representan diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns= no significativo ($P > 0,05$). diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

La EUR suele ser un atributo menos variable en comparación con el IAF o RFA int (Kiniry *et al.*, 1989; Sinclair, 1993). Algunos autores demostraron que EUR puede ser afectada por las condiciones ambientales y factores genéticos (Castellarín *et al.*, 2005), además de disminuciones en el EUR en respuesta a deficiencia de N (Caviglia & Sadras, 2001). Dicha situación coincide en lo sucedido en este ensayo, ya que los tratamientos con baja fertilización presentaron una reducción en el IAF, en la RFA int acum y, finalmente en una menor EUR_G, por lo que podría deberse a que el N disponible limitó en parte a la expansión foliar, la cual es más sensible a un estrés que la tasa fotosíntesis

de la planta (Fitter & Hay, 2002). Según Amir *et al.* (1991) agua y N son los factores que condicionan la EUR, ya que cuando son limitantes, el componente más afectado es el NG por unidad de superficie, ya que el IAF y la EUR se reducen.

Los valores de EUR_B y de EUR_G obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados en la bibliografía. Gregory *et al.* (1992) citan valores de EUR_B en Australia para el período vegetativo de 1,46 g MJ⁻¹. Para Argentina se citan valores, para el mismo período, de 1,25 g MJ⁻¹ y, para el período reproductivo de 1,02 g MJ⁻¹ (Calderini *et al.*, 1997). Castellarín *et al.* (2005), trabajando con dos cultivares distintos, encontraron valores de EUR_G de 0,6 y 0,9 g MJ⁻¹, valores similares a los estimados por Sinclair & Muchow (1999), de 0,73 g MJ⁻¹. Caviglia *et al.* (2004) midieron valores de EUR_B de 2,30 y 2,38 g MJ⁻¹ y de EUR_G de 0,72 y 0,64 g MJ⁻¹ para dos campañas de trigo diferentes.

Del análisis de la interacción NF*NC (figura 2-17), se observa que la EUA_G y EUA_B en el NF alto no presentaron diferencias por cambios en el NC; mientras que en el NF bajo, las mayores EUA se dieron en las parcelas d.

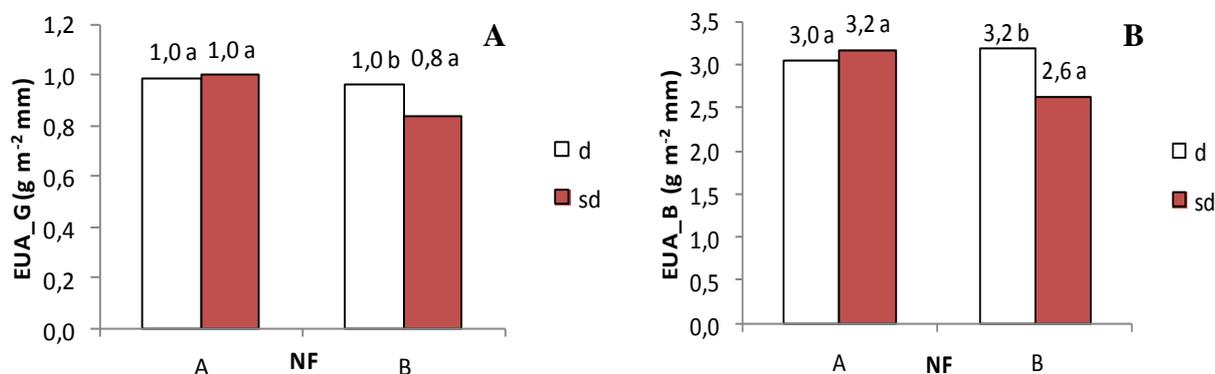


Figura 2-17: Eficiencia de uso de agua en grano (EUA_G) (A) y en biomasa (EUA_B) (B) del cultivo de trigo en función del nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) según el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar). Apertura de la interacción NF*NC. Letras diferentes dentro de un mismo NF indican diferencias significativas entre NC según el test LSD ($P \leq 0,05$).

La disminución en la EUA_G y EUA_B en el tratamiento Bsd con respecto a Bd podría ser debido a que la Ds, Pa y RP limitaron en mayor medida la EUA, en respuesta al menor aporte de N y P donde la mayor proximidad entre sí de las partículas del suelo

en los tratamientos sd, si bien pudo facilitar la difusión del P, no logró un aumento de la absorción de iones por las raíces más cortas (Oliveira *et al.*, 1998).

Se sabe que la nutrición del cultivo presenta un impacto positivo sobre la EUA atribuido a una mejora en el crecimiento y en el Rdto. del cultivo a causa de la mayor eficiencia fotosintética, como así también por incrementar la transpiración del cultivo y disminuir la evaporación desde el suelo (Cooper *et al.*, 1987). En contraste con los efectos atmosféricos fuertes sobre la EUA transpirada no hay evidencia de los efectos directos del manejo de los cultivos sobre la misma, excepto donde se fomenta un mayor crecimiento durante épocas de bajo déficit de presión de vapor.

Para el N total absorbido por el cultivo (N_abs total), hubo interacción entre los factores de tratamiento NF*NC por lo que se analizó en forma conjunta los factores involucrados en la interacción. La EUN -en B total y en grano- y sus componentes (EFN_B y ER_N) presentaron diferencias solamente según las distintas campañas, en tanto que la EFN_G fue mayor en el NF A (Tabla 2-12).

El N_abs total por el cultivo de trigo fue un 18% y 23% inferior en la C1 con respecto a C2 y C3 respectivamente con diferencias significativas, esto pudo deberse a que la misma presentó un menor contenido hídrico en el suelo, lo que afectó la absorción del N. Resultados similares encontraron López *et al.* (2002) en trigos bajo secano y riego con distintas dosis de N.

La EUN para la producción de G y B resultaron un 38% y 28% superiores respectivamente en la C2 respecto a C1 y C3, debido a las mayores producciones de grano y biomasa en dicha campaña, sin diferencias según NF y NC. Alta disponibilidad de N varía la EUN por cambios en la capacidad de captura del nutriente (es decir, en la ER); mientras que a baja disponibilidad de N, la EUN varía por diferencias en la producción de granos por unidad de N capturado (es decir, en la EF) (Hirel *et al.*, 2001).

La EF_N refleja la habilidad de la planta en transformar el N_abs en MS y en Rdto. Este parámetro es frecuentemente utilizado para comparar diferentes especies o cultivares con distintos niveles de fertilidad. De acuerdo a Kanampiu *et al.* (1997) una mayor relación de unidad de grano producida por unidad de N_abs, representa una mayor efectividad de translocación, asimilación y redistribución de N al grano en crecimiento. En este trabajo, la mayor dosis de N aplicado produjo incrementos significativos en la EFN_G, aumentando un 13,6% con respecto al nivel bajo de fertilización. Kanampiu *et*

al. (1997) reportaron absorción de 88 kg N ha⁻¹ y EFN_G entre 31-38 kg_ kgN_abs⁻¹, con 160 kgN ha⁻¹ de fertilizante aplicado.

La ER_ N no presentó diferencia según el nivel de fertilización y compactación si bien se observa una tendencia que a dosis menores de N y en los tratamientos descompactados la ER_N fue mayor. Uribelarrea *et al.* (2007) sugirieron que elevadas ER podrían estar fuertemente relacionadas con el tamaño y la actividad de las raíces y que altas EF_N podrían estar más vinculadas a los componentes del Rdto del cultivo –NG y peso de granos-.

Tabla 2-12. Nitrógeno total absorbido (N_{abs} total, kgN ha⁻¹), eficiencia fisiológica de N en grano (EFN_G, kg_g kgN_abs⁻¹), eficiencia de uso del N en grano (EUN_G, kg_g kgN_disp⁻¹), eficiencia fisiológica de N en biomasa total (EFN_B, kg_B kgN_abs⁻¹), eficiencia de uso del N en biomasa total (EUN_B, kg_B kgN_disp⁻¹) y eficiencia de recuperación de N en biomasa total (ER_ N, kgN_abs kgN_disp⁻¹) para el cultivo de trigo según el nivel de fertilización (A= alta y B= baja), el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) para las campañas 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) y sus interacciones.

		N abs total	EFN G	EUN G	EFN B	EUN B	ER_ N
		kg N	kg kg Nabs ⁻¹	kg kg N dis ⁻¹	kg kg Nabs ⁻¹	kg kg N dis ⁻¹	kg Nabs kg N dis ⁻¹
NF	A	116,3	31,7 b	25,0 a	93,4 a	76,2 a	0,82 a
	B	105,1	27,9 a	25,2 a	93,1 a	84,3 a	0,91 a
NC	d	113,5	30,2 a	24,6 a	92,8 a	80,1 a	0,88 a
	sd	107,5	29,5 a	25,6 a	94,1 a	80,5 a	0,85 a
Año	C1 2009	94,1 a	31,5 b	22,5 a	94,3 b	68,8 a	0,74 a
	C2 2010	115,1 b	33,8 b	30,9 b	100,1 c	93,9 b	0,94 b
	C3 2011	123,1 c	24,1 a	22,0 a	85,9 a	78,1 a	0,91 b
Análisis de la varianza							
NF		<0,0001	0,0001	ns	ns	ns	ns
NC		0,022	ns	ns	ns	ns	ns
Año		<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,019	0,0078	0,0123
NF*NC		0,001	ns	ns	ns	ns	ns
NF*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns
NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns
NF*NC*Año		ns	ns	ns	ns	ns	ns

Letras distintas dentro de cada columna representan diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns= no significativo ($P > 0,05$). diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

El Nabs total en el nivel de baja fertilización fue un 10% inferior en los tratamientos sd (Bsd) con respecto a d (Bd), en tanto que para el NF A no hubo diferencias significativas según el nivel de compactación del suelo (Figura 2-18). Ahmad *et al.* (2009) reportaron que la absorción de los nutrientes puede afectarse como consecuencia de los efectos de la compactación del suelo.

Por lo general, el tamaño de la raíz y su distribución espacial no suelen ser factores limitantes para la captura de N bajo suficiente disponibilidad de N debido a su característica de ser móvil en el suelo y, principalmente, llega rápidamente a la planta por flujo masal (Sinclair & Vadez, 2002). Sin embargo, cuando la disponibilidad de N no es suficiente o el movimiento del N es reducido por la escasez de agua, el transporte de N por flujo masal puede ser insuficiente para satisfacer la demanda del cultivo. En estos casos, el tamaño y la morfología de la raíz será muy importante para el aprovechamiento del N (Marschner, 1998). En el tratamiento Bd el efecto residual de la descompactación pudo favorecer el desarrollo radicular del trigo permitiendo mayor recuperación y absorción de N.

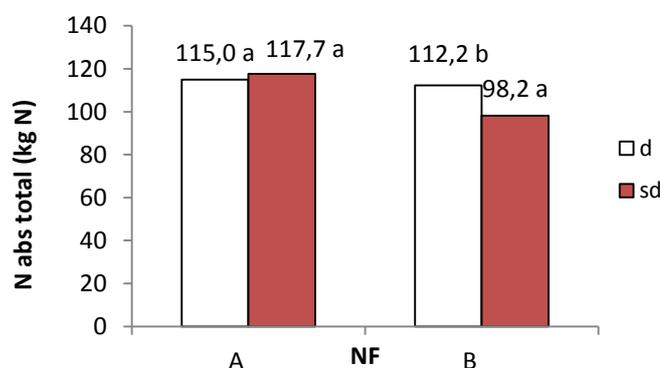


Figura 2-18: Nitrógeno absorbido total (N_{abs_total}) del cultivo de trigo en función del nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) según el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar). Apertura de la interacción NF*NC. Letras diferentes dentro de un mismo NF indican diferencias significativas entre NC según el test LSD ($P \leq 0,05$).

4.3- Análisis de correlación entre variables de suelo y cultivo de trigo

Del análisis de correlación para las tres campañas (Tabla 2-13) se manifestó que el Rdto y la B total se relacionaron fuerte y positivamente entre sí ($P < 0,0001$) tanto como con el N abs. El Rdto estuvo asociado con la EUA_G y EUR_G ($P < 0,0001$), como así

también con la EUN_G y la EFN_G. La EUA_G y la EUR_G estuvieron vinculadas entre sí ($P < 0,0001$) y éstas a su vez estuvieron correlacionadas con la EUN_G.

Tabla 2-13. Matriz de correlación: coeficientes de correlación de Spearman entre variables de suelo: Ds (sup –superficial- o prof –profunda-)= densidad de suelo, RP (sup –superficial- o prof –profunda-)= resistencia a la penetración, Pa (sup –superficial- o prof –profunda-)= porosidad de aireación y, variables de cultivo: N abs total= nitrógeno total absorbido por la planta, %RFAiA= radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada, B_MF= materia seca acumulada en madurez fisiológica, P1000= peso de mil granos, Rdto= rendimiento, NE m⁻²= número de espigas por m², EFN_G= eficiencia fisiológica de N en grano, EUN_G= eficiencia uso de nitrógeno grano, EUA_G= eficiencia uso del agua en grano, EUA_B= eficiencia uso del agua en biomasa, EUR_G= eficiencia de uso de la radiación en grano, EUR_B= eficiencia de uso de la radiación en biomasa, %IC= índice de cosecha, para las campañas de trigo 2009 (C1), 2010 (C2) y 2011 (C3) en conjunto.

	Dap(sup.)	Dap (prof)	Pa (sup)	Pa (prof)	Rp (sup)	Rp (prof)	N abs	%RFAiA	B MF	P1000	Rdto	NE m ⁻²	EFN G	EUN G	EUA G	EUA B	EUR B	EUR G	
Dap(sup.)																			
Dap (prof)	0,62*																		
Pa (sup)	-0,85*	-0,55*																	
Pa (prof)	-0,64	-0,95*	0,6*																
Rp (sup)	0,81*	0,59*	-0,92*	-0,59*															
Rp (prof)	0,64*	0,90*	-0,66*	-0,91*	0,83*														
N abs total	0,01ns	-0,26ns	-0,1ns	0,22ns	-0,01ns	-0,23ns													
%RFAiA	0,13ns	-0,21ns	-0,28ns	0,16ns	0,06ns	-0,24ns	0,6*												
B MF	0,13ns	-0,13ns	-0,16ns	0,1ns	0,03ns	-0,17ns	0,75*	0,63*											
P1000	0,39ns	0,23ns	-0,3ns	-0,22ns	0,26ns	0,2ns	0,06ns	0,22ns	0,35*										
Rdto (g m ⁻²)	0,31ns	0,09ns	-0,21ns	-0,08ns	0,07ns	-0,01ns	0,48*	0,54*	0,72*	0,66*									
NE m ⁻²	0,06ns	-0,28ns	-0,22ns	0,22ns	0,05ns	-0,27ns	0,75*	0,68*	0,74*	0,17ns	0,54*								
EFN G	0,29ns	0,29ns	-0,14ns	-0,24ns	0,06ns	0,15ns	-0,21ns	0,16ns	0,16ns	0,47*	0,56*	-0,07ns							
EUN G	0,23ns	0,06ns	-0,12ns	-0,03ns	0,04ns	-0,02ns	0,30ns	0,31ns	0,55*	0,74*	0,83*	0,34*	0,42*						
EUA G	0,36ns	0,17ns	-0,23ns	-0,15ns	0,1ns	0,05ns	0,38*	0,48*	0,65*	0,75*	0,96*	0,39*	0,6*	0,86*					
EUA B	0,25ns	0,02ns	-0,21ns	-0,02ns	0,06ns	-0,08ns	0,61*	0,58*	0,92*	0,57*	0,81*	0,56*	0,35*	0,7*	0,84*				
EUR B	0,08ns	-0,02ns	-0,08ns	-0,002ns	-0,01ns	-0,09ns	0,57*	0,44*	0,91*	0,32*	0,69*	0,55*	0,32ns	0,56*	0,65*	0,89*			
EUR G	0,26ns	0,21ns	-0,13ns	-0,18ns	0,05ns	0,09ns	0,26ns	0,32*	0,54*	0,6*	0,92*	0,31ns	0,69*	0,8*	0,91*	0,69*	0,68*		
IC %	0,29ns	0,30ns	-0,13ns	-0,3ns	0,13ns	0,28ns	-0,33	-0,14ns	-0,4*	0,35*	0,33ns	-0,28ns	0,51*	0,3ns	0,36*	-0,19ns	-0,33ns	0,46*	

ns: no significativo ($P > 0,05$). *: diferencia significativa [indican diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$)].

El efecto de la fertilización nitrogenada en los cultivos agrícolas sobre la EUA, EUR y EUN ha sido ya bien documentada (Sinclair & Horie, 1989; Huggins & Pan, 1993; Cooper *et al.*, 1987). En general, se ha encontrado que con un aumento en la disponibilidad de N la EUA y EUR aumentan, en tanto que, la EUN tiende a disminuir.

En este trabajo, debido posiblemente al rango estrecho explorado de N disponible en el suelo (83 a 138 kgN ha⁻¹), no se observó esta disminución en la EUN.

Experiencias previas demostraron que la EUA estuvo explicada por las variaciones que se produjeron en la EUR, por efecto de la nutrición nitrogenada (Caviglia & Sadras, 2001). Mientras que, la EUR y EUN estuvieron negativamente relacionadas (Hirose & Bazzaz, 1998). Sadras & Roget (2004) sugieren una relación inversa entre la EUA y la EUN en un ambiente semiárido de Australia; este tipo de relación no se observó en el cultivo de trigo en el conjunto de las tres campañas.

La producción de biomasa estuvo explicada positivamente por las variaciones en la EUA_B ($P < 0,0001$) y EUR_B ($P < 0,0001$). Por otro lado, el N abs hasta madurez se correlacionó linealmente con la EUR_B ($P < 0,0003$, $R^2 = 0,32$) y con la EUA_B ($P < 0,0001$, $R^2 = 0,40$). No se encontraron correlaciones significativas entre las variables físicas del suelo y las ecofisiológicas del cultivo que expliquen el Rdto para las campañas en su conjunto (cuadrante inferior izquierdo), como respuesta a la fertilización y a la reducción de la compactación del suelo para los niveles de Ds y RP estudiados.

CONCLUSIONES

La descompactación fue efectiva y se observó el efecto residual a través de la variable de suelo RP, la cual mantuvo diferencias significativas al final del ensayo con respecto a los suelos sd. Dichos tratamientos -sd- mostraron una tendencia de mejora subsuperficial en los valores de Ds y RP, lo que podría deberse al efecto de las raíces del cultivo de trigo sobre el suelo en la secuencia trigo/soja.

La mayor fertilización del cultivo tuvo un efecto positivo y superior sobre la eficiencia en el uso de la radiación y rendimiento en relación a la residualidad de la descompactación del suelo, si bien en condiciones de baja fertilización favoreció la producción de biomasa total a madurez fisiológica del cultivo.

La fertilización con P en la secuencia de cultivos logró aumentar los valores de P en el suelo.

Capítulo III

PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y DE LA RADIACIÓN EN LA SECUENCIA DE CULTIVOS Y BALANCE DE MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 200 años el alto crecimiento poblacional aumentó considerablemente la presión sobre las tierras productivas. La roturación de los suelos, la disminución de la cobertura vegetal y el escaso retorno de restos vegetales propios de los suelos agrícolas ha provocado la disminución del carbono orgánico en esos suelos (Lal, 2004). Las emisiones de gases con efecto invernadero provenientes de la agricultura representan entre el 10 y el 12% de las emisiones totales.

Los suelos son el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres (Janzen 2004), por lo que existe un gran potencial para acumular carbono dentro de los suelos como una forma de contrarrestar, al menos en parte, el aumento de las emisiones. El carbono del suelo puede funcionar como fuente o destino, dependiendo del manejo (Schimel *et al.*, 2001; Lal, 2004). Para revertir las consecuencias no deseadas de la producción agrícola se requieren manejos más conservacionistas, como son la reducción de los laboreos y la siembra directa.

Estos manejos promueven una menor intervención sobre los suelos y permiten que los rastrojos de la cosecha cubran el suelo, aportando materia orgánica y protegiendo el suelo de la erosión eólica e hídrica según las características de la región. La adopción de prácticas de manejo conservadoras en suelos agrícolas puede reducir la tasa de enriquecimiento de CO₂ atmosférico y tener impactos positivos sobre la calidad del ambiente.

La acumulación de carbono en un agroecosistema, que depende de la diferencia entre sus entradas y salidas, está correlacionada positivamente a escala regional con la relación entre la precipitación y la temperatura (Álvarez & Lavado, 1998). A escala local influyen la especie cultivada, el manejo de los residuos, las fertilizaciones y laboreos sobre el lote (Viglizo *et al.*, 2004). Además, la reducción de labores y fertilizaciones más racionales disminuyen el consumo de combustibles y la emisión de óxido nitroso.

Para estimar el balance de carbono de un suelo hace falta determinar la cantidad de carbono que ingresa con los rastrojos de los cultivos y la emisión de CO₂ a la atmósfera por respiración microbiana. Por lo tanto, el aumento de la productividad de los

cultivos y de los recursos debe ser un objetivo a lograr en los sistemas agrícolas para incrementar el CO del suelo.

La ausencia de cultivos invernales provoca una pérdida enorme de recursos (agua y radiación solar) que no son aprovechados para producir B y/o granos (Caviglia *et al.*, 2008). En efecto, en regiones donde la estación de crecimiento es prolongada y la oferta de recursos es favorable, se desperdicia una enorme cantidad de recursos que pueden aprovecharse intensificando las secuencias de manera sustentable. La intensificación sustentable, tiene por objetivo mantener o incrementar los actuales niveles productivos con un uso más intenso de los recursos del ambiente (agua y radiación solar) y de las tierras de mayor aptitud, a través de tecnologías de procesos con un uso racional de los insumos.

Las propuestas basadas en la intensificación sustentable deben ser económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente sostenibles (Caviglia & Andrade, 2010). Aunque el término intensificación puede asociarse con un incremento en la productividad a través de un incremento en el uso de insumos, también puede asociarse a un incremento en la captura de recursos disponibles (como radiación y agua) y al mejoramiento en el Rdto de cultivos por unidades de tiempo y superficie (Caviglia & Andrade, 2010).

En este sentido, el índice de intensificación de la secuencia (ISI) depende básicamente del período del año ocupado por cultivos (con raíces activas) en cada secuencia. Numerosas variables están implícitamente relacionadas con el ISI; como, por ejemplo, la agregación, la distribución de poros por tamaño y la orientación o la estabilidad de la estructura, que están afectadas por la cantidad y la calidad de los residuos de cultivos, así como por el tipo y la distribución del sistema radical (Domzal *et al.*, 1991; Sasal *et al.*, 2006).

En trabajos previos se encontró relación negativa entre el ISI y el escurrimiento o la erosión hídrica y relación positiva con el contenido de C del suelo (Novelli *et al.* 2009; Darder *et al.*, 2010; Sasal *et al.*, 2010). Las secuencias más intensificadas, con períodos de barbecho despreciables, tuvieron los mayores valores de ISI que fueron asociados con las menores tasas de escurrimiento y erosión hídrica. Por el contrario, el monocultivo de soja tiene el menor valor de ISI=1. El doble cultivo trigo/soja de segunda es el cultivo secuencial más difundido y ocupa una mayor proporción de la estación de crecimiento, obteniendo una mayor y más eficiente captura de recursos con un mayor valor de ISI=2.

La producción de MS y grano dependen de la capacidad de los cultivos para capturar recursos. Para estudiar la eficiencia a nivel de la secuencia de cultivos se define la productividad de los recursos basada en la cantidad de granos o B producidos por unidad de recurso (radiación solar o lluvias) disponible durante el año (Caviglia *et al.*, 2004). Este concepto integra la eficiencia en el uso del recurso (cantidad de grano o B producida por unidad de recurso capturado) con la eficiencia de captura (cantidad de recurso capturado por unidad de recurso disponible).

La mejora de la captación de agua y la radiación no sólo puede aumentar la productividad y la eficiencia de todo el sistema, sino que también contribuir positivamente a la reducción de los problemas ambientales. De hecho, el aumento de la captación de la radiación solar por los cultivos podría aumentar el retorno de material vegetal en el sistema y el ciclado de nutrientes (Reeves, 1997), lo que puede mejorar el balance de carbono en el suelo (Studdert & Echeverría, 2000) y, como resultado la agregación del suelo (Novelli *et al.*, 2011).

Lograr en el suelo contenidos elevados de materia orgánica (MO) es clave para mantener la productividad de los cultivos por su efecto benéfico sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Bullock, 1992; Karlen *et al.*, 1994). Sin embargo, cuando se evalúa la aplicación de fertilizantes, sólo se contabiliza su efecto sobre el aumento de producción de los cultivos, dejando de lado el efecto positivo indirecto que aquellos ejercen a largo plazo sobre el suelo al incrementar la producción de rastrojos (Haynes & Naidu, 1998).

Tampoco se tiene en cuenta el efecto positivo que ejerce la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo, como la densidad aparente (Ds), porosidad total (PT), macroporosidad y estabilidad estructural, entre otras, que influyen sobre la dinámica hídrica y del aire en el suelo y sobre la resistencia a la penetración de las raíces de las plantas, cuyo correcto funcionamiento determina, en última instancia, la producción de biomasa y rendimiento de los cultivos (Letey, 1985).

El monocultivo de soja y la falta de rotaciones, la erosión, la quema de residuos y las labranzas convencionales fueron en parte responsables de la reducción del contenido de MO del suelo en Argentina, con el consecuente aumento de los procesos erosivos y la pérdida gradual de su potencial productivo. La MO se encuentra en el suelo en un continuo estado de transformación, sin existir límites definidos. Sin embargo, se pueden distinguir, al menos, dos fracciones muy diferentes: la compuesta por residuos orgánicos parcialmente transformados por la actividad biológica (MO joven o particulada-MOP) y

la constituida por compuestos orgánicos muy transformados, complejos y estables (MO vieja o humus) (Galantini & Suñer, 2008).

La cantidad de MOP del suelo es muy variable debido a que es sensible a los cambios de manejo (Galantini & Suñer, 2008), siendo muy importante por constituir una reserva de nutrientes para los cultivos. Las fuentes de variación más importantes son el sistema de labranza, las condiciones climáticas y la rotación de cultivos, especialmente el cultivo antecesor, debido a que afectan directamente el almacenamiento, el reciclado y la provisión de esos nutrientes para el adecuado desarrollo de los cultivos.

Durante la descomposición o mineralización de la materia orgánica, los nutrientes se liberan y pasan a estar en formas disponibles para las plantas. En situaciones donde la liberación es mayor que el requerimiento del cultivo (en el barbecho, por ejemplo), una parte de esos nutrientes puede perderse por diversos procesos (lixiviación, volatilización) ante la falta de cultivos que los absorban. En estas situaciones la fracción orgánica más estable puede adsorber una parte de esos nutrientes, para liberarlos posteriormente, cumpliendo así un rol fundamental en el ciclaje de los nutrientes en el suelo.

A pesar que la MO del suelo contribuye para mantener la productividad de los sistemas, solamente en algunos casos se ha observado una relación cuantitativa fuerte entre la MO y la productividad. Esto se debe a que, en muchos casos, el efecto es indirecto y a través de interacciones con otras propiedades del suelo. La pérdida de MO es un proceso que viene ocurriendo desde el inicio de la actividad agropecuaria y se le ha dado poca importancia, debido a que la degradación de las propiedades físicas del suelo dependientes de la MO sólo son afectadas cuando las pérdidas comienzan a ser importantes.

Sólo en la última década ha comenzado en Argentina el proceso de revalorización de este elemento constitutivo de los suelos y, asociado con esto, la busca de alternativas de producción que, además de ser rentables, permitan incrementar la cantidad de MO al suelo hasta niveles adecuados y, luego, a mantener estable el balance de MOS. En este sentido, existe un amplio acuerdo sobre las ventajas de realizar rotación de cultivos y utilizar el sistema de siembra directa para lograrlo, aunque los mecanismos involucrados son complejos y aún no están suficientemente claros.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el efecto de cambios en las propiedades físicas del suelo a través de la descompactación y las químicas a través de la fertilización con P y N sobre la productividad del agua y la radiación y sobre el balance

de carbono del suelo en una secuencia Soja(S)-T/S-T/S-Trigo (T) de tres años de duración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1- Productividad, eficiencia de uso y captura del agua y la radiación

El nivel de fertilización y compactación del suelo afectó significativamente la productividad y eficiencia en el agua para la producción de grano y B total (PA_G, PA_B, EUA_G y EUA_B) en la secuencia S-T/S-T/S-T como promedio de los 3 años (Tabla 3-1).

Se determinaron incrementos en el orden de 9,2 y 7,1% en la PA_G y en PA_B por aumento en la fertilización; mientras que, por efecto de descompactación se incrementó en 7,4 y 10,9% respectivamente. La PA_G estuvo dentro del rango reportado por Caviglia *et al.* (2013) para el sudeste bonaerense de 0,47 a 0,75 g m⁻² mm⁻¹, con valores simulados de 0,58 g m⁻² mm⁻¹ y, menores a los de Paraná (Entre Ríos) de 0,84 g m⁻² mm⁻¹. En tanto que, la PA_B para el doble cultivo trigo/soja osciló entre 1,57 a 1,86 g m⁻² mm⁻¹. Estos valores resultaron inferiores a los encontrados en Balcarce (Buenos Aires) para dos campañas diferentes 2,22 y 1,83 g m⁻² mm⁻¹, si bien estos últimos se calcularon sumando a la materia seca obtenida en R8, el aporte de hojas y pecíolos que senecieron del cultivo de soja.

De manera similar, la EUA_G y la EUA_B fueron significativamente superiores en los suelos descompactados en un 5,4 y 8,0% con respecto a los sd, mientras que en el nivel de alta fertilización aumentaron en un 6,8 y 4,3% respecto a los de baja. Los valores obtenidos de EUA_G y la EUA_B en los tratamientos descompactados (0,78 y 2,43 g m⁻² mm⁻¹) y, en alta fertilización (0,78 y 2,39 g m⁻² mm⁻¹) respectivamente, fueron inferiores a los informados en Balcarce (Buenos Aires), EUA_B de 3,12 a 3,41 g m⁻² mm⁻¹ y de EUA_G de 0,88 a 1,02 g m⁻² mm⁻¹, probablemente a la diferente metodología de cálculo como se mencionó anteriormente para obtener la EUA_B y al menor déficit de presión de vapor (DPV) del ambiente explorado por los cultivos en Balcarce y, similares EUA_G en comparación a 0,79 g m⁻² mm⁻¹ reportado por Daniels & Scott (1991) como un promedio general de varias fuentes de variación incluyendo año, riego y manejo de rastrojos.

Para poder efectuar una comparación de la EUA y la EUR entre cultivos que resulte equitativa desde el punto de vista de los requerimientos energéticos que presenta cada especie, resulta importante transformar el producto final de cada uno de ellos en sus

equivalentes de glucosa (Eq.gl.). Así se determinó que producir 1 g de soja es más costoso energéticamente que producir la misma cantidad de trigo (Sinclair & de Wit, 1975). La EUA_Eq.gl. presentó similar comportamiento que la EUA_G.

La eficiencia de captura del agua (ECA) no mostró diferencias según nivel de compactación y fertilización del suelo (Tabla 3-1), variando entre 74 y 75% según los tratamientos estos valores fueron inferiores a los obtenidos en Paraná (99%) y están más próximos a datos del sudeste bonaerense, donde se lograron capturas del 54 al 70% de las precipitaciones (Caviglia *et al.*, 2004, 2010).

Los valores menores de ECA con respecto a Paraná pueden deberse a las abundantes lluvias concentradas en la última semana de noviembre de 2009 y 2011; donde, el cultivo de trigo se encontraba en madurez fisiológica sin absorber agua y en diciembre de 2009 con el cultivo de soja en los primeros estadios fenológicos. Otros autores encontraron que el 66 % de la variabilidad de la PA_G estuvo explicada por los excesos de agua en el año (Caviglia *et al.*, 2013).

*Tabla 3-1. Productividad del agua en grano y en biomasa total (PA_G y PA_B, en g m⁻² mm⁻¹), eficiencia de uso del agua en grano y en biomasa total (EUA_G y EUA_B, en g m⁻² mm⁻¹), eficiencia de uso del agua en equivalente glucosa (EUA_Eq.gl) y eficiencia de captura del agua (ECA, en %) según nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja), nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) y su interacción (NF*NC) en la secuencia de cultivos soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo.*

		PA_G	EUA_G	EUA_Eq.gl.	PA_B	EUA_B	ECA
NF	A	0,59 b	0,78 b	1,24 b	1,80 b	2,39 b	75,0 a
	B	0,54 a	0,73 a	1,17 a	1,68 a	2,29 a	74,0 a
NC	d	0,58 b	0,78 b	1,25 b	1,83 b	2,43 b	75,0 a
	sd	0,54 a	0,74 a	1,17 a	1,65 a	2,25 a	74,0 a
NF*NC	Ad	0,61	0,79	1,26	1,79	2,44	77,0
	Bd	0,56	0,77	1,21	1,86	2,42	74,0
	Asd	0,57	0,77	1,22	1,73	2,36	74,0
	Bsd	0,52	0,7	1,12	1,57	2,14	74,0
Análisis de varianza							
NF		*	*	*	*	*	ns
NC		*	*	*	*	*	ns
NC*NC		ns	ns	Ns	Ns	ns	ns

Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$).

*ns: no significativo ($P > 0,05$); *: diferencia significativa ($P \leq 0,05$).*

La productividad de la radiación para la producción de biomasa y grano y la eficiencia de uso de la radiación para la producción de biomasa presentaron diferencias significativas a favor del suelo descompactado y con alta fertilización, pero sin interacciones NC*Nf significativas (Tabla 3-2).

Se determinaron incrementos en el orden del 13,3 y 8,3% para la PRG y PRB y del 5,2% en la EURB por aumento en la fertilización, mientras que por efecto de la descompactación se incrementó en el orden del 4,1 y 11,2% para la PRG y PRB respectivamente y del 7,5% en la EURB. Los datos obtenidos de PRG variaron entre 0,22 a 0,26 g MJ⁻¹, valores similares a los informados en el sudeste bonaerense (0,27 g MJ⁻¹) y en Paraná (0,21 g MJ⁻¹). La PRB fue de 0,78 para alta y 0,72 g MJ⁻¹ para bajo nivel de fertilización, en tanto que en suelos descompactados fue de 0,79 y 0,71g MJ⁻¹ en suelos sin descompactar, valores inferiores a los encontrados por Caviglia *et al.* (2004) de 0,8 y 1,02 g MJ⁻¹ en Balcarce y superiores a valores simulados 0,48 gMJ⁻¹ para la misma región, (Caviglia *et al.*, 2013)

*Tabla 3-2. Productividad de la radiación en grano y en biomasa total (PR_G y PR_B, en g m⁻² MJ⁻¹), eficiencia de uso de la radiación en grano y en biomasa total (EUR_G y EUR_B, en g m⁻² MJ⁻¹), eficiencia uso radiación en equivalente glucosa (EUR_Eq.gl.) y eficiencia de captura de la radiación (ECR, en %) según nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja), nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) y su interacción (NF*NC) en la secuencia de cultivos soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo.*

		PRG	EUR_G	EUR_Eq.gl.	PR_B	EUR_B	ECR
NF	A	0,26 b	0,46 a	0,73 b	0,78 b	1,41 b	56,0 b
	B	0,23 a	0,44 a	0,68 a	0,72 a	1,34 a	54,0 a
NC	d	0,25 b	0,44 a	0,72 a	0,79 b	1,42 b	56,0 b
	sd	0,24 a	0,45 a	0,69 a	0,71 a	1,32 a	54,0 a
NF*NC	Ad	0,26	0,46	0,74	0,81	1,46	57,0
	Bd	0,24	0,45	0,70	0,77	1,38	57,0
	Asd	0,25	0,45	0,71	0,75	1,37	54,0
	Bsd	0,22	0,42	0,67	0,65	1,27	53,0
Análisis de varianza							
NF		*	Ns	*	*	*	*
NC		*	Ns	Ns	*	*	*
NF*NC		ns	Ns	Ns	ns	ns	Ns

Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$).

*ns: no significativo ($P > 0,05$); *: diferencia significativa ($P \leq 0,05$).*

La ECR también presentó diferencias significativas para el nivel de alta y baja fertilización y suelo descompactado y sin descompactar, donde pudieron aprovechar el 56 y 54% de la radiación solar incidente anual respectivamente, valores superiores a los encontrados en Paraná del 44% en el doble cultivo trigo/soja. La EUR Eq. glucosa presentó diferencias significativas a favor de los cultivos que fueron más fertilizados con P y N, lo cual no se reflejó estadísticamente en la EUR G, debido principalmente a la mayor respuesta en rendimiento del trigo a la fertilización nitrogenada y a la composición del grano de menor costo energético con respecto a soja.

La atenuación de la limitante compactación al inicio de la secuencia y la mayor fertilización del suelo a lo largo de las tres campañas mejoró la PA_G, la PA_B, la EUA_G y la EUA_B; principalmente, por una mayor productividad del cultivo de soja por efecto de la descompactación del suelo y, por efecto de la mayor fertilización nitrogenada del trigo, siendo la ECA similar según NC o NF (ECA= 74-75%) (Tabla 3-1). En tanto que, la ECR fue del 56% tanto para el nivel alto de fertilización como para suelo d y del 54% para baja fertilización y suelo sd, siendo estas diferencias significativas (Tabla 3-2). Esto refleja una mejor adecuación del ciclo de cultivo con la precipitación y la diferente naturaleza de los recursos.

El agua puede ser almacenada en el suelo, atenuando así los desbalances entre la disponibilidad del recurso y la demanda. La captura de la radiación, en cambio, depende del tamaño y la estructura del canopeo en un momento dado, por lo que no hay mecanismos compensatorios para la recuperación de la radiación que no fue interceptada por el cultivo. La diferente respuesta para el agua y la radiación encontradas ofrecen ideas para el desarrollo de estrategias, basadas en la mejora de la captación de la radiación, para elevar la productividad anual de agua de la B y el Rdto en grano, ya que el agua puede ser parcialmente almacenada.

Al calcular la correlación de Spearman ($P < 0,05$) entre variables de cultivo la PA_G y PA_B mostraron correlación positiva y significativa con las variables EUA_G y EUA_B ($r = 0,96$ y $P < 0,0001$ y $r = 0,95$ y $P < 0,0001$) y con la ECA ($r = 0,74$ y $P < 0,0057$ y $r = 0,64$ y $P < 0,025$). La PR_G y la PR_B también se asociaron fuertemente con la EUR_G y la EUR_B ($r = 0,95$ y $P < 0,0001$ y $r = 0,96$ y $P < 0,0001$) y, en menor medida con al ECR ($r = 0,70$ y $P < 0,0110$ y $r = 0,79$ y $P < 0,0021$).

La fuerte correlación entre ECA y ECR ($r = 0,69$ y $P < 0,0110$), sumado a que el agua es un recurso acumulable y la radiación no acumulable, refuerza el concepto de que el aumento de la productividad requiere mejorar la captura de la radiación. Esta situación

se logró a través del efecto residual de la descompactación y una mayor fertilización de la secuencia de cultivos con N y P.

La EUA_G y la EUR_G se asociaron positiva significativamente ($r= 0,92$ y $P< 0,0001$) al igual que la EUA_B y la EUR_B ($r= 0,96$ y $P< 0,0001$) para el doble cultivo como promedio de los tres años de la secuencia. Este tipo de relaciones también fue encontrado por Caviglia *et al.* (2004, 2013).

Tabla 3-3. Matriz de correlación entre variables de suelo [densidad de suelo superficial y profunda (Ds, sup y prof), porosidad de aireación superficial y profunda (Pa, sup y prof) y resistencia a la penetración superficial y profunda (RP, sup y prof)] y de cultivo [productividad de la radiación en grano y en biomasa (PR_G y PR_B), productividad del agua en grano y en biomasa (PA_G y PA_B), eficiencia de uso de la radiación en grano y en biomasa (EUR_G y EUR_B), eficiencia de uso del agua en grano y en biomasa (EUA_G y EUA_B), EUA y EUR en equivalente glucosa (EUA_Eq.gl. y EUR_Eq.gl.), eficiencia de captura del agua (ECA) y eficiencia de captura de la radiación (ECR)] para la secuencia de cultivos en las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11. Coeficientes de Spearman. ns: diferencias no significativas ($P> 0,05$);: diferencias significativas ($P\leq 0,05$).*

	Variables de suelo					
	Ds (sup)	Ds (prof)	Pa (sup)	Pa (prof)	RP (sup)	RP (prof)
PR_G	-0,39 ns	-0,45 ns	0,42 ns	0,46 ns	-0,51 ns	-0,51 ns
PR_B	-0,60 *	-0,62 *	0,64 *	0,67 *	-0,71 *	-0,72 *
PA_G	-0,43 ns	-0,49 ns	0,49 ns	0,50 ns	-0,57 ns	-0,56 ns
PA_B	-0,60 *	-0,61 *	0,64 *	0,67 *	-0,71 *	-0,72 *
EUR_G	-0,34 ns	-0,37 ns	0,39 ns	0,37 ns	-0,46 ns	-0,43 ns
EUR_B	-0,56 ns	-0,53 ns	0,61 *	0,59 *	-0,66 *	-0,65 *
EUA_Eq.gl.	-0,42 ns	-0,50 ns	0,50 ns	0,51 ns	-0,56 ns	-0,55 ns
EUR_Eq.gl.	-0,38 ns	-0,44 ns	0,44 ns	0,42 ns	-0,48 ns	-0,46 ns
EUA_G	-0,32 ns	-0,41 ns	0,42 ns	0,44 ns	-0,49 ns	-0,48 ns
EUA_B	-0,53 ns	-0,53 ns	0,59 ns	0,60 *	-0,65 ns	-0,65 *
ECA	-0,50 ns	-0,55 ns	0,48 ns	0,52 ns	-0,57 ns	-0,58 *
ECR	-0,52 ns	-0,59 *	0,53 ns	0,64 *	-0,63 *	-0,68 *

Del análisis de correlación de las variables de cultivo y suelo para la secuencia S-T/S-T/S-T (Tabla 3-3) se determinó que todos los parámetros de suelo evaluados se correlacionaron significativamente con la PR_B y PA_B en forma negativa con la Ds (sup y prof) y la RP (sup y prof) y, positivamente con la Pa (sup y prof). La RP en profundidad es la que más asociaciones negativas y significativas tuvo con las variables de cultivo EUR_B, EUA_B, ECA y ECR, lo que señala la fuerte influencia de esta propiedad del suelo para reducir la productividad de los cultivos.

3- Balance de carbono del suelo

La producción de B aérea total de trigo (B_T) y los aportes al suelo de su rastrojo (R_T) acumulado a lo largo de tres años mostraron un efecto positivo y significativo al agregado de mayores dosis de fertilizante nitrogenado, sin diferencias debido al efecto residual de la descompactación (Tabla 3-4). Se sabe que la fertilización nitrogenada aumenta la producción de B de los cultivos, lo que provoca una mayor acumulación de C en los tejidos vegetales y una elevada devolución de los mismos al suelo (Fabrizzi *et al.*, 2003; Eiza, 2005).

La soja manifestó mayores producciones de B total medida en R8 sin hojas (B_S) y aporte de rastrojo (R_S) por efecto de la descompactación del suelo sin diferencias significativas a la mayor fertilización con fósforo (P). La escasa respuesta al nivel alto de fertilización (A) con respecto al nivel bajo (B) puede deberse, a un mayor desarrollo de pelos radicales en situaciones de menor contenido de P, debido a que la densidad de pelos radicales se encuentra altamente regulada por la disponibilidad de dicho nutriente, aumentando significativamente en raíces que crecen en suelos con menor disponibilidad del mismo (Ma *et al.*, 2001).

La mayor densidad longitudinal de pelos radicales facilita la absorción de nutrientes aumentando la superficie de absorción de la raíz y permiten una mayor exploración del volumen del suelo (Bates & Lynch, 1996). Si bien como fue mencionado anteriormente en el rango de dosis exploradas de 14 a 26 kg P ha⁻¹ aplicadas en este ensayo las respuestas en producción pueden ser menores.

La producción total de B, de trigo y soja [B(T+S)] fue afectado por el nivel de fertilización y compactación (Tabla 3-4). Se midió un aumento del 6,85 y 10,6% en la B(T+S) en la dosis alta de fertilizante principalmente por el impacto mayor de la fertilización con N en trigo y por efecto de d, respectivamente. Si bien el rastrojo de trigo fue mayor con alta fertilización y aportó mayor cantidad de rastrojo que la soja, la suma

de rastrojos acumulados de trigo y soja de la secuencia R(T+S) sólo mostró diferencias según el NC, con un 12,1% más de aporte en los suelos d (Tabla 3-4).

El aporte de C de rastrojo (C_R) y el C año⁻¹ se calculó estimando que un 40% de la biomasa total es carbono, dividido por 3 años que duró la secuencia. El rango de valores de C año⁻¹ determinados en este estudio son levemente inferiores a los reportados por Álvarez (2005) para suelos de la Pampa Ondulada bajo la secuencia trigo/soja.

Tabla 3-4. Producción de biomasa aérea total de trigo (B T), soja (B S) y de trigo-soja [B (T+S)], aporte de rastrojos al suelo de trigo [R (T)], soja [R (S)] y de trigo-soja [R (T+S)]; aporte de carbono a través de los rastrojos [aporte C(R)] y aporte de C por año (aporte C/Año) según nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja), nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar) y su interacción (NF*NC) en la secuencia de cultivos soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo, expresado en g m⁻².

		B_T	B_S	B(T+S)	R_S	R_T	R(T+S)	C_R	C año ⁻¹
NF	A	3252 b	2617 a	5869 b	1729 a	2230 b	3959 a	1655 a	552 a
	B	2964 a	2529 a	5493 a	1683 a	2047 a	3730 a	1567 a	522 a
NC	d	3201 a	2767 b	5968 b	1854 b	2200 a	4054 b	1703 b	568 b
	sd	3016 a	2378 a	5394 a	1557 a	2061 a	3618 a	1519 a	506 a
NF*NC	Asd	3248	2410	5658	1579	2223	3802	1597	532
	Bsd	2783	2346	5129	1535	1898	3433	1442	481
	Ad	3256	2824	6079	1877	2203	4081	1714	571
	Bd	3145	2712	5857	1830	2197	4026	1691	564
Análisis de varianza									
NF		*	ns	*	ns	*	ns	ns	ns
NC		ns	*	*	*	ns	*	*	*
NF*NC		ns							

Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$).

ns: no significativo ($P > 0,05$); *: diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

En la Tabla 3-5 se presenta el balance de carbono para la secuencia S-T/S-T/S-T de 3 años de duración. En la misma se detallan los aportes de CO al humus del rastrojo más las raíces a la materia orgánica sumados cada uno de los cultivos de la rotación, al igual que las pérdidas de CO del suelo y el contenido de CO del suelo a 30 cm de profundidad expresados en unidades de masa (tn C ha⁻¹). Las pérdidas de CO y contenido de CO suelo no presentaron diferencias significativas, según NF, NC ni interacción NF*NC.

Tabla 3-5. Aporte, Pérdida y Balance de carbono del suelo para la secuencia de cultivo soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo, total 3 años duración ($Tn C ha^{-1}$), Toneladas de CO del suelo a 30 cm (Ton COS) promedio de la secuencia y porcentaje de aumento o disminución del CO respecto Ton CO suelo a 30 cm (%+ -); según NC (nivel de compactación, d y sd), NF (nivel de fertilización A y B) y NF*NC (Ad= alta fertilización descompactado; Asd= alta fertilización sin descompactar; Bd= baja fertilización descompactado; Bsd= baja fertilización sin descompactar).

		Ton COS	Aporte C	Pérdida C	Balance	%+ -
NF	A	51,8 a	9,81 a	8,87 a	0,93 a	1,79
	B	50,9 a	9,29 a	8,72 a	0,57 a	1,11
NC	d	50,2 a	10,1 b	8,58 a	1,51 b	3,00
	sd	52,6 a	8,99 a	9,02 a	-0,01 a	0,00
	Asd	52,4	9,44	8,96	0,48	0,90
NF*NC	Bsd	52,9	8,55	9,05	-0,5	-0,90
	Ad	51,3	10,17	8,78	1,39	3,56
	Bd	49,1	10,03	8,39	1,64	2,68
Análisis varianza						
NF		ns	ns	ns	ns	
NC		ns	*	ns	*	
NF*NC		ns	ns	ns	ns	

Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$).
ns: no significativo ($P > 0,05$); *: diferencia significativa ($P \leq 0,05$).

Si bien la realización de una labor vertical (paratill) incrementa la aireación del suelo (Balesdent *et al.*, 1998) y rompe los macroagregados (Six *et al.*, 2000; Sotomayor-Ramírez *et al.*, 2007), resultando en una mayor oxidación de la MO del suelo (Lal, 1989), en este estudio se verificó que en las parcelas descompactadas (d) al inicio del ensayo luego de 3 años de la secuencia S-T/S-T/S-T se logró un balance de C positivo aumentando un 3% el contenido promedio de COS y en las sd el balance fue negativo, casi nulo, manteniendo el stock de COS (Tabla 3-5).

Los suelos d lograron incorporar más carbono al suelo con respecto a los sd, debido a la mejor condición física de los mismos en la secuencia de cultivos por efecto residual de la labor con paratill sobre las variables de suelo RP y Pa (sup y prof) como fue presentando en el capítulo anterior.

Álvarez (2005) estimó el balance de carbono para distintas rotaciones T/S; T/S-M; T/S-M-S-S en suelos de la región pampeana, donde la secuencia T/S presentó las menores caídas de los contenidos de carbono por ser la de mayor nivel de aportes de

carbono al humus y en un caso obtuvo un incremento del contenido de carbono del suelo bajo esta secuencia. A medida que se incrementó la proporción de soja en la rotación fue más pronunciada la disminución del nivel de carbono del suelo.

En las parcelas con mayor fertilización hubo una pequeña mejora no significativa con un balance más positivo respecto a B en el contenido de COS (1,79 vs. 1,11%), lo que coincide con los resultados de otros autores que no siempre pudieron encontrar un efecto positivo significativo del uso de fertilizantes sobre el balance de C en el suelo (Gonzalez Montaner *et al.*, 2004; Galantini & Rosell, 2006).

Esto lo atribuyeron a diferencias en la eficiencia en el uso del nutriente adicionado, la que es determinante de la cantidad de biomasa producida y, consecuentemente, del carbono que se adiciona al suelo (Galantini & Suñer, 2008), teniendo en cuenta también el muy corto plazo del presente ensayo.

Análisis de la Materia Orgánica Particulada (MOP)

Los datos de este trabajo de CO total (COT) y de carbono asociado a fracciones más gruesas > 50 μm (C-MOP) a 10 cm de profundidad no mostraron diferencias significativas al cabo de la secuencia de 2 cultivos Trigo/Soja, según el NF y NC en el inicio (mayo 2009) y final de la misma (mayo 2010) (Tabla 3-6).

Tabla 3-6. Carbono orgánico total (COT) y carbono asociado a la materia orgánica particulada a 10 cm de profundidad (C-MOP) al inicio (mayo 2009) y al final (mayo 2010) de la secuencia trigo/soja según el nivel de fertilización (NF, A= alta y B= baja) y el nivel de compactación (NC, d= descompactado y sd= sin descompactar).

		Mayo 2009		Mayo 2010	
		COT	C-MOP	COT	C-MOP
		(%)	(g kg ⁻¹)	%	(g kg ⁻¹)
NF	A	1,64 a	0,20 a	1,71 a	0,23 a
	B	1,64 a	0,22 a	1,73 a	0,24 a
NC	D	1,63 a	0,20 a	1,73 a	0,24 a
	Sd	1,65 a	0,22 ^a	1,71 a	0,23 a
CV (%)		4,1	22	4,5	11
Análisis de varianza					
NF		ns	Ns	ns	ns
NC		ns	Ns	ns	ns

Letras diferentes dentro de una columna indican diferencias según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$); *: diferencia significativa ($P \leq 0,05$). CV (%): coeficiente de variación.

El C-MOP puede resultar en un indicador más sensible a los efectos del uso del suelo que el COT, motivo por el cual puede utilizarse como indicador temprano del efecto de la rotación de cultivos, de la fertilización o del sistema de labranza sobre la calidad del suelo (Haynes, 2000; Six *et al.*, 2002). Debido probablemente al muy corto plazo (1 año) entre mediciones en este ensayo no se detectaron diferencias.

CONCLUSIONES

La productividad y eficiencia de uso del agua para la producción de grano y biomasa total presentaron diferencias significativas a favor del suelo descompactado y para el nivel alto de fertilización, principalmente por una mayor productividad del cultivo de soja por efecto de la descompactación del suelo y del trigo por efecto de la mayor fertilización nitrogenada.

La eficiencia de captura del agua (ECA) no mostró diferencias según nivel de compactación y fertilización pero sí la eficiencia de captura de la radiación (ECR); la diferente respuesta para el agua y la radiación y la correlación positiva entre ECA y la ECR encontradas ofrecen ideas para el desarrollo de estrategias, basadas en la mejora de captación de la radiación, para mejorar la productividad anual de agua de la biomasa y el rendimiento en grano, ya que el agua puede ser parcialmente almacenada.

En la secuencia de cultivos en su conjunto la EUR_B, EUA_B, ECA y ECR, se asociaron en forma negativa con la variable de suelo RP en profundidad, lo que señala la fuerte influencia que esta propiedad tiene para reducir la productividad de los cultivos, resultando ser estas variables de cultivo las más adecuadas para la detección de cambios en el corto plazo de las propiedades del suelo.

El potencial de la siembra directa se vio limitado por una menor calidad física del suelo en los horizontes superficiales en los tratamientos sin descompactar, aunque fue atenuado por una mayor fertilización afectando indirectamente la eficiencia de uso y la productividad de los recursos del sistema.

La mejora en la calidad física del suelo, debido a la descompactación y a la persistencia de su efecto positivo, y de su fertilidad química, lograda mediante fertilización estratégica, permitió incrementar la producción de biomasa y el retorno de rastrojo al suelo a lo largo de los 3 años de la secuencia. Como consecuencia, ambas prácticas tecnológicas contribuyeron a elevar el aporte de carbono al suelo y a potenciar el efecto positivo de la siembra directa.

CONCLUSIONES FINALES

La siembra directa es una tecnología que presenta numerosas ventajas agronómicas, especialmente en lo que respecta a la conservación del recurso suelo, en comparación con el sistema de labranza y siembra tradicional. Sin embargo, dicho sistema ha sido asociado a la existencia de compactación en los suelos, especialmente en los de textura limosa y cuando se realiza la secuencia trigo/soja. Diversos estudios presentan las curvas de respuesta productiva de estos cultivos a la fertilización. Por el contrario, trabajos que muestren la respuesta de estos cultivos a la descompactación y fertilización del suelo en condiciones de campo son escasos; más aún, trabajos que traten de relacionar el comportamiento de variables ecofisiológicas con atributos del suelo con el propósito de identificar aquellos que se puedan utilizar como indicadores de cambios que ocurren en el corto plazo en la calidad del suelo son inexistentes. Este trabajo contribuye con conocimiento inédito a la temática mencionada.

La fertilización con nitrógeno y fósforo, acorde a la demanda del trigo, permitió lograr mayor eficiencia del uso del agua y mayor producción de biomasa total, además de incrementar el aporte de rastrojos y mejorar la calidad física subsuperficial del suelo (8-13 cm), que se reflejó en la menor resistencia a la penetración y mayor porosidad de aeración al finalizar el estudio en los tratamientos sin descompactar.

La fertilización con fósforo en el cultivo de soja no modificó significativamente el nivel de respuesta en rendimiento del cultivo a la compactación del suelo a lo largo de las tres campañas. La respuesta positiva al efecto de la descompactación sobre las eficiencias en el uso del agua, radiación y fósforo se manifestaron sólo en condiciones limitantes de agua.

La práctica de descompactación logró mejorar la productividad y eficiencia en el uso de los recursos en la secuencia de cultivos. Las fertilizaciones con fósforo realizadas a la siembra de los cultivos de trigo y soja lograron elevar el contenido de fósforo en el suelo al finalizar el tercer año de estudio. Las variables ecofisiológicas estudiadas fueron más sensibles a la compactación en el cultivo de soja respecto a trigo, dependiendo de la distribución de lluvias durante las distintas campañas. La variable de suelo resistencia a la penetración en profundidad tuvo una fuerte influencia en la productividad del agua y radiación, permitiendo identificar a la eficiencia de uso de la radiación y el agua para la producción de biomasa y la eficiencia de captura de éstos recursos, como variables de

cultivo adecuadas para la detección de cambios en el corto plazo de las propiedades físicas de suelo.

La porosidad de aireación disminuyó y la resistencia a la penetración del suelo se incrementó con el transcurso del tiempo (3 años), pero en aquellos tratamientos en que el suelo fue descompactado los valores de porosidad de aireación fueron superiores y los de resistencia inferiores a los medidos en los tratamientos sin descompactar. Estos resultados revelan la existencia de un efecto residual de la descompactación inicial, detectable aún después de tres años de su realización.

El indicador de calidad de suelo intervalo hídrico óptimo permitió establecer que existieron dos condiciones físicas de suelo en las cuales las plantas exhibieron un comportamiento productivo diferente. Un ambiente de mejor calidad física, constituido por los suelos descompactados y, otro de inferior calidad física de suelo, conformado por los tratamientos sin descompactar, en los que el crecimiento del cultivo de soja y trigo fue más restringido cuanto mayor fue la frecuencia en que el contenido hídrico del suelo estuvo fuera de los límites del intervalo hídrico óptimo.

En este estudio se verificó que la aplicación conjunta de las prácticas culturales de descompactación y fertilización permitieron aumentar la incorporación de carbono al suelo, especialmente vía el aporte de residuos del cultivo de trigo, aumentando por lo tanto el secuestro de carbono. Esto es de gran importancia tanto para mantener la sostenibilidad del recurso suelo y la productividad en el largo plazo, como desde el punto de vista de disminuir el impacto ambiental que ejerce la agricultura por la liberación de dióxido de carbono sobre el calentamiento de la atmósfera.

En base a los resultados obtenidos no se encontraron evidencias suficientes para aceptar la hipótesis 1, donde la atenuación de la compactación y la fertilización con N no mostró aumentos en la captura y EUN en trigo; y la EUP en soja disminuyó con alto nivel de P, si bien la EUR y EUA aumentaron en ambos cultivos.

Se acepta la hipótesis 2, ya que se obtuvo una mayor productividad del agua y radiación para la producción de grano y biomasa debido principalmente a una mayor EUA y captura de la radiación respectivamente, logrando un mayor aporte de carbono al suelo, contenido de P y mejores condiciones físicas del suelo en la secuencia de cultivos.

Además, se detectaron inter-relaciones entre variables de productividad, eficiencia y captura del agua y radiación de los cultivos de la secuencia en su conjunto y variables físicas de suelo. Estos resultados son el principal hallazgo de esta tesis, ya que corroboran la tercera hipótesis que establece que existen ciertas variables ecofisiológicas

de los cultivos que permiten inferir los cambios que ocurren en la calidad del suelo. Esto tiene gran importancia dado que midiendo pocas variables, en determinados estados fenológicos de los cultivos, se puede inferir la evolución de la calidad del suelo.

Especulaciones agronómicas

La elección de cultivares y manejo para el doble cultivo T/S debería incluir características y prácticas tecnológicas que permitan adaptar la fenología, su período de crecimiento, con la oferta ambiental de recursos. La implementación de estrategias productivas que se basen en la mejora de captación de la radiación y de la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada permite mejorar la productividad anual del agua para la producción de biomasa y grano, debido a la asociación positiva entre la eficiencia de captura de la radiación y el agua, y también aumentar el secuestro de carbono en el suelo. Los hallazgos de este trabajo demuestran que no sólo la evolución del rendimiento en el tiempo es un indicador adecuado del manejo de los cultivos y del suelo; también las variables ecofisiológicas de los cultivos, como la eficiencia en el uso del agua y la radiación, pueden ser utilizados como indicadores válidos para determinar la necesidad de introducir correcciones en el sistema de manejo empleado (rotación, fertilización, descompactación), con la finalidad de potenciar los beneficios de la siembra directa en suelos limosos como los de centro-norte de la provincia de Santa Fe. Este tipo de estudios deberían continuarse por más tiempo para ver si los resultados permanecen estables en el largo plazo y con otras secuencias/rotaciones de cultivos con la finalidad de establecer que variables ecofisiológicas pueden ser utilizadas como indicadores de la evolución de la calidad del suelo para otras alternativas productivas.

BIBLIOGRAFIA

- AAPRESID. 2012. Asociación Argentina de productores en siembra directa. Disponible en la World Wide Web en <http://www.apresid.org.ar/>. Acceso: 09 marzo 2014.
- ABBATE, P.E.; J.L. DARDANELLI; M.G. CANTARERO; M. MATURANO; R.J.M. MELCHIORI & E.E. SUERO. 2004. Climatic and water availability effect on water-use efficiency in wheat. *Crop. Sci.* 44: 474-483.
- ABBATE, P.E. & M.G. CANTARERO. 2007. Efectos del estrés hídrico en trigo. Disponible en la World Wide Web <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/cereales/trigo/sis/abbate4.htm/>. Acceso: mayo 2013.
- ADEOYE, K.B. 1982. Effect of tillage depth on physical properties of a tropical soil on yield of maize, sorghum and cotton. *Soil Tillage Res.* 2: 225-231.
- AHMAD, N.; F.U. HASSAN & R.K. BELFORD. 2009. Effects of soil compaction in the subhumid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*): II, Alleviation. *Field Crops Research.* 110: 61-68.
- ALBARENQUE, S.M.; O.P. CAVIGLIA & R.J.M. MELCHIORI. 2010. Simulación de la evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua en cultivares de trigo de ciclo contrastante sobre dos suelos. Actualización Técnica Cultivos de Invierno N° 100. EEA Paraná (INTA).
- ÁLVAREZ, C.R.; F.H. GUTIERREZ BOEM; M.A. TABOADA; P. PRYSTUPA & J.F. OCAMPO. 2004. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires (pp.: 238). En *Actas 19° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- ÁLVAREZ, C.R.; M. Torres Duggan; E.R. Chamorro; D. D'Ambrosio & M.A. Taboada. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Cienc. Suelo.* 27 (2): 159-169.
- ÁLVAREZ, C.R.; M.A. TABOADA; C. BUSTINGORRI & F.H. GUTIERREZ BOEM. 2006. Descompactación de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Cienc. Suelo.* 24 (1): 1-10.
- ÁLVAREZ, C.R.; P.L. FERNÁNDEZ & M.A. TABOADA. 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la región pampeana. *Ciencia del Suelo.* 30: 173-178.
- ÁLVAREZ, R. & H.S. STEINBACH. 2006. Manejo agronómico y disponibilidad de nitrógeno en el suelo (pp.: 137-164). En: R. Álvarez (ed.). *Materia Orgánica: valor*

- agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Ed. FAUBA. Buenos Aires, Argentina.
- ÁLVAREZ, R. & R.S. LAVADO. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*. 83: 127–141.
- ÁLVAREZ, R. 1998. Balance de carbono y mineralización de la materia orgánica humificada en suelos de la Pampa Ondulada (pp. 27-28). 16º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- ÁLVAREZ, R. 2005. Carbon stocks in pampean soils: a simple regression model for estimation of carbon storage under non degraded scenarios. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 1583-1589.
- ALZUGARAY, C.; M.S. VILCHE & C. PETENELLO. 2008. Labor profunda en siembra directa: efecto sobre la condición biológica del suelo. *Cien. Inv. Agr.* 35 (3): 265-276.
- ALLEN, R.G.; S.L. PEREIRA; D. RAES & M. SMITH. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper Roma. 56: 29-86.
- ALLEN, R.G.; S.L. PEREIRA; D. RAES & M. SMITH. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO, Roma, Italia. 298 pp.
- AMIR, J.; J. KRIKUN; D. ORION; J. PUTTER & S. KLITMAN. 1991. Wheat production in an arid environments: I. Water-use efficiency, as affected by management practices. *Field Crops Res.* 27: 351-364.
- ANDRADE, F.H.; H.E. ECHEVERRÍA; N.S. GONZÁLEZ & S.A. UHART. 2000. Requerimientos de nutrientes minerales (pp.: 207-233). En: F.H. Andrade y V.O. Sadras (eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Ed. Médica Panamericana S.A.
- ANDRIANI, J.M.; F.H. ANDRADE; E.E. SUERO & J.L. DARDANELLI. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans: I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and yield components. *Agronomie*. 11: 737-746.
- ANDRIANI, J.M. 1997. Uso del agua y del riego (pp.: 143-150). En: L. Giorda & H. Baigorri (eds.). El cultivo de la soja en Argentina. Ed: Córdoba. Córdoba, Argentina.
- ANDRIANI, J. 2000. Crecimiento de las raíces de los principales cultivos extensivos en Argiudoles de Santa Fe. *EEA INTA Oliveros. Para Mejorar la Producción*. 13: 40-44.

- ANDRIULO, A.; M. BRUNO & J. GUERIF. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agriculture and Environment Agronomic*. 19: 365-377.
- AOAC. 1990. Official Methods of analysis of the AOAC. 14 th ed. AOAC, Washington, DC.
- ARAUJO, M.A.; C.A. TORMENA & A.P. DA SILVA. 2004. Propiedades físicas de um Latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Rev. Bras. Ci. Solo*. 28: 337-345.
- ARVIDSSON, J. & I. HAKANSSON. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil Till. Res*. 39: 175-197.
- ASTEGIANO, E. 2002. Análisis del fenómeno de Retención Foliar y Tallo Verde en el cultivo de soja. Campaña 2001/2002, región centro-norte de la provincia de Santa Fe (pp. 35-36). 3º Jornada de la Unidad Experimental de Cultivos Extensivos. FCA, UNL. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- ASTEGIANO, E.; E. REPETTO; H. VICENTIN; O. ZEN & N. ROSSI. 2002. Análisis de la campaña de soja 2001/2002, región centro-este de la provincia de Santa Fe (pp. 37-41). 3º Jornada de la Unidad Experimental de Cultivos Extensivos. FCA, UNL. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- ASTEGIANO, E.; O.M. HERMANN; G. LEURINO & J. MENEGÓN. 2003. Comportamiento de componentes de rendimiento en cultivares de trigo nuevos para la región central de la provincia de Santa Fe. *FAVE, Sección Ciencias Agrarias*. 2 (1): 19-28.
- ASTEGIANO, E.; H. IMVINKELRIED; O.M. HERMANN & M. PIETROBÓN. 2006. Efecto de la temperatura sobre el secado de los granos y la generación de granos verdes en soja (pp. 71-74). 3º Congreso de Soja del Mercosur. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- AZOOZ, R.H; B. LOWERU & T. DANIEL. 1995. Tillage and residue management influence on corn growth. *Soil and Tillage Research*. 33: 215-227.
- BACIGALUPPO, S.; M.L. BODRERO; M. BALZARINI; G.R. GERSTER; J.M. ANDRIANI; J.M. ENRICO & J.L. DARDANELLI. 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *European Journal of Agronomy*. 35: 247-254.

- BAKER, H. 1987. Effects of tillage practices on cotton double cropped with wheat. *Agrom. J.* 79: 513-516.
- BALESDENT, J.; E. BESNARD; D. ARROUAYS & C. CHENU. 1998. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forestcultivation sequence. *Plant Soil.* 201: 49-57.
- BALZARINI, M.; C. BRUNO & A. ARROYO. 2005. Análisis de ensayos agrícolas multiambientales, ejemplos en Info-Gen. Ed. Brújas. Córdoba, Argentina. 141 pp.
- BARBER, R.G. & O. DÍAZ. 1992. Effects of deep tillage and fertilization on soya yields in a compacted Ustochrept during seven cropping seasons, Santa Cruz, Bolivia. *Soil Till. Res.* 22: 371-381.
- BARBER, S.A. 1984. Nutrient placement. Chapter 21. In: *Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach.* Ed: John Wiley & Sons, Inc. 368-388.
- BARBERIS, L.A. DUARTE, G. SFEIR, A. MARBAN L. & M. VÁZQUEZ 1987. Respuesta de trigo a la fertilización fosforada en la Pampa Arenosa húmeda y su predicción. *Ciencia del Suelo*, 5:166-174.
- BARRACLOUGH, P.B. & A.H. WEIR. 1988. Effects of a compacted subsoil on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat. *J. Agric. Sci.* 110: 207-216.
- BATES, T.R. & J.P. LYNCH. 1996. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability. *Plant, Cell & Environment.* 19 (5): 529-538.
- BAUER, A. & A.L. BLACK. 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Science Soc. Am. J.* 58: 185-193.
- BENGOUGH, A.G. & C.E. MULLINS. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science.* 41: 341-358.
- BENGOUGH, A.G.; M.F. BRANSBY; J. HANS; S.J. MCKENNA; T.J. ROBERTS & T.A. VALENTINE. 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J. Exp. Botany.* 57: 437-447.
- BENGOUGH, A.G.; B.M. MCKENZIE; P.D. HALLETT & T.A. VALENTINE. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Botany.* 62: 59-68.
- BENJAMIN, J.G.; D.C. NIELSEN & M.F. VIGIL. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma.* 116: 137-148.

- BENNIE, A.T. & F. J. BOTHA. 1986. Effect of deep tillage and controlled traffic on root growth, water use efficiency and yield of irrigated maize and wheat. *Soil and Tillage Research*. 7: 85-95.
- BERARDO, A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. Simposio: El fósforo en la agricultura Argentina. INPOFOS y Bolsa de Comercio de la Ciudad de Rosario. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- BERMUDEZ, M.; M. DIAZ ZORITA; G. ESPOSITO; G. FERRARIS; G. GERSTER; M. SAKS; F. SALVAGIOTTI & L.A. VENTIMIGLIA. 2014. Fertilización con fósforo en secuencias continuas de soja. Actas 24º Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Bahia Blanca, Argentina.
- BEUTLER, A.N. & J.F. CENTURION. 2004. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. 61 (6): 626-631.
- BEUTLER, A.N.; J.F. CENTURION & A.P. DA SILVA. 2005. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean in a Haplustox from Brasil. *Braziliam. Archives of Biology and Technology*. 48: 863-871.
- BINGHAM, I.J. 2001. Soil-root-canopy interactions. *Ann. Appl. Biol.* 138: 243-251.
- BLAKE, G.R. & K.H. HARTGE. 1986. Bulk density (pp.: 363-375). In: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. Ed. America Society of Agronomy. Madyson.
- BOARD, J.E. & B.G. HARVILLE. 1994. A criteria for acceptance of narrow-row culture in soybean. *Agron. J.* 86: 1103-1106.
- BOARD, J.E. & Q. TAN. 1995. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Sci.* 35: 846-851.
- BONEL, B.; S. MONTICO; G. SPONDA & N. SPURINO. 2005. Descompactación del suelo mediante el uso de escarificadores en Argiudoles típicos del sur de Santa Fe (pp.: 1-11). En: D. Jorajuría (ed.). *Reología de suelos bajo tráfico*. Ed. EDULP. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- BONEL, B. & S. MONTICO. 2007. Las posibilidades del escarificado en suelos del sur de Santa Fe. *Agromensajes*. 21 (4): 26-36.
- BOTTA, G.F.; D. JORAJURIA & L.M. DRAGHI. 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics*. 39 (1): 47-54.

- BOTTA, G.F.; D. JORAJURIA; R. BALBUENA & H. ROSATTO. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil Till. Res.* 78 (1): 53-78.
- BOTTA, G.F.; D. JORAJURIA; R. BALBUENA; M. RESSIA; C. FERRERO; H. ROSATTO & M. TOURN. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Heliantus annus* L.) yields. *Soil Till. Res.* 91: 164-172.
- BOYER, J.S 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218:443-448.
- BRAVO, C. 1993. Efecto de diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento del cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) en un Alfisol del estado Guárico. Tesis Posgrado en Ciencias del Suelo. Facultad de Agronomía. UCV. Maracay. Pp. 117.
- BRAY, R.H. & L.T. KURTZ. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- BROWN, D.A.; L.J. CLARK; J.R.H. HOWARTH; S. PARMAR & M.J. HAWKESFORD. 2006. Mechanical impedance and nutrient acquisition in rice. *Plant Soil.* 280: 65-76.
- BROWN, H.E.; D.J MOOT; A.L FLETCHER & P.D JAMIESON. 2009. A framework for quantifying water extraction and water stress responses of perennial Lucerne. *Crop Pasture Sci.* 60:785-794.
- BROWN, S.; M.T. WHITWELL; J.T. TOUCHTON & C.H. BURMESTER. 1985. Conservation tillage systems for cotton production. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49: 1256-1260.
- BULLOCK, D.G. 1992. Crop rotation. *Crit. Rev. Plant Sci.* 11: 309-326.
- BUSSCHER, W. J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transaction ASAE* 33:519-524.
- BUSSCHER, W.J.; J.R. FREDERICK & P.J. BAUER. 2000. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 64: 999-1003.
- BUSSCHER, W.J.; P.J. BAUER & J.R. FREDERICK. 2006. Deep tillage management for high strength southeastern USA Coastal Plain soils. *Soil Till. Res.* 85: 178-185.
- CALDERINI, D.F.; M.F. DRECCER & G.A. SLAFER. 1995. Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and the latest trends. *Plant Breed.* 114: 108-112.

- CALDERINI, D.F.; M.F. DRECCER & G.A. SLAFFER. 1997. Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat. *Field Crops Res.* 52: 271-281.
- CALDERINI, D.F., L.G. ABEDELO, R. SAVIN & G. A. SLAFER. 1999. Final grain weight in wheat as affected by short periods of high temperatures during pre-and post-anthesis under field conditions. *Aust. J. Plant Physiol.*, 26: 452-458.
- CAMP, C.R. & W.R. GILL. 1969. The effect of drying on soil strength parameters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 641-644.
- CAMPBELL, C. A.; B.G. MCCONKEY; R.P. ZENTNER; F. SELLES & D. CURTIN. 1996. Long-term effects of tillage and crop rotations on soil organic C and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 76: 395-401.
- CAMUSSI, G.F. & R.P. MARANO. 2008. Respuesta del trigo al riego suplementario en la región central de Santa Fe. *Revista FAVE.* 7: 7-21.
- CAMUSSI, G.F. & R.P. MARANO. 2009. Calibración de una sonda de capacitancia para determinación de contenido hídrico en Argiudoles del centro de Santa Fe (pp. 353-358). En: N. Di Leo, S. Montico & G. Nardón (eds.). *Avances de la Ingeniería Rural.* Ed. UNR. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- CARRIZO, M.E; PILATTI, M. A; ALESSO, C.A & S. del C. IMHOFF. 2011. Atributos químicos de suelos argiudoles cultivados y no cultivados del departamento Las Colonias (Santa Fe). *Cienc. suelo*, vol.29, n.2 , pp. 173-179.
- CASTELLARIN, J.; F. SALVAGIOTTI; J. ANDRIANI; H. PEDROL; O. ROSSO & D. DIGNANI. 2005. Influencia de la disponibilidad de agua y de la radiación sobre parámetros fisiológicos en cultivares de trigo con diferente estructura de canopeo. 7° Conferencia Mundial de Trigo. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- CASTELLARIN, J.M.; J. ANDRIANI; H.M. PEDROL & F.J. FERRAGUTI. 2007. Influencia de la disponibilidad de nitrógeno y del genotipo sobre la eficiencia en el uso del agua y la radiación bajo condiciones hídricas no limitantes en trigo pan. 1° Workshop Internacional de Ecofisiología Vegetal. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- CAVIGLIA, O.P. & V.O. SADRAS. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation use efficiency of wheat. *Field Crops Res.* 69: 259-266.
- CAVIGLIA, O.P.; P.E. ABBATE; O.F. PAPANOTTI; R.J.M. MELCHIORI & P.A. BARBAGELATA. 2001. Determinación del rendimiento del trigo en Paraná: una

- comparación con Balcarce. 5° Congreso Nacional de Trigo. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- CAVIGLIA, O.P.; V.O. SADRAS & F.H. ANDRADE. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Res.* 87: 117-129.
- CAVIGLIA O.P., N.V. VAN OPSTAL, V.C. GREGORUTTI, R.J.M. MELCHIORI & E. BLANZACO. 2008. El invierno: Estación clave para la intensificación sustentable de la agricultura. *Agricultura sustentable Serie Extensión No. 51.*
- CAVIGLIA, O.P. & F.H. ANDRADE. 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.; V.O. SADRAS & F.H. ANDRADE. 2013. Modelling long-term of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *Field Crops Res.* 149: 300-311.
- CONTI, M.E. 2000. Materia orgánica del suelo. Cap.2: 67-86. En: *Principios de edafología, con énfasis en suelos argentinos.* Conti, ME (eds.). Buenos Aires. 430 p
- COOPER, P.J.M. 1983. Crop management in rainfed agriculture with special reference to water use efficiency (pp. 63-79). In: *Proc. 17° Colloquium Int. Potash Inst. Rabat, Morocco.*
- COOPER, P.J.M.; P.J. GREGORY; D. TULLY & H.C. HARRIS. 1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture.* 23: 113-158.
- COSENTINO, D.J. & C. PECORARI. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la Región Pampeana. *Ci. Suelo.* 20: 9-16.
- COSTA, A.D.A.; J.A. ALBUQUERQUE; A.L. MAFRA & F. RODRIGUES DA SILVA. 2009. Propiedades físicas do solo em sistemas de manejo integracao agricultura-pecuária. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 33: 235-244.
- CRESPO, L.G. 1999. Aspectos microbiológicos del suelo en relación con la disponibilidad de nitrógeno, bajo siembra directa y labranza convencional. Tesis FCA, UNMdP. Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- CRITCHLEY, W.; K. SIEGERT; C. CHAPMAN & M. FINKEL. 1991. Water harvesting. A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production. Ed. FAO. Roma, Italia. 133 pp.

- DA SILVA, A.P.; B.D. KAY & E. PERFECT. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781.
- DA SILVA, A.P. & B.D. KAY. 1996. The sensitive of shoot growth of corn to the least limiting water range of soil. *Plant Soil.* 184: 323-329.
- DA SILVA, A.P. & B.D. KAY. 1997a. Effect of soil content variation on the least limiting water range. *Soil Sci Soc. Am. J.* 61: 884-888.
- DA SILVA, A.P. & B.D. KAY. 1997b. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci Soc. Am. J.* 61: 877-883.
- DA SILVA, A.P.; B.D. KAY & E. PERFECT. 1997. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil Till. Res.* 44: 81-93.
- DA SILVA, A.P. & B.D. KAY. 2004. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. *Soil Till. Res.* 79:167-174.
- DADDOW, R.L. & G.E. WARRINGTON. 1983. Growth limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. U.S.D.A. Forest Serv., Fort Collins, Colo. Water System Development Group Report. WSD6-TN-00005. 17 pp.
- DALAL, R.C.; P.A. HENDERSON & M. GLASBY. 1991. Organic matter and microbial biomass in a Vertisol after 20 years of zero-tillage. *Soil Biol. Biochem.* 23: 435-441.
- DANIELS, M.B. & H.D. SCOTT. 1991. Water use efficiency of double-cropped wheat and soybean. *Agron. J.* 83: 564-570.
- DARDANELLI, J.; A. SALINAS; P. MAZZINI; E. LOVERA & H.P. SALAS. 1997. El riego del trigo en la región central de Córdoba (pp. 26-31). En: *Jornadas de Riego*. INTA EEA Manfredi, Córdoba, Argentina.
- DARDANELLI J.; D. COLLINO; M.E. OTEGUI & V.O. SADRAS. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano (pp.: 377-442). En: 'Producción de Cultivos de Granos. Bases Funcionales para su Manejo'. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina.
- DARDER, M.L.; M.C. SASAL; A.E. ANDRIULO; M.G. WILSON & C.I. CHAGAS. 2010. Coeficientes de enriquecimientos de fósforo, nitrógeno y carbono de sedimentos erosionados en diferentes secuencias de cultivos bajo siembra directa. *Actas del 22º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- DAUDA, A. & A. SAMARI. 2002. Cowpea yield response to soil compaction under tractor traffic on a sandy loam soil in the semi-arid region of northern Nigeria. *Soil Till. Res.* 68: 17-22.

- DAVIS, R.L.; J.J. PATTON & R.K. TEAL. 2003. Nitrogen balance in the magruder plots following 109 years in continuous winter wheat. *J. Plant Nutr.* 26: 1561-1580.
- DELLA MAGGIORA, A.I.; J.M. GARDIOL & A.I. IRIGOYEN. 2000. Requerimientos hídricos (pp. 157-173). En: F.H. Andrade & V.O. Sadras (eds). *Bases para el manejo del maíz, girasol y soja*. 2º edición. Ed. Producciones Gráficas Sirio. Buenos Aires, Argentina.
- DERPSCH, R.; C.H. ROHT; N. SIDIRAS & U. KOPKE. 1991. Controle da erosao no Paraná. *Sistemas de cobertura do solo, plantio directo e preparo consevacionista do solo*. Ed. IAPAR. Brasil. 272 pp.
- DEXTER, A.R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 120: 201-214.
- DEXTER, A.R.; E.A. CZCZ; G. RICHARD & A. RESZKOWSKA. 2008. A user friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore space in soil. *Geoderma*. 143: 243-253.
- DÍAZ ZORITA, M. & M.V. FERNÁNDEZ CANIGIA. 1999. Patrones de nodulación de soja en relación con propiedades del suelo bajo tres sistemas de labranza. *Rev. Fac. Agronomía, La Plata*. 104 (1): 53-60.
- DÍAZ ZORITA, M.; G.A. DUARTE & J.H. GROVE. 2002a. A review of notill systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65 (1): 1-18.
- DÍAZ ZORITA, M.; F. GARCÍA & R. MELGAR. 2002b. Fertilización en soja y trigo-soja: respuesta de la fertilización en la región pampeana. *Boletín Proyecto Fertilizar*. EEA (INTA) Pergamino. 44 pp.
- DIVITO, G.A., & H.E. ECHEVERRÍA. 2014. Deficiencia de azufre en soja en el sudeste bonaerense: ¿una cuestión cada vez más recurrente? *Revista técnica: soja*. AAPRESID. pp. 67-71.
- DOMZAL, H.; J. GLINSKI & J. LIPIEC. 1991. Soil compaction research in Poland. *Soil Till. Res.* 19: 99-109.
- DORAN, J.W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44: 765-771.
- DORAN, J.W. & J.F. POWER. 1983. The effects of tillage on the nitrogen cycle in corn and wheat production (pp.: 441-455). En: R.R. Lowrance, R.L. Todd, L.E. Asmussen, R.A. Leonard. (eds.). *Nutrient Cycling in Agricultural Ecosystems*. Ed. University of Georgia, College of Agriculture Experiment Stations. Athens, Georgia.

- ECHEVERRÍA, H.E. & C.C. VIDELA. 1998. Eficiencia fisiológica y de utilización de nitrógeno en trigo en la Región Pampeana Argentina. *Ciencia del Suelo*. 16: 83-87.
- ECHEVERRÍA, H.E. & F.O. GARCÍA. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico N° 149. EEA INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 16 pp.
- ECHEVERRÍA, H.; P. BARBIERI; H. SAINZ ROSAS & F. COVACEVICH. 2005. Fertilización nitrogenada y métodos de diagnóstico de requerimientos de nitrógeno en trigo. *Informaciones Agronómicas*. 26: 8-15.
- ECHEVERRÍA, H.; N. REUSSI CALVO; A. PAGANI & L. FERNÁNDEZ. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencia de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz (pp.: 98-107). Presentado en Simposio Fertilidad 2011.
- EGLI, D.B. 1997. Cultivar maturity and response of soybean to shade stress during seed filling. *Field Crops Research*. 52 (1-2): 1-8.
- EIZA, M.J. 2005. Dinámica de la materia orgánica particulada bajo distintas rotaciones y sistemas de labranza. Tesis de Magister Scientiae en Producción Vegetal. FCA, UNMdP. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 69 pp.
- FABRIZZI, K.P.; A. MORÓN & F.O. GARCÍA. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.
- FABRIZZI, K.P.; F.O. GARCÍA; J.L. COSTA & L.I. PICONE. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81: 57-69.
- FAGERIA, N.K. & V.C. BALIGAR. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*. 88: 97-185.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices. Disponible en la World Wide Web en <http://ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/lw8s.pdf/>. Acceso: 10 julio 2012.
- FEHR, W.R. & C.E. CAVINESS. 1977. Stages of soybean development. Special Report 80. Iowa State University, Ames, Iowa. Pp. 11.
- FELDMAN, M. & K.W. DOMIER. 1970. Wheeled traffic effects on soil compaction and growth of wheat. *Can. Agr. Eng.* 12 (1): 8-11.
- FERRERAS, L.A.; L.J. COSTA; F.O. GARCIA & C. PECORARI. 2000. Effect no-tillage on some physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 31-39.

- FERRERAS, L.A.; J.J. DE BATTISTA; A. AUSILIO & C. PECORARI. 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesq. Agrop. Bras.* 36 (1): 161-170.
- FERRIS R., T.R. WHEELER, R.H. ELLIS & P. HADLEY. 1998. High temperature stress at anthesis in fieldgrown crops of wheat. Grain yield and biomass. *Annals of Botany*, 82, 631-640.
- FERRY, D. & R. OLSEN. 1975. Orientation of clay particles as it relates to crusting of soil. *Soil Sci.* 120: 367-375.
- FISCHER, R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agr. Sc.* 100: 447-461.
- FITTER, A.H. & R. HAY. 2002. *Environmental physiology of plants.* Academic Press. San Diego. Pp. 367.
- FONTANETTO, H.; H. VIVAS; R. ALBRECHT; J.L. HOTIAN, 2003. La fertilización con N, P y S y su residualidad en una secuencia agrícola de la región central de Santa Fe. I-Efecto sobre el rendimiento de granos. Información técnica de cultivos de verano. Publicación Miscelánea N° 100 , INTA EEA Rafaela.
- FONTANETTO, H. 2004. Nutrición de los cultivos y manejo de la fertilidad del suelo en la región central de Santa Fe (pp. 19-25). En: *Actas Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable*, IPNI Cono Sur. Buenos Aires, Argentina.
- FONTANETTO, H., M. DIAZ ZORITA, H. VIVAS. 2004. Inoculación y fertilización con fosforo y azufre sobre la nodulación y los rendimientos de soja. Publicación Miscelánea INTA Rafaela 102[Información técnica de cultivos de verano]. INTA Rafaela.
- FONTANETTO, H.; O. KELLER; D. GIAILEVRA; L. BELOTTI & C. NEGRO. 2008. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos de la región central de Santa Fe: respuesta física del cultivo, eficiencia de uso del P y niveles críticos en el suelo. En: *Actas 21° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACS.* San Luis, Argentina.
- FOX R H, V.A BANDEL. 1986. Nitrogen utilization with no-tillage. En Sprage M A, Triplett G B (Eds.) *No-tillage and surface-tillage agriculture. The tillage revolution.* John Wiley and Sons, New York, New York, EEUU. p. 117- 148.
- FRANZLUEBBERS, A.J; G.W LANGDALE & H.H SCHOMBERG. 1999. Soil carbon, nitrogen, and aggregation in response to type and frequency of tillage. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 63: 349-355.

- FRASCHINA, J., BAINOTTI, C. Y SALINES, J. 2005. El cultivo de trigo y la siembra directa en la región Central Norte. Actualización 2005. En: www.elsitioagricola.com
- FREDDI, O.S.; J.F. CENTURION; A.P. DUARTE & F.S.C. PERES. 2009. Compactação do solo e produção de milho em Latossolo vermelho. II- Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 33: 805-818.
- FUKUNAKA, H. 1980. Studies on the method of working execution and the effect of subsoil breaking. *Res. Bull. Hokkaido National Agric. Exp. Station*. 128: 141-150.
- GALANTINI, J.A. & L.G. SUÑER. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de Argentina. *Agriscientia*. 25 (1): 41-55.
- GALANTINI, J.A. & R.A. ROSELL, 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Tillage Research* 87: 72-79
- GALLO, W.P. & C.S.T. DAUGHTRY. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in crop canopies. *Agr. J.* 78: 752-756.
- GARCÍA, F.O. 2002. Manejo de la fertilidad de suelos y fertilización de cultivos para altos rendimientos en la región pampeana argentina. Disponible en la World Wide Web en <http://www.ipni.net/lasc/>. Acceso: 10 julio 2012.
- GARCÍA, F.O. 2004. Soil fertility management for soybean in Argentine. 7° World soybean research conference, 5° International soybean proceeding and utilization conference. 3° Congreso mundial de soja (Brazilian soybean congress). *Proceeding*: 392-399.
- GARCÍA, F.O., & A. CORRENDO. 2013. Cálculo de requerimientos nutricionales. IPNI, Programa Latinoamérica Cono Sur. (<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>).
- GARCÍA, F.O.; L.I. PICONE & A. BERARDO. 2005. Fósforo (pp. 99-121). En: H.E. Echeverría & F.O. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ed. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- GARCÍA, F.O.; M. BOXLER; J. MINTEGUIAGA; R. POZZI; L. FIRPO; I. CIAMPITTI; A. CORRENDO; F. BAUSCHEN; A. BERARDO & N. REUSSI CALVO. 2010. *Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009*. 2da. Ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 pag.

- GARDNER, F.P.; R. BRENT PEARCE & R.L. MITCHEL. 1985a. Carbon fixation by crop canopies (pp. 31-57). In: F.P. Gardner, R. Brent Pearce & R.L. Mitchel (eds.). Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press. USA.
- GARDNER, B.R.; R.B. PEARCE & R.L. MITCHEL. 1985b. Physiology of crop plants. Iowa State University Press. USA. Pp. 327.
- GERSTER, G. & S. BACIGALUPPO. 2004. Consecuencias de la densificación por tránsito en Argiudoles del Sur de Santa Fe. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Parana - Entre Rios
- GERSTER, G.; S. BACIGALUPPO; M. BODRERO & F. SALVAGIOTTI. 2010. Secuencia de cultivos, descompactación mecánica y rendimiento de soja en un suelo degradado de la región pampeana. Para Mejorar la Producción. 45: 55-59.
- GHIBERTO, P.; M. PILATTI & S. IMHOFF. 2004. Curva de retención hídrica en Molisoles de Santa Fe: función representativa. En: 19° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos, Argentina. CD-rom.
- GHIBERTO, P.J.; M.A. PILATTI; S. IMHOFF & J.A. ORELLANA. 2007. Hydraulic conductivity of molisolls irrigated with sodio-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentina). Agric. Water Manag. 88: 192-200.
- GIANCOLA, S.I.; M.L. SALVADOR; M. COVACEVICH & G. ITURRIOZ. 2009. Análisis de la cadena de soja en la Argentina. Ed. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- GIAROLA, N.F.B.; A.P. SILVA; S. IMHOFF & A.R. DEXTER. 2003. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. Geoderma. 113: 95-108.
- GIL, R.; M. BRAGACHINI; R. BONGIOVANNI & L. BONETTO. 1993. Transfer systems of harvest equipment to reduce compaction. PROPECO INTA. 9-39.
- GIL, R. 2007. El ambiente del suelo y el crecimiento de las raíces. EEA INTA Rafaela. Publicación Miscelánea 107: 12-16.
- GILL, W.R. & G.H BOLT, 1955. Pfeffer's studies on the root growth pressures exerted by plants. Agron. J. 47:166-168.
- GLINSKI, J & J LIPIEC. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida, USA. 250 pp.
- GOLIK, S.I. & H.O. CHIDICHIMO. 2007. Actividad radical, removilización y absorción de N en trigo en postantesis bajo dos sistemas de labranza y fertilización nitrogenada. Agriscientia. 24 (1): 45-55.

- GONZÁLEZ MONTANER, J.; M. DI NAPOLI; R. POZZI; V. STANGAFERRO & E. TECCO. 2004. Influencia de la fertilización sobre el balance de rastrojos y el estado nutricional de los cultivos en una rotación en siembra directa en Argiudoles del sur de Santa Fe (pp. 221). En: 19° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- GREGORICH, E.G.; M.R. CARTER; D.A. ANGERS; C.M. MONREAL & B.H. ELLERT. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Science*. 74: 367-385.
- GREGORY, P.; D. TENNANT & R. BELFORD. 1992. Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a Mediterranean-type environment. *Australian J. Exp. Agr.* 43: 555-573.
- GRIFFITH, D.; J. MANNERING & W. MOLDENHAUER. 1977. Conservation tillage in the Eastern Corn Belt. *J. Soil and Water Cons.* 32: 20-28.
- GUO ZB, K. HUA; J. WANG; X GUO & C.L HE. 2014. Effects of different regimes of fertilization on soil organic matter under conventional tillage. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2014 12: 801–808.
- GUPTA, SC & RR ALLMARAS. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6:65-100.
- GUTIÉRREZ BOEM, F.H. & G.W. THOMAS. 1999. Phosphorus nutrition and water deficits in field-grown soybeans. *Plant and Soil*. 207: 87-96.
- GUTIÉRREZ BOEM, F.H.; J.S. SCHEINER; J. MOYANO & R.S. LAVADO. 2002. Cambio en la disponibilidad de fósforo del suelo por el agregado de fertilizante. En: Actas 18° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina. CD-rom.
- GUTIÉRREZ BOEM, F.H. & F. SALVAGIOTTI. 2014. Soja. Capítulo 16, pp 479-504. En: Echeverría H. & F. García. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 2da. Edición. INTA. Buenos Aires. Argentina.
- GUY, S.O.; H. TABLAS-ROMERO & M.K. HEIKKINEN. 1995. Agronomic responses of winter wheat cultivars to management systems. *J. Prod. Agric.* 8: 529-535.
- HAKANSSON, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Res.* 16: 105-120.
- HAKANSSON, I. & W.B. VOORHEES. 1998. Soil compaction (pp. 167-179). In: R. Lal, W.H. Blum, C. Valentin & B.A. Stewart (eds.). *Methods for assessment of soil degradation*. Lewis Publishers. Boca Raton.

- HAMZA, M.A. & W.K. ANDERSON. 2002. Improving soil physical fertility and crop yield on clay soil in western of Australia. *Aust. J. Agr. Res.* 53: 615-620.
- HAMZA, M.A. & W.K. ANDERSON. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- HARRISON, D.F.; K.C. CAMERON & R.G. MCLAREN. 1994. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield. *New Zealand J. Agric. Res.* 37: 559-567.
- HAVLIN, J.L.; D.E. KISSEL; L.D. MADDUX; M.M. CLAASSEN & J.H. LONG. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 448-452.
- HAYNES, R.J., 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- HAYNES, R.J. & R. NAIDU. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical condition. *Nut. Cyc. Agroecosys.* 51: 123-137.
- HE, C.; S.A. FINLAYSON; M.C. DREW; W.R. JORDAN & P.W. MORGAN. 1996. Ethylene biosynthesis during aerenchyma formation in roots of maize subjected to mechanical impedance and hypoxia. *Plant Physiol.* 112: 1679-1685.
- HÉNIN, S. & M. DUPUIS. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.* 11: 17-29.
- HIREL, B.; BERTIN, P.; QUILLERE', I.; BOURDONCLE, W.; ATTAGNANT, C.; DELLAY, C.; GOUY, A.; CADIOU, S.; RETAILLIAU, C.; FALQUE, M.; GALLAIS, A. 2001. Towards a better understanding of the genetic and physiological basis for nitrogen use efficiency in maize. *Plant Physiology.* 125: 1258-1270.
- HIROSE, T. & F.A. BAZZAZ. 1998. Trade-off between light and nitrogen use efficiency in canopy photosynthesis. *Ann. Botany.* 82: 195-202.
- HORTON, R., M.D ANKENY & R.R. ALLMARAS. 1994. Effects of soil compaction on soil hydraulic properties (pp. 141-166). In: B.D. Soane & C. Van Ouwerkerk (eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier Press. Amsterdam.
- HUGGINS, D.R. & W.L. PAN. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping systems differences in productivity. *Agron. J.* 85: 898-905.
- HUNT, R. 1982. *Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis*. Ed. Edward Arnold Ltd. London, UK. Pp. 248.

- IMHOFF, S.; A.P. DA SILVA & C.A. TORMENA. 2000. Spatial heterogeneity of the soil attributes to rotation short duration grazing system on elephant grasses pasture. *Plant Soil*. 219: 161-168.
- IMHOFF, S.; M.A. PILATTI; P.J. GHIBERTO & A.P. DA SILVA. 2004. Propiedades físicas de suelos de Santa Fe: funciones de edafotransferencia. En: 19° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- IMHOFF, S.; J.P. GAY; A. GRIONI & P.J. GHIBERTO. 2006. Calidad física de Argiudoles de Santa Fe determinada por medio del intervalo hídrico óptimo. En: 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta y Jujuy, Argentina. CD-rom.
- IMHOFF, S.; P.J. GHIBERTO; A. GRIONI & J.P. GAY. 2010a. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma*. 158: 268-274.
- IMHOFF, S.; B.D. KAY; A.P. DA SILVA; M.A. HAJABBASI. 2010b. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil Till. Res*. 106: 303-310.
- IMHOFF, S.; A.P. DA SILVA; P.J. GHIBERTO; C. TORMENA; M.A. PILATTI & P.L. LIBARDI. 2012. Funciones de edafotransferencia para determinar el intervalo hídrico óptimo de suelos de la Provincia de Santa Fe. CD de Actas XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, MAR DEL PLATA.
- IMVINKELRIED, H.O.; I. DELLAFERRERA; O. HERMANN; M. PIETROBÓN; ZEN, & R. MAUMARY. 2013. Efecto de la fertilización con Ca, Mg, N, P y S sobre los componentes de rendimiento de trigo en el Departamento Las Colonias, Santa Fe. *Revista Fave - Ciencias Agrarias* 12 (1-2).
- INFOSTAT. 2008. InfoStat version 2008. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 1991. Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3160-25 y 26, Esperanza-Pilar. Ed. INTA. Rafaela, Santa Fe, Argentina. Pp. 135.
- INTA-MAG (Provincia de Santa Fe, Consejo de Tecnología Agropecuaria). 1981. Estado actual y futuro de los problemas de suelo de Santa Fe. Ed. INTA. Santa Fe, Argentina. Pp. 55.

- IRIZAR, A.; A. ANDRIULO; D. COSENTINO & C. AMÉNDOLA. 2010. Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Ci. Suelo*. 28: 115-121.
- JANZEN, H. 2004. Carbon cycling in earth systems a soil science perspective. *Agriculture Ecosystems and Environment* 104:399-417.
- JIANG, H.; EGLI, D. B. 1995. Soybean Seed Number and Crop Growth Rate during Flowering. *A. Journal* Vol. 87 no. 2: 264-267
- JOHNSON, GV & PE FIXEN. 1990. Testing Soils for Sulfur, Boron, Molybdenum, and Chlorine. P 265-273. *In: Westerman, R. L.(ed) Soil testing and Plant analysis, Third edition. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.*
- JORAJURIA, D. & L. DRAGHI. 1997. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. *J. Agric. Eng. Res.* 66: 261-265.
- KAISER, D.R; D.J. REINERT; J.M. REICHERT; G.L. COLLARES & M. KUNZ. 2009. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. *Rev. Bras. Ci. Solo*. 33: 845-855.
- KANAMPIU, F.K.; W. RAUN & G.V. JOHNSON. 1997. Effect of nitrogen rate on plant nitrogen loss in winter wheat varieties. *J. Plant Nutr.* 20: 389-404.
- KANTOLIC, A.G.; GIMÉNEZ & E.B. DE LA FUENTE. 2004. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En: E.H. Satorre; R.L. Benech A.; G.A. Slafer; E.B. de la Fuente, D.J. Miralles; M.E. Otegui y R. Savin (eds.), *Producción de Cultivos de Granos: Bases Funcionales para su Manejo. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires*, pp. 165-201
- KANTOLIC, A.J. 2009. ¿Podemos reducir los impactos de la sequía en el cultivo de soja? *Agronegocios del Plata. Jornadas de capacitación. Marzo de 2009.*
- KARLEN, D.L.; G.E. VARVEL; D.G. BULLOCK & R.M. CRUSE. 1994. Crop rotation for the 21 st Century. *Adv. Agron.* 53: 1-45.
- KAY, B.D.; M.A. HAJABBASI; J. YING & M. TOLLENAAR. 2006. Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil Till. Res.* 88: 42-54.
- KEENEY, D.R. 1982. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. Pp.: 605-649. *In: F.J. Stevenson (ed.), Nitrogen in agricultural soils. Agron. Monogr. 22. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.*

- KEMPER, W.D.; B.A. STEWART & L.K. PORTER. 1971. Effects of compaction on soil nutrient status (pp. 178-189). In: K.K. Barnes, W.M. Carleton, H.M. Taylor, R.I. Throckmorton & G.E. Vanden Berg (eds.). *Compaction of Agricultural Soils*. Ed. Am. Soc. of Agric. Engineers, St. Joseph, MI. USA.
- KINIRY, J.R.; C.A. JONES; J.C. O'TOOLE; R. BLANCHET; M. CABELGUENNE & D.A. SPANEL. 1989. Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops R.* 20 (1): 51-64.
- KITUR, B.K.; M.S. SMITH; R. BLEVINS & W.W. FRYE. 1984. Fate of ¹⁵N-depleted ammonium nitrate applied to no-tillage and conventional tillage corn. *Agron. J.* 76: 240-242.
- KLUTE, A. 1986. Water retention: laboratory methods (pp. 635-660). In: A. Klute (ed.). *Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods*. Ed. Am. Soc. Agron. Madison. USA.
- KRÜGER, H. 1996. Compactación en Haplustoles del sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ci. Suelo.* 14: 104-106.
- LAL, R. 1979. Importance of tillage systems in soil and management in the tropics (pp. 25-32). In: R. Lal (ed.). *Soil Tillage and Crop Production*. 2^o edition. IITA. Ibadan, Nigeria.
- LAL, R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropic vs temperate environments. *Adv. Agron.* 42: 1073-1082.
- LAL, R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, Vol. 304 N°. 5677 pp. 1623-1627.
- LAMB, J.A.; G.A. PETERSON & C.R. FENSTER. 1985. Fallow nitrate accumulation in a wheat-fallow rotations as affected by tillage system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1260-1272.
- LAPEN, D.R.; G.C. TOPP; E.G. GREGORICH & W.E. CURNOE. 2004. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.* 78: 151-170.
- LARSON, W.E. 1964. Soil parameters for evaluating tillage needs and operations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28: 118-122.
- LARSON, W.E.; C.E. CLAPP; W.H. PIERRE & Y.B. MORACHAN. 1972. Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn: II. Organic carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur. *Agron. J.* 64: 204-208.

- LÁZARO, L. & P.E. ABBATE. 2012. Cultivar effects on relationship between grain number and photothermal quotient or spike dry weight in wheat. *J. Agric. Sci.* 150 (4): 442-459.
- LEÃO, T.P.; A.P. DA SILVA; M.C.M. MACEDO; S. IMHOFF & V.P.B. EUCLIDES. 2006. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Till. Res.* 88: 279-285.
- LETEY, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- LIMA, V.M.P; G.C. DE OLIVEIRA; E.C. SEVERIANO & L.F.C. DE OLIVEIRA. 2009. Intervalo hídrico ótimo e porosidade de solos cultivados em área de protecao ambiental do sul Minas Gerais. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 33: 1087-1095.
- LINDSTROM, M.J. & C.A. ONSTAD. 1984. Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting. *J. Soil Water Conservation.* 32: 149-152.
- LIPIEC, J. & R. HATANO. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma.* 116: 107-136.
- LIPIEC, J. & W. STEPNIEWSKI. 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil Till. Res.* 35: 37-52.
- LÓPEZ, S.; E. GUEVARA; M. MATURANO; M. MELAJ; J. BONETTO; S. MEIRA; O. MARTÍN & N. BÁRBARO. 2002. Absorción del nitrógeno en trigo en relación a la disponibilidad hídrica. *Terra Latinoamericana.* 2 (1): 7-15.
- MA, Z.; D.G. BIELENBERG; K.M. BROWN & J.P. LYNCH. 2001. Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. *Plant, Cell and Environment.* 24: 459-467.
- MADDONNI, G.A.; & M.E. OTEGUI. 1996. Leaf area, light interception and crop development in maize. *Field Crop Res.* 48: 81-87.
- MAGRIN, G., HALL, A., BALDY C., Y GRONDONA M. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: Implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agric. For. Meteorol.* 67:29-41
- MARANO R.; E. ASTEGIANO & M. HERMANN. 2004. Dinámica de agua en cultivos de trigo de ciclo largo y corto en la región central de Santa Fe (pp. 66-67). En: 6° Congreso Nacional de Trigo y 4° Simposio de Cereales de Siembra Otoño-Invernal. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

- MARANO, R. & M. D'ELIA. 2005. Estudio del comportamiento de la zona no saturada en parcelas experimentales en el centro de la provincia de Santa Fe. En: Actas 20º Congreso Nacional de Agua. Mendoza, Argentina.
- MARANO, R.P.; M. HERMANN & I. CARNEVALE. 2006. Estudio de la dinámica hídrica del cultivo de soja de segunda en la región central de Santa Fe (pp. 594-597). En: Actas 3º Congreso de Soja del Mercosur. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- MARANO, RP; MC MIRETTI; N SERAFÍN; M ROSSI & L RODRÍGUEZ. 2009. Dinámica hídrica y recarga de un acuífero libre en condiciones de lluvia extraordinaria en el centro de la provincia de Santa Fe. "Recarga de Acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas". Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Argentino 1º ed 33-41, Santa Rosa, La Pampa.
- MARCANO, F.; C. OHEP & F. DESIDERIO. 1994. Efecto de la labranza y del nitrógeno en algunos componentes del rendimiento, macroporosidad del suelo, densidad radical y producción del maíz (*Zea mays* L.). *Agronomía Tropical*. 44 (1): 5-22.
- MARSCHNER, H. 1998. Role of root growth, arbusular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Field Crops Research*. 56: 203-207.
- MARTINEZ, F. & G. CORDONE, 1998. Resultados de ensayos de fertilización azufrada en soja. *Soja: Para mejorar la producción*. INTA EEA Oliveros 8:53-57.
- MARTINO, D.L. 1998. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Ph.D. Thesis. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. University of Manitoba, Manitoba, Canadá. Pp. 22.
- MARTINO D. L. 2003. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. Grupo de Riego, Agroclima, Ambiente y Agricultura Satelital (GRAS) del INIA Uruguay.
- MASLE, J. 1998. Growth and stomatal responses of wheat seedlings to spatial and temporal variations in soil strength of bi-layered soils. *J. Exp. Botany* 49:1245-1257.
- MASSARO, R.A.; M. GONZÁLEZ; M. INCREMONA; M.C. GONZÁLEZ; F. BOTTA; G. ALMADA; J. CAPURRO; D. DAMEN; A. GHÍO; A. GARGICEVICH; J. MÉNDEZ & H. PECETTI. 2003. Evaluación del control de enfermedades foliares del trigo con aplicación de fungicidas en el sur y centro de Santa Fe, ciclo 2002/03. *Para Mejorar la Producción*. 22: 75-80.

- MASSIGNAM, A.M., S.C. CHAPMAN; G.L. HAMMER & S. FUKAI. 2009. Physiological determinants of maize and sunflower grain yield as affected by nitrogen supply. *Field Crops Res.* 113: 256-267.
- MATERECHERA, S.A.; A.R. DEXTER & A.M. ALSTON. 1991. Penetration of very strong soils by seedlings roots of different plant species. *Plant Soil.* 135: 31-41.
- MATTHEWS, R.B.; D. HARRIS; J.H.WILLIAMS & R.C NAGESWARA RAO. 1988. The physiological basis for yield differences between four genotypes of groundnut (*Arachis hypogaea*) in response to drought. II. Solar radiation interception and leaf movement. *Expl. Agr.* 24:203-213
- MAYNARD, DG; YP KALRA & EG RADFORD. 1987. Extraction and determination of sulfur inorganic horizons of forest soils. *Soil Sci.Soc.Amer. J.* 51: 801-805.
- MC KENZIE, B.M.; A.G. BENGOUGH; P.D. HALLET; W.T.B. THOMAS; B. FORSTER & J.W. MCNICOL. 2009. Deep rooting and drought screening of cereal crops: a novel field-based method and its application. *Field Crops Res.* 112: 163-171.
- MC MAHON, M.A. & G.W. THOMAS. 1976. Anion leaching in two Kentucky soils under conventional and killed sod mulch. *Agron. J.* 68: 437-442.
- MEDEIROS, J.C; A.P. DA SILVA; C.E. PELLEGRINO CERRI; N.F.B. GIAROLA; G.C. FIGUEIREDO & F.J.C. FRACCETO. 2011. Linking physical quality and CO₂ emissions under long time no-till and convencional-till in a subtropical soil Brasil. *Plant Soil.* 338: 5-15.
- MEISINGER, J.J.; G. W. RANDALL, 1991. Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems. Pp.: 85–124. In: R.F. Follett; D.R. Kenney; R.M. Cruse (eds.), *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. SSSA, Madison, WI.
- MELCHIORI, R.J.M.; O.P. PAPAROTTI & P.A. BARBAGELATA. 2002. Fertilización fosfatada en soja: validación del nivel crítico. Disponible en la World Wide Web en <http://www.parana.inta.gov.ar/>. Acceso: 20 marzo 2013.
- MENGEL, D.B.; D.W. NELSON & D.M. HUBER. 1982. Placement of nitrogen fertilizers for no-till and conventional till corn. *Agron. J.* 74: 515-517.
- MESSICK D.L. 1992. Soil test interpretation for sulphur in the United States , an overview. *Sulphur in Agriculture*, 16:24-25.

- MICUCCI, F. & C. ÁLVAREZ. 2003. El agua en los cultivos extensivos. III: Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. Archivo agronómico N° 8. Informaciones Agronómicas N° 20. INPOFOS Cono Sur, Argentina.
- MICUCCI, F. & M.A. TABOADA 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. Soil and Tillage Research 86, 152-162
- MICHELENA, RO; CB IRURTIA; A PITTALUGA; F. VAVRUSKA & M.E DE SARDI. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ci. Suelo* 6:60-66.
- MIRALLES, D.J. & G.A. SLAFER. 1999. Wheat development (pp. 13-43). In: E.H. Satorre & G.A. Slafer (eds.). Wheat: ecology and physiology of yield determination. Food Product Press. New York, USA.
- MIRALLES, D.J.; L.B WINDAUER & N.V. GOMEZ. 2003. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos (pp. 61-74). En: E.H. Satorre, R.L. Benech Arnold, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui & R. Savin (eds.). Producción de Granos, bases funcionales para su manejo. Ed. FAUBA. Buenos Aires, Argentina.
- MIRALLES, D.J.; R.A. SERRAGO & R. CARRETERO. 2007. Generación del rendimiento en trigo (pp. 15-26). En: E.H. Satorre (ed.). Producción de Trigo. Ed. AACREA. Capital Federal, Buenos Aires, Argentina.
- MISRA, R.K.; A.M. ALSTON & A.R. DEXTER. 1988. Root growth and phosphorus uptake in relation to the size and strength of soil aggregates. I. Experimental studies. *Soil Till. Res.* 11: 103-116.
- MOHAMMADI, M.H.; F. ASADZADEH & M. VANCLOOSTER. 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. *Plant Soil.* 334: 221-234.
- MON, R. 2007. Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda cálcica profunda. Tesis doctoral. Universidad de Coruña, Facultad de Ciencias, Área de Edafología y Química Agrícola. Coruña, España. Pp. 164.
- MONTAVALLI, P.P.; S.H. ANDERSON & P. PENGTHAMKEERATI. 2003. Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability, and physical properties of a claypan soil. *Field Crops Res.* 84: 303-318.

- MOURA, E.G.; N.G. MOURA; E.S. MARQUES; K.M. PINHEIRO; J.R.S. COSTA SOBRINHO & A.C.F. AGUIAR. 2009. Evaluating chemical and physical quality indicators for a structurally fragile tropical soil. *Soil Use and Management*. 25: 368-375.
- MUCHOW, R.C.; M.J. ROBERTSON & B.C. PENGELLY. 1993. Radiation use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. *Field Crops Res.* 32 (1): 1-6.
- MÜLLER, A.; H.M. HELAL & D. SUERBECK. 1990. Root development and nutrient uptake in compacted soil. In: Proc. 1st Congress of the European Society of Agronomy. Paris, France. Pp. 372.
- MULLINS, C.E. & K.P. PANAYIOTOPOULOS. 1984. The strength of unsaturated mixture of sand and kaolin and the concept of effective stress. *J. Soil Sci.* 35: 459-468.
- NICOLAS M.E, R.M. GLEADOW, M.J DALLING. 1984. Effects of drought and high temperature on grain growth in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 11:553–566.
- nitrogen use. In: Hargrove, W.L. (Ed.), *Cropping Strategies for Efficient Use of*
- NOVELLI, L.; R. MELCHIORI & O. CAVIGLIA. 2009. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de C y N en diferentes tamaños de agregados. *Revista Científica Agropecuaria*. 13: 25-32.
- NOVELLI, L.E.; O.P. CAVIGLIA & R.J. MELCHIORI. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*. 167: 254-260.
- NOVOA, R. & R.L. LOOMIS. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant Soil*. 58: 177-204.
- OLIBONE, D.; A.P. ENCIDE-OLIBONE & C.A. ROSOLEM. 2010. Least limiting water range and crop yield as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use and Management*. 26: 485-493.
- OLIVEIRA, C.V.; V.G BAHIA & M.B PAULA. 1998. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. *Informe Agropecuário*, v.191, p.46-48.
- ORELLANA, J.A.; M.A. PILATTI & L.J. PRIANO. 1982. Agregación y estabilidad de agregados edáficos en Argiódolos del Dpto. Las Colonias. En: *Jornadas de*

- Comunicaciones Técnico Científicas de la UNL. Ed: Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina. Pp. 14.
- ORELLANA, J.A. & M.A. PILATTI. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico. *Ci. Suelo*. 12: 75-80.
- ORELLANA, J.A.; M.A. PILATTI & D.A. GRENÓN. 1997. Soil quality: an approach to the physical state assessment. *J. Sust. Agric.* 9: 91-108.
- OUSSIBLE, M.; R.K. CROCKSTON & W.E. LARSON. 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.* 84: 34-38.
- PASSIOURA, J.B. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environ.* 25: 311-318.
- PASSIOURA, J.B. & J.F. ANGUS. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Advance Agron.* 106: 37-75.
- PAUSTIAN, K.; W.J. PARTON & J. PERSSON. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 476-488.
- PAYERO, J.O.; S.R. MELVIN; S. IRMARK & D. TARKALSON. 2006. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. 84: 101-112.
- PERGOLINI, S. 2005. Efecto de la Fertilización con N y S sobre el Crecimiento y Rendimiento del Doble Cultivo Trigo/Soja. En: <http://goo.gl/BzOiV>. Acceso: 26-10-2015
- PETEAN, L.P; C.A. TORMENA & S.J. ALVES. 2010. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo vermelho distroférico sob plantio direto en sistema de integração lavoura-pecuária. *Rev. Brasileira de Ciência do Solo*. 34: 1515-1526.
- PETERSON, G.A.; A.D. HALVORSON; J.L. HAVLIN; O.R. JONES; D.G. LYON & D.L. TANAKA. 1998. Reduced tillage and increasing cropping intensity in the Great Plains conserves soil C. *Soil Till. Res.* 47: 207-218.
- PICONE, L.I.; C.C. VIDELA & F.O. GARCIA. 1997. Desnitrificación durante el cultivo de trigo en un Argiudol típico bajo siembra directa y labranza convencional. *Ci. Suelo*. 15: 53-58.
- PIERCE, F.J. & C.W. RICE. 1988. Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. p. 21-42. In: W.L. Hargrove (4.) *Cropping Strategies for Efficient Use of Water and Nitrogen*. ASA Special Publication 51. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

- PILATTI, M.A.; J.A. DE ORELLANA; J.J. PRIANO; O.M. FELLI & D.A. GRENÓN. 1988. Manejos tradicionales y conservacionistas: incidencia sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Estudio de casos sobre Argiudoles del Sur de Santa Fe. *Ci. Suelo*. 6: 19-29.
- PILATTI, M.A. & J.A. DE ORELLANA. 1993. Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad: II. El intervalo hídrico óptimo. En: 14° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza, Argentina.
- PILATTI, M.A. & J.A. DE ORELLANA. 2000. The ideal soil: II) Critical values of the ideal soil, for Mollisols in the north of the Pampean Region (Argentina). *J Sust. Agric.* 16 (1): 45-56.
- PILATTI, M.A.; S. IMHOFF; P.J. GHIBERTO & R.P. MARANO. 2006. Changes in some physical properties of Molisoll induced by supplemental irrigation. *Geoderma*. 33: 431-443.
- PRASAD, R. & J. POWER. 1991. Crop residue management. *Adv. Soil Sci.* 15: 205-241.
- PURICELLI, C.A. & A. LEGASA. 1973. Remoción de capas u horizontes endurecidos de un Brunizem. Informe Técnico, EEA INTA Marcos Juárez. Córdoba, Argentina. Pp. 8.
- QUIROGA, A.; D. FUNARO & O. ORMEÑO. 2003. Aspectos del manejo del agua del suelo para el cultivo de trigo. *INTA Anguil. Bol. Tec.* 76: 33-44.
- QUIROGA, A.; D. FUNARO; E. NOELLEMAYER & N. PEINEMANN. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 90: 63-68.
- RADFORD, B.J.; D.F. YULE; D. MC GARRY & C. PLAYFORD. 2001. Crop responses to applied soil compaction and to compaction with harvester traffic. *Soil Till. Res.* 54: 157-170.
- RAMÍREZ, L. & J.C. PORSTMANN. 2008. Evolución de la Frontera Agrícola. Campañas 80/81 – 06/07. *Revista Agromensajes*, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. Disponible en la World Wide Web en <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/25/10AM25.htm/>. Acceso: 2 mayo 2013.
- RASIAH, V. & KAY, B.D. 1998. Legume mineralization: effect of aeration and size distribution of water-filled pores. *Soil Biol. Biochem.* 30:89-96.

- RASMUSSEN, P.E.; R.R. ALLMARAS; C.R. ROHDE & N.C. ROAGER. 1980. Crop residue influences on soil carbon and nitrogen in a wheat–fallow system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 596–600.
- RASMUSSEN, P.E. & C.R. ROHDE. 1988. Long-term tillage and nitrogen fertilization effects on organic nitrogen and carbon in a semiarid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1114–1117.
- RASSE, D.P. & A.J.M. SMUCKER. 1998. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotation. *Plant Soil.* 204: 203-212.
- RAUN, W. & G. JOHNSON. 1999. Improving N use efficiency for cereal production. *Agronomy J.* 91: 357-363.
- REEVES, D.W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Till. Res.* 43: 131-167.
- REICOSKY, D.C.; W.A. DUGAS & H.A. TOBERT. 1997. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil Till. Res.* 41: 105-118.
- REICHERT, J.M.; L.E.A. SANCHEZ SUZUKI; D.J. REINERT; R. HORN & I. HAKANSSON. 2009. Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soil. *Soil Till. Res.* 102: 242-254.
- RODRÍGUEZ, M.B. & N. GIAMBIAGI. 1995. Denitrification in tillage and no tillage pampean soils: relationships among soil water, available carbon, and nitrate and nitrous oxide production. *Comm. Soils Sci. Plant An.* 26: 3205-3220.
- RON M. & T. LOEWY. 2000. Modelo de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el Sudoeste Bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 18: 44-49.
- RUBIO G, M.J CABELLO, F.H. GUTIÉRREZ BOEM, E. MUNARO. 2008. Estimating available soil P increases after P additions in Mollisols. *Soil Science Soc. Amer. J.* 72:1721-1727.
- SADRAS, V.O.; D.M. WHITFIELD & D.J. CONNOR. 1991. Transpiration efficiency in crops of semi-dwarf and standard-height sunflower. *Irrigation Sci.* 12: 87-91.
- SADRAS, V.O. & S.P. MILROY. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange. *Field Crops Res.* 47: 253-266.
- SADRAS, V.O. & D. ROGET 2004. Production and environmental aspects of cropping intensification in a semiarid environment of southeastern Australia. *Agron. J.* 96: 236-246.

- SADRAS, V.O.; J.G. O'LEARY & D.K. ROGET. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91: 131-148.
- SAINJU, U.M. & R.E. GOOD. 1993. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. *Plant Soil.* 150 (1): 87-97.
- SALADO NAVARRO, L.R.; T.R. SINCLAIR & R. RODRIGUEZ. 2006. Simulaciones de soja en Argentina. I. Variación interanual del rendimiento. MERCOSOJA 2006, 3º Congreso de Soja del Mercosur. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- SALIRE, E.; J.E. HAMMEL & J.H. HARDCASTLE. 1994. Compression of intact subsoils under short-duration loading. *Soil Till. Res.* 31: 235-248.
- SALVAGIOTTI, F., G. GERSTER, S. BACIGALUPO, J.CASTELLARÍN, C. GALARZA, N.GONZALEZ, V. GUDELJ, O. NAVELLO, H. PEDROL, & P. VALLONE. 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo*, 22:92-101
- SALVAGIOTTI, F., M. BARRACO, D. DIGNANI, H. SANCHEZ, A. BONO, P. VALLONE, G. GERSTER, C. GALARZA, J. MONTOYA & V. J. GUDELJ. 2013. Plant stand, nodulation and seed yield in soybean as affected by phosphate fertilizer placement, source and application method. *European Journal of Agronomy* 51, 25-33.
- SANDAÑA, P. & D. PINOCHET. 2011. Ecophysiological determinants of biomass and grain yield of wheat under P deficiency. *Field crops research*, 120(2), 311-319.
- SASAL, M.C. & A. ANDRIULO. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L. (nabo forrajero). *Revista Científica Agropecuaria.* 34: 131-150.
- SASAL, M.C.; A.E. ANDRIULO & M.A. TABOADA. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- SASAL, M.C.; M.G. CASTIGLIONI & M.G. WILSON. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- SCOTT, R.K.; K.W. JAGGARD & R. SYLVESTER BRADLEY. 1994. Resource capture by arable crops (pp. 279–302). In: J.L. Monteith, R.K. Scott & M.H. Unsworth (eds.). *Resource capture by crops.* Nottingham University Press. Nottingham, UK.

- SCHIMEL, D. S., HOUSE, J. I., HIBBARD, K. A., BOUSQUET, P., CIAIS, P., PEYLIN, P. & WIRTH, C. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414(6860), 169-172.
- SCHJØNNING, P. & K.J. RASMUSSEN. 2000. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil Till. Res.* 57: 69-82.
- SHIBLES, R.M. & C.R. WEBER. 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybean. *Crop Sci.* 5: 575-577.
- SHIBLES, R.M. & C.R. WEBER. 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Sci.* 6: 55-59.
- SIIA (Sistema Integrado de Información Agropecuaria). 2015. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Disponible en la World Wide Web en <http://www.siiia.gov.ar/>. Acceso: 26 marzo 2015.
- SINCLAIR, T.R. & C.T. DE WIT. 1975. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. *Science*. 189: 565–567.
- SINCLAIR, T.R. & T. HORIE. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci.* 29: 90–98.
- SINCLAIR, T. 1993. Crop yield potential and fairy tales. p 707- 711. In D. Buxton et.al. (ed.) *International crop science I*. CSSA, Madison.
- SINCLAIR, T.R. & R.C. MUCHOW. 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.* 65: 215–265.
- SINCLAIR, T.R. & V. VADEZ. 2002. Physiological traits for crop yield improvement in low N and P environments. *Plant and Soil.* 245: 1-15.
- SIX, J.; K. PAUSTIAN; E.T. ELLIOT & C. COMBRINK. 2000. Soil structure and organic matter. I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.
- SLAFER, G.A. & H.M. RAWSON. 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Aust. J. Plant Phys.* 21 (4): 393-426.
- SLAFER, G.A.; D.J. MIRALLES; R. SAVIN; E.M. WHITECHURCH & F.G. GONZÁLEZ. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo (pp. 99-132). En: E.H. Satorre, R.L. Benech Arnold, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui & R. Savin (eds.).

- Producción de Granos, bases funcionales para su manejo. Ed. FAUBA. Buenos Aires, Argentina.
- SOTOMAYOR RAMÍREZ, D.; Y. ESPINOZA & R. RAMOS SANTANA. 2007. Short-term tillage practices on soil organic matter pools in a tropical Ultisol. *Aust. J. Soil Res.* 44: 687-693.
- SPOOR, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use Manage.* 22: 113-122.
- STALEY, T.E.; W.M. EDWARDS; C.L. SCOTT & L.B. OWENS. 1988. Soil microbial biomass and organic component alteration in a non-tillage chronosequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 998-1005.
- STEPNIEWSKI, W.; J. GLIFISKI & B.C. BALL. 1994. Effects of soil compaction on soil aeration properties (pp. 167-189). In: B.D. Soane & C. Van Ouwerkerk (eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier Press. Amsterdam.
- STIRZAKER, R.J.; J.B. PASSIOURA & Y. WILMS. 1996. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant Soil.* 185: 151-162.
- STONE P.J. & M.E. NICOLAS. 1994. Wheat cultivar vary widely in their responses of grain yield and quality to short periods of post-anthesis heat stress. *Aust. J. Plant Physiol.* 21:887-900.
- STUDDERT, G.A. & H. ECHEVERRÍA. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
- SWAIN, R.W. 1975. Effective subsoiling (pp. 189-204). In: R.W. Swain (ed.). *Soil Physical Conditions and Crop Production*. Tech. Bull. 29 Press. London, UK.
- TABATABAI, M.A. 1996. Soil organic matter testing: An overview. p. 1-10. In: F. Magdoff *et al.* (eds.). *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*. SSSA Spec. Pub. 46. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- TABOADA, M.A.; F.G. MICUCCI; D.J. COSENTINO & R.S. LAVADO. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* 49: 57-63.
- TABOADA M.A., A.M FOLCIA, M.B RODRIGUEZ, D.J COSENTINO & A.M GODEAS. 2000. Relación entre porosidad y biota en suelos pampeanos no cultivados. Presentado al XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires.

- TABOADA, M.A.; F.G. MICUCCI & C.R. ÁLVAREZ. 2008a. Impedancias mecánicas y compactación en suelo agrícolas (pp. 93-153). En: M.A. Taboada & C.R. Álvarez (eds.). Fertilidad Física de los suelos. Ed. FAUBA. Buenos Aires, Argentina.
- TABOADA, M.A.; O.A. BARBOSA & D.J. COSENTINO. 2008b. Null creation of air filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173: 130–142.
- TAYLOR, H.M. & L.H. RATLIFF. 1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and water content. *Soil Sci.* 108:113-119.
- TEIXEIRA, E.I.; D.J. MOOT & H.E. BROWN. 2008. Defoliation frequency and season affected radiation use efficiency and dry matter partitioning to roots lucerne (*Medicago sativa* L.) crops. *Europ. J. Agron.* 28: 103-111.
- TERMINIELLO, A.; R. BALBUENA; M. ARIATA; J. HILBERT; J. CLAVERIE & D. JORAJURÍA. 2007. Descompactación del suelo y tráfico de siembra. Efectos sobre el rendimiento de soja (*Glycine max* L Merr). In: Congreso Argentino de Ingeniería Rural. 9. Congreso del Mercosur. 1. 2007 09 19-22, 19 al 22 de septiembre de 2007. Córdoba. Arg.
- THOMAS, G.W.; R.L. BLEVINS; R.E. PHILPS & M.A. MC MAHON. 1973. Effect of killed sod mulch on nitrate movement and corn yield. *Agron. J.* 65: 736-739.
- THREADGILL E. D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Trans. ASAE* 25:859-863
- TO, J. & B.D. KAY (2005) Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer. *Geoderma* 126:261-276.
- TORMENA, C.A. & G. ROLOFF. 1996. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.* 20: 333-339.
- TORMENA, C.A.; A.P. DA SILVA & P.L. LIBARDI. 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo.* 22: 573-581.
- TORMENA, C.A.; A.P. DA SILVA & P.L. LIBARDI. 1999. Soil physical quality of a brazilian oxisol under two tillage systems using the least limiting water range. *Soil Till. Res.* 52: 223-232.
- TREMBLAY, G. & C. VASSEUR. 1994. Effets de régies culturales sur le rendement et la biomasse aérienne de trois cultivars de blé de printemps. *Can. J. Plant Sci.* 74: 279-285.

- TWOMLOW, S.J.; R.J. PARKINSON & I. REID. 1994. Temporal changes in soil conditions after deep loosening of a silty clay loam in SW England. *Soil Till. Res.* 31: 31-47.
- UHART, S.A. & F.H. ANDRADE. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1376-1383.
- URIBELARREA, M.; MOOSE, S.P.; BELOW, F.E. 2007. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use efficiency in maize hybrids. *Field Crops Res.* 100: 82-90.
- VALENZUELA, C., A. I. DELLA MAGGIORA, L. ECHARTE, M. CAMBARERI Y M. POLIZZI. 2009. Evapotranspiración y eficiencia en el uso de agua en intercultivos maíz-soja vs cultivos puros. *Meteorologica*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, v. 34, n. 2.
- VAN GENUTCHEN, MT. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44:892-898.
- VAN HERWAARDEN, A.F. & J.B. PASSIOURA. 2001. Using harvest index to diagnose poor water use efficiency. *Australian Grain.* 11 (5): 3-6.
- VARSA, E.C.; S.K CHONG; J.O. ABOLAJI; D.A. FARQUHAR & F.J. OLSEN. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil Till. Res.* 43: 219-228.
- VEPRASKAS, M.J. 1984. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1220-1225.
- VIGLIZZO, EF; A.J PORDOMINGO; M.G CASTRO; F. LÉRTORA & J BERNARDOS. 2004. Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina. *Agriculture Ecosystem Environment* 101:39-51.
- VILCHE, M.S.; S. MONTICO & N. DI LEO. 2004. Escarificado en siembra directa. Distribución espacial de los flujos preferenciales. *Rev. FCA (UNCuyo).* 36 (2): 73-80.
- VILLAR, J. 1999. Evolución del nitrógeno durante el ciclo del trigo. *Información Técnica de Trigo.* EEA INTA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 92. Rafaela, Santa Fe, Argentina.
- VILLAR, J. 2001. Dinámica del consumo de agua de trigo en siembra directa. *Información técnica de trigo, campaña 2001.* EEA INTA Rafaela. Publicación miscelánea N° 94. Rafaela, Santa Fe, Argentina.

- VILLAR, J. & E. ASTEGIANO. 2004. Evolución de algunos parámetros climáticos durante las campañas trigueras 2002 y 2003 como condicionante de los rendimientos (pp. 8-14). EEA INTA Rafaela. Publicación miscelánea N° 101. Rafaela, Santa Fe, Argentina.
- VILLAR, J.; E.D. ASTEGIANO; J. FRANA & M. HERMANN. 2005. Evaluación de alternativas tecnológicas para el trigo en la región central de Santa Fe: respuesta física y económica en las campañas 2002, 2003 y 2004 (pp. 37-40). Información Técnica de Trigo. EEA INTA Rafaela. Publicación miscelánea N° 103. Rafaela, Santa Fe, Argentina.
- VILLAR, J. 2010. Estimación de rendimientos de trigo a partir del agua almacenada en el centro de Santa Fe. Para mejorar la producción (EEA INTA Oliveros). 43: 33-41.
- VISCHEL, T. Y LEBEL, T. 2007. Assessing the water balance Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff: Part 2. Idealizing modeling runoff sensitivity. *Journal of Hydrology* 333:340-355.
- VOORHEES, W.D. 1987. Assessment of soil susceptibility to compaction using soil and climatic data bases. *Soil Tillage Res.* 10:29-38.
- WALLACE, J.S., C.H. BATCHELOR, D.N. DABEESING, M. TEELUCK & G.C. SOOPRAMANIEN. 1991. A comparison of the light interception and water use of plant and first ratoon sugar cane intercropped with maize. *Agricultural and Forest Meteorology* 57:85-105.
- WARDLAW, I.F. & C.W. WRIGLEY. 1994. Heat tolerance in temperate cereals: an overview. *Aust. J. Plant Phys.* 21: 695-703.
- WARDLAW, I.F.; I.A. DAWSON; P. MUNIBI & R. FEWSTER. 1989. The tolerance of wheat to high temperatures during reproductive growth. Survey procedures and general response patterns. *Aust. J. Agric. Res.* 40: 1-13.
- WARNCKE, D.D. & S.A. BARBER. 1972. Diffusion of zinc in soil. II. The influence of soil bulk density and its interaction with soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 42-46.
- WATSON, D.J. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Botany.* 11: 41-76.
- WHALLEY, W.R.; P.B. LEEDS HARRISON; L.J. CLARK & D.J.G. GOWING. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil Till. Res.* 84: 18-27.

- WHEATON, A.D; B.M. MC KENZIE & J.M. TISDALL. 2008. Management to increase the depth soft soil improves soil conditions grapevine performance in an irrigated vineyard. *Soil Till. Res.* 98: 68-80.
- WILLIAMS, S. & R. WEIL. 2004. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1403-1409.
- ZADOKS, J.C.; T.T. CHANG & C.F. KONZAK. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.
- ZOU, C.; C. PENFOLD ; R. SANDS; R.K MISRA & I. HUDSON 2001. Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiate pine seedlings. *Plant Soil* 236:105-115
- ZOU, C.; R. SANDS; G. BUCHAN & I. HUDSON. 2000. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soil. *Aust. J. Soil Res.* 38: 947-958.