

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Agrarias

Tema:

**“COMPACTACIÓN POR TRÁNSITO DE MAQUINARIAS
EN UN ARGIUDOL TÍPICO”**

Tesista: ING. AGR. GUILLERMO GERSTER

**Tesis para optar al grado de Magíster en Manejo y Conservación de
Recursos Naturales.**

Director de Tesis: Ing. Agr. (D.E.A.) JUAN JOSÉ DE BATTISTA

Codirector de Tesis: Ing Agr. (M. Sc.) HUGO MIGUEL PEDROL

Zavalla, 28/7/2008

Agradecimientos:

Un Especial agradecimiento a Silvina Bacigaluppo por su participación, colaboración y aportes para la realización de este trabajo, y a mi director de Tesis Juan José De Battista por transmitir su experiencia con humildad, desinterés y entusiasmo.

A mi codirector Hugo Pedrol y a Carolina Sasal, por sus ideas, aportes y la lectura crítica del trabajo.

Se agradece además la participación y colaboración de las siguientes personas quienes han contribuido de diversas maneras para su realización:

Mario Fernández Alsina

José Andreani

Lucas Ferrero

Marcelo Wilson

Fernando Salvagiotti

Jorge Cerana

Martín Silva Rossi

Marcelo Bodrero

María V. de Altube

Alfredo Vernizzi

Mario y Jesús Mosca

Gomeria Juan Pijuan e hijos

Luis Radinja

Ricardo Gerster

Alicia Gadda

Gabriela Avila

A todos ellos, muchas gracias.

Dedicatoria:

Para mis padres, por enseñarme que nada se consigue sin esfuerzo y dedicación.

Para mi mujer Viviana y mis hijos, Fanny y Agustín por darle un verdadero sentido a mi vida.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Índice de Tablas, Figuras y Fotografías.....	VIII
Abreviaturas.	XII
Resumen.	1
Abstract.	3
CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN.	5
Hipótesis de Trabajo.	14
Objetivo General y Parciales.	14
CAPÍTULO 2 - MATERIALES y MÉTODOS.	15
2.1 Localización del área de estudio.	15
2.2 Caracterización del área.	15
2.2.1 Condiciones climáticas.	15
2.2.2 Condiciones edáficas.	16
2.3 Descripción del ensayo.	19
2.3.1 Itinerario Técnico del cultivo de Soja.	23
2.3.2 Itinerario Técnico del cultivo de Maíz.	24
2.4 Variables Climáticas.	25
2.4.1 Registro de precipitaciones.	25
2.4.2 Evapotranspiración.	25
2.5 Variables de suelo.	26
2.5.1 Humedad del suelo.	28
2.5.2 Estado estructural.	28
2.5.3 Densidad aparente máxima.	30

2.5.4	Densidad aparente.	30
2.5.5	Compactación relativa.	31
2.5.6	Porosidad total.	31
2.5.7	Porosidad textural.	32
2.5.8	Porosidad estructural.	33
2.5.9	Índice de Vacíos.	33
2.5.10	Resistencia a la penetración. Índice de cono.	33
2.5.11	Índice de anisotropía.	34
2.5.12	Infiltración básica.	35
2.5.13	Cobertura del suelo.	36
2.6	Variables de cultivo.	36
2.6.1	Densidad de plantas.	36
2.6.2	Características del enraizamiento.	36
2.6.2.1	Mapa de raíces.	36
2.6.2.2	Profundidad de enraizamiento.	37
2.6.3	Altura de plantas.	37
2.6.4	Materia seca.	37
2.6.5	Rendimiento.	38
2.7	Análisis estadístico de las variables relevadas.	38
CAPÍTULO III – RESULTADOS.		40
3.1	Variables meteorológicas.	40
3.1.1	Campaña 2002-2003.	40
3.1.2	Campaña 2003-2004.	43

3.2 Variables de suelo.	45
3.2.1 Estado estructural.	45
3.2.2 Densidad aparente máxima.	49
3.2.3 Densidad aparente.	49
3.2.4 Compactación relativa.....	51
3.2.5 Porosidad.....	51
3.2.6 Índice de vacíos	54
3.2.7 Resistencia a la penetración. Índice de cono.....	55
3.2.7 Índice de anisotropía.....	57
3.2.8 Infiltración básica.....	58
3.2.9 Cobertura de suelo.....	58
3.3 Variables de Cultivo.....	60
3.3.1 Soja	60
3.3.1.1 Densidad de plantas.....	60
3.3.1.2 Características del enraizamiento.	61
3.3.1.3 Altura de plantas en soja.....	64
3.3.1.4 Rendimientos en soja	65
3.3.2 Maíz.....	65
3.3.2.1 Densidad de plantas.....	65
3.3.2.2 Características del enraizamiento.....	65
3.3.2.3 Altura de plantas a floración.....	68
3.3.2.4 Materia seca	68
3.3.2.5 Rendimiento de maíz.	69

3.4	Relaciones entre variables.....	70
3.4.1	Análisis de componentes principales.	70
3.4.2	Relaciones entre las variables físicas.	72
3.4.3	Relaciones entre variables físicas y raíces de soja y maíz.....	73
	CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN	76
	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE TABLAS	Página
Tabla I: Valores medios y extremos de temperaturas, humedad relativa y heladas.	16
Tabla II: Precipitación media y Variabilidad en la localidad de Cañada de Gómez.	16
Tabla III: Constantes hídricas de la serie Armstrong.	17
Tabla IV: Caracterización química del sitio experimental	19
Tabla V: Humedad del suelo en el momento de realizar el experimento.	21
Tabla VI: Pesos, área de contacto y presión ejercida por eje en los tratamientos RE y RC.	22
Tabla VII: Propiedades evaluadas de suelo, momentos y profundidades.	27
Tabla VIII: Porcentaje de pisos y de estados delta en los distintos tratamientos en soja.	46
Tabla XIX: Porcentaje de pisos y de estados delta en los distintos tratamientos en maíz.	48
Tabla X: Valores de densidad aparente en los distintos tratamientos (g cm^{-3})	50
Tabla XI: Valores de compactación relativa en los distintos tratamientos (%)	51
Tabla XII: Valores de densidad textural, real e índice de poros textural en los diferentes tratamientos en los distintos tratamientos (gcm^{-3})	52
Tabla XIII: Valores de porosidad en los distintos tratamientos (%)	52
Tabla XIV: Valores de porosidad estructural en los distintos tratamientos (%)	53
Tabla XV: Índice de vacíos (e) en los tratamientos a cada profundidad.	54
Tabla XVI: índice de poros estructurales (IPE) en los tratamientos a cada profundidad	54

Tabla XVII: Índice de cono y porcentaje de H° en los diferentes tratamientos a cada profundidad	57
Tabla XVIII: Valores de infiltración básica en los tratamientos evaluados (cm s ⁻¹).	58
Tabla XIX: Cobertura del suelo a siembra expresado en porcentaje de suelo cubierto.	60
Tabla XX: Densidad de plantas de soja en los diferentes tratamientos	61
Tabla XXI: Abundancia de raíces de soja en cada tratamiento a cada profundidad.	63
Tabla XXII: Altura de plantas de soja en los distintos tratamientos.	64
Tabla XXIII: Rendimientos de soja en cada tratamiento (Kg ha ⁻¹).	65
Tabla XXIV: Abundancia de raíces de maíz en cada tratamiento a cada profundidad.	67
Tabla XXV: Altura de plantas en maíz en los tratamientos T y RC.	68
Tabla XXVI: Materia seca de maíz en los tratamientos T y RC en los estados R3 y R6.	68
Tabla XXVII: Rendimientos promedio de maíz para cada tratamiento (kg ha ⁻¹)	69
Tabla XXVIII: Variables físicas de suelo y abundancia de raíces de soja y maíz a cada profundidad.	73

ÍNDICE DE FIGURAS	Página
Fig. 1: Evolución de la superficie sembrada y cosechada de soja 94/95 y 04/05	6
Fig. 2: Evolución de la producción y rendimiento de soja 94/95 a 04/05	6
Fig. 3: Producción de soja por provincia campaña 2004/05	7
Fig. 4: Localización del ensayo según riesgo hídrico	18

Fig. 5: Diseño del experimento	23
Fig. 6: Valores decádicos de Temperaturas medias y promedios históricos para la serie 71-06	40
Fig. 7: Valores decádicos de radiación solar incidentes. Campaña 2002-03	41
Fig. 8: Evapotranspiración real y lluvias en el sitio experimental soja de 1era. Valores expresados en mm.	41
Fig. 9: Agua en suelo expresado en mm de agua útil a siembra, R3 y R8 del cultivo de soja en los tratamientos T y RC.	42
Fig. 10: Valores decádicos de temperaturas medias y promedios históricos para la serie 71-06. Valores medios Estaciones metereológicas INTA Marcos Juárez y Oliveros-	43
Fig. 11: Valores decádicos de radiación solar incidente. Campaña 2003-04	43
Fig. 12: Evapotranspiración real y lluvias en el sitio experimental. Campaña 2003-2004.	44
Fig. 13: Agua en suelo expresada en mm de agua útil a siembra, R1, y R6 de maíz en los tratamientos T y RC. Campaña 2003-2004.	45
Fig. 14: Cartas estructurales en soja. Campaña 2002-2003	47
Fig. 15: Cartas estructurales en maíz . Campaña 2003-2004	48
Fig. 16: Variación de DAP según contenido hídrico a dos profundidades para el test proctor.	49
Fig. 17: Perfiles de DAP en los distintos tratamientos.	50
Fig. 18: Perfiles de porosidad total en los distintos tratamientos.	53
Fig. 19. Índice de poros estructurales en los distintos tratamientos a cada profundidad	55

Fig. 20: Valores promedio de índice de cono en cada tratamiento a distintas profundidades.	56
Fig. 21: Índice de Anisotropía en los distintos tratamientos	58
Fig. 22: Infiltración básica saturada en los distintos tratamientos	59
Fig. 23: Evolución de infiltración en función del tiempo	59
Fig. 24: Mapa de raíces de soja en los diferentes tratamientos	66
Fig 25: Perfiles de abundancia de raíces de soja en los diferentes tratamientos	62
Fig. 26: Mapa de raíces de maíz en los diferentes tratamientos	67
Fig. 27: Perfil de abundancia de raíces de maíz en los diferentes tratamientos	67
Fig. 28: Altura de plantas en maíz en los tratamientos T y RC.	68
Fig. 29: Rendimientos de maíz para cada tratamiento en kg ha^{-1}	70
Fig. 30: Gráfico Biplot del análisis de componentes principales	71
Fig. 31: Relación entre penetrometría y densidad aparente en el estrato 0-35 cm	73
Fig. 32: Variación del n° de raíces de soja en función de DAP	74
Fig. 33: Variación del n° de raíces en función del índice de cono en soja	74
Fig. 34: Variación del n° de raíces de maíz en función de DAP	75
Fig. 35: Variación del n° de raíces en función del IC en maíz	75
ÍNDICE DE FOTOS	
Fotografía 1: Realización del tratamiento RE durante la instalación del experimento.	20
Fotografía 2 y 3 Determinación del ancho de huella para el cálculo del área de contacto en los tratamientos RE y RC.	22

Fotografías 3 y 4: Estados estructurales en los tratamientos RC (rodado convencional) izquierda y T (testigo) derecha. En rojo estados MΔ, en amarillo estados SD delta.	46
Fotografía 5: Plantas de soja en R8 en los tratamientos RE (rodado especial), RC(rodado convencional) y T (testigo) de izquierda a derecha.	64

Abreviaturas

Aq: Análisis químico.	MS: Materia seca.
AUM: Agua útil máxima.	N: Nitrógeno.
COB: Cobertura del Suelo.	P: Fósforo.
C de C: Capacidad de campo.	PRAI: Profundidad de enraizamiento.
CR: Compactación relativa.	PT: Porosidad total.
DAP: Densidad aparente.	P TEX: Porosidad textural.
DAP MAX: Densidad aparente máxima.	P ES: Porosidad estructural.
DPL: Densidad de plantas.	PMP: Punto de marchites permanente.
DR: Densidad real.	Prof.: Profundidad.
E : Índice de vacíos	RP: Resistencia a la penetración.
EE: Estado estructural.	RPi: RP en cada horizonte.
Etc: Evapotranspiración cultivo.	RP max: Valor máximo de RP.
Eto: Evapotranspiración potencial.	RP mín: Valor mínimo de RP.
h: Altura de plantas.	Rto: Rendimiento.
HG: Humedad de suelo.	SD: Siembra directa.
IA: Índice de anisotropía.	
IB: Infiltración básica.	
IC: Índice de cono.	
Kc: coeficiente cultivo (evapotranspiración)	
MRAI: Mapa de raíces.	
Mat. Org.: Materia orgánica.	

RESUMEN

En el área pampeana, la siembra directa y la intensificación agrícola han generado importantes cambios en el sistema agrícola, convirtiendo a la compactación por tránsito en uno de los problemas que afectan su sustentabilidad. Además de reducir la infiltración y limitar el crecimiento de raíces la densificación puede limitar la producción de los cultivos. El uso de cubiertas de mayor superficie de apoyo podría reducir la degradación física provocada por el tránsito en húmedo. Considerando que la información referida a su eficacia es limitada, se planteó el presente trabajo con el objetivo de evaluar el efecto del tránsito de maquinarias con diferentes rodados sobre el suelo y cuantificar su efecto sobre el crecimiento de raíces y la producción de los cultivos.

El ensayo se realizó sobre un Argiudol típico con más de 8 años de siembra directa continua. Se realizaron tres tratamientos: testigo sin tránsito (T), tránsito con rodado convencional (RC), tránsito con rodado especial (RE). Para los dos últimos se utilizó un equipo constituido por un tractor y una monotolva provista de rodados convencionales y especiales respectivamente. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones. El experimento tuvo una duración de 2 años y se implantaron los cultivos de soja y maíz.

Se realizaron evaluaciones físicas de suelo y de cultivo. Con el conjunto de observaciones se realizó un análisis de componentes principales (ACP) graficando sus resultados mediante un biplot. Los tratamientos se compararon mediante análisis de varianza y test de comparación de medias para cada variable estudiada. El ACP permitió separar claramente los tres tratamientos, asociando T a las variables de suelo y de cultivo; RC asociado a las variables

indicativas de una mayor degradación en los horizontes superiores del perfil y el tratamiento RE con las variables de suelo que indican una densificación en estratos inferiores. Se destaca una correlación inversa entre las variables físicas: densidad aparente e índice de cono (IC) y presencia de raíces en soja y maíz. El IC se destacó entre las variables con mayor capacidad para discriminar la degradación en el perfil. Se destaca que la presencia de densificaciones superficiales en RC limitó el crecimiento de raíces en todo el perfil, RE en cambio presentó un mejor enraizamiento en profundidad incluso en estratos con valores más elevados de IC. Se observaron diferencias significativas -en altura de plantas y materia seca entre T con RE y RC pero no en el rendimiento de los cultivos evaluados; la presencia de la napa que fue alcanzada por las raíces permitió alcanzar rendimientos similares en todos los tratamientos. Si bien los neumáticos especiales favorecieron el desarrollo radical de ambos cultivos, su efecto para atenuar la degradación física provocada por el tránsito es limitado ya que generan densificaciones a mayor profundidad que los neumáticos convencionales. Su uso continuo podría generar compactación más profunda y difícil de revertir aspecto que requerirá la realización de estudios complementarios.

ABSTRACT

SOIL COMPACTION PRODUCED BY VEHICLES TRAFFIC IN A TYPICAL ARGIUDOL

No tillage and agriculture intensification have changed the agroecosystems in the Argentine pampas. Soil compaction produced by farm vehicles reduces water infiltration, diminish root growth and may affect crop production. In wet soils, vehicles with wide tires may reduce soil physical degradation. Considering the lack of information with regards to this topic, this research had the objective to evaluate the effects of tires with different wide on soil physical properties, root growth and crop yields. The experiment was performed on a typical Argiudol soil with more than eight years cultivated under no tillage. A tractor and a grain wagon with different ground tire pressure were used. Three different treatments were evaluated: a control without vehicle traffic (T), conventional tire wideness (RC) and with wider tires (RE). Soybean and maize were planted the first and second year. Data was analyzed via a main components analysis (ACP). All of the variables were compared with ANOVA. ACP separated the three treatments. T was associated with soil and crop variables, while RC was related with degraded portions of the shallower depths in the soil. On the other hand, RE was associated with soil variables associated to compaction of deeper areas in the soil profile. Inverse correlations were observed between bulk density and cone index (IC), and bulk density with soybean and corn root growth. IC was the variable that best described the degradation of the soil profile. Shallow densifications in RC constrained root growth. However, RE showed a deeper root development, even in depths with large IC values. Plant

height and biomass were significantly different between T respect to RE and RC. However, no differences in crop yield were observed, may be due to the presence of a water table at a shallow depth that was reached by the roots in all the cases. The use of vehicles with wide tires improved root growth; however this impact on soil physical properties was limited because they produced dense areas at deeper layers than normal tires. Therefore, continuous use of wide tires may produce deeper compaction and this aspect requires further research.

CAPÍTULO N° I:

INTRODUCCIÓN

Los suelos de la región pampeana fueron afectados durante décadas por problemas erosivos y de degradación física debido a su naturaleza y al sistema de producción utilizado. La composición granulométrica del horizonte superficial, con alto contenido de limo y arcillas no expansivas y la disminución de los niveles de materia orgánica, asociada a la escasa presencia de gramíneas en la rotación, generan un creciente deterioro de su estructura que se manifiesta a través de una alta susceptibilidad a la formación de costras superficiales y de la aparición de horizontes sub-superficiales endurecidos (Pilatti *et al.*, 1988). Este proceso de degradación creciente en las propiedades físicas, químicas y biológicas se manifiesta en un menor aprovechamiento del agua, en graves daños de erosión e inestabilidad de los rendimientos (Marelli, 1998; Orellana, 1993).

A partir de 1990 la práctica de siembra directa (SD) creció a un ritmo acelerado en nuestro país superando en la campaña 2003 las 19 millones de has (Precop INTA, 2007). Si bien la difusión masiva de esta técnica contribuye a reducir los riesgos de erosión y degradación superficial por efectos de las lluvias, las razones de su notable expansión están asociadas a su menor costo, mayor practicidad, a la disponibilidad de equipos de siembra y fundamentalmente a la introducción de cultivares genéticamente modificados resistentes a glifosato. El crecimiento sostenido de esta práctica se realizó sin una adecuada rotación de cultivos: en la actualidad la superficie cubierta con gramíneas de verano no supera en toda la región pampeana un 15 % del área (SAGPyA, 2005). El desplazamiento de otras actividades

como la ganadería, lechería, y el cambio en el sistema de producción agrícola que en otras épocas ocupaban gran cantidad de mano de obra local y regional ha generado en el área pampeana problemas sociales y económicos.

El cultivo de soja (*glycine max*, L. Merr), cubre aproximadamente el 80 % del área sembrada de la Región con un predominio de soja de primera (Fig. 1) (SAGPyA, 2006).

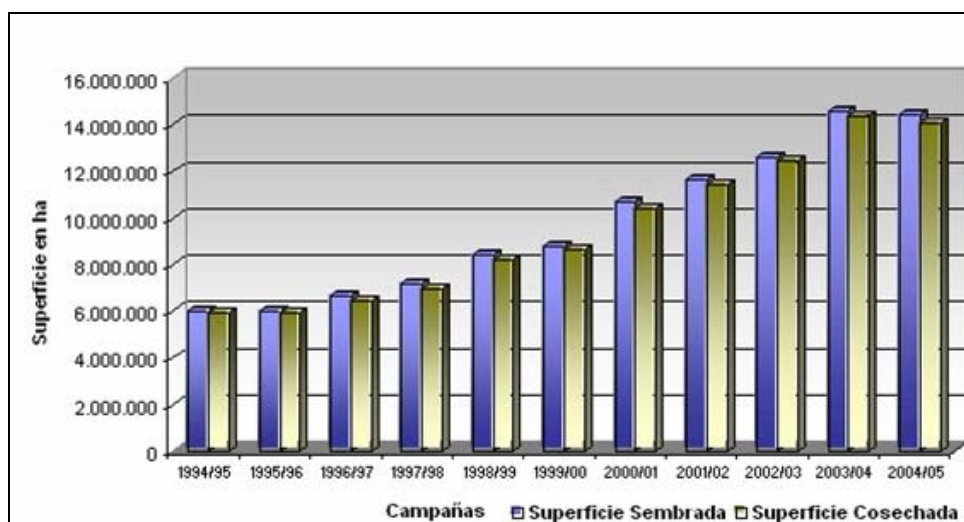


Figura 1: Evolución de la superficie sembrada y cosechada de soja en el país entre las campañas 94/95 y 04/05. Fuente: SAGPyA (2006).

La siembra directa, asociada al uso de cultivares transgénicos y la fertilización con P y S permitieron mejorar año tras año el rendimiento del cultivo (Fig. 2) (SAGPyA, 2005)

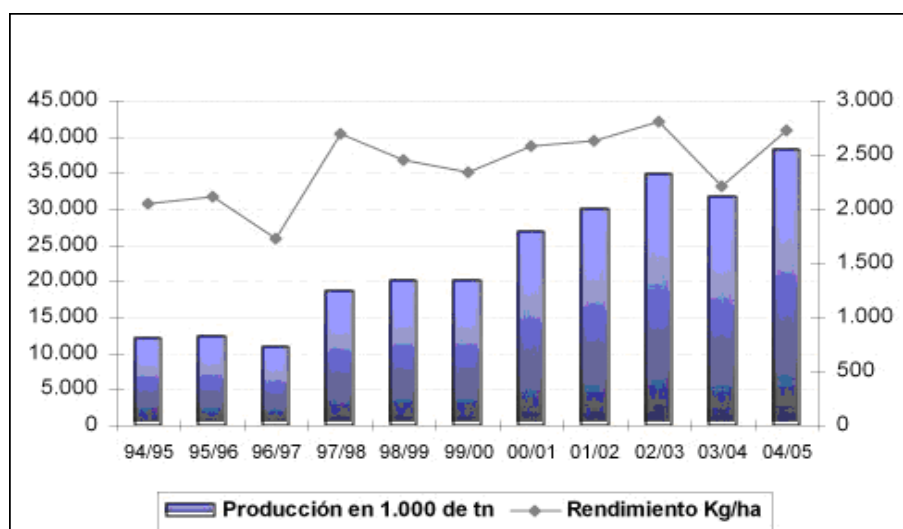


Figura 2: Evolución de la producción y rendimiento de soja campaña 94/95 a 2004/2005. Fuente: SAGPyA (2006).

Las provincias más importantes respecto a la producción de este cultivo son Córdoba y Santa Fe (Fig. 3).

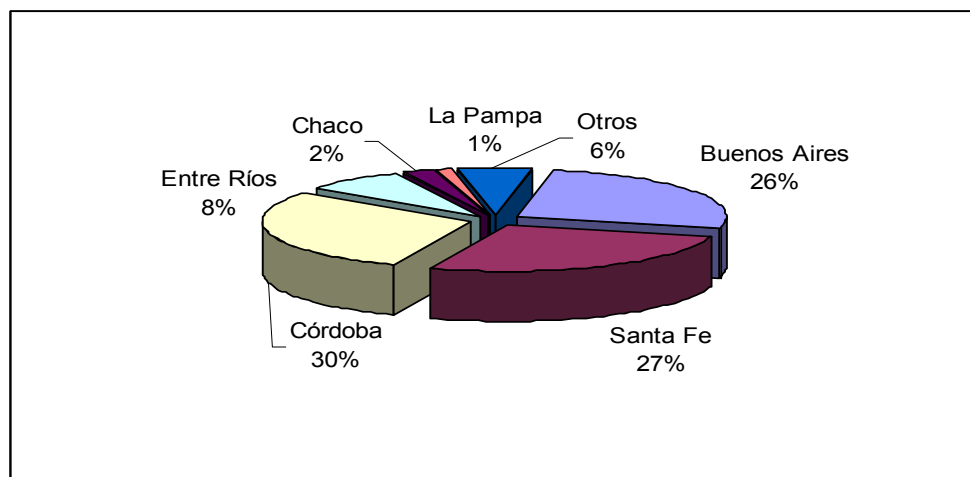


Figura 3: Producción de soja por provincia campaña 2004/05. Fuente: SAGPyA, (2006)

Si bien el uso extensivo de la SD permitió reducir y limitar los procesos erosivos, la degradación física provocada por el tránsito en húmedo asociada al monocultivo de soja se convirtió en el factor de mayor riesgo en éstos sistemas. La degradación física se manifiesta como una pérdida de la porosidad de los suelos y está asociada a la textura, contenido de materia orgánica y al peso y presión de la maquinaria utilizada (Jorajuría, 2005). Por otra parte, la intensificación en la producción agrícola generó la aparición de equipos de mayor capacidad de trabajo; un incremento de su peso y un mayor número de pasadas asociados a tratamientos de fertilización y protección del cultivo contra malezas, plagas y enfermedades, aspectos que generalizaron este problema.

En trabajos previos se determinó que la superficie afectada por las huellas generadas por los equipos agrícolas en un cultivo de soja de primera supera el 69 %, correspondiendo un 32 % a la cosecha y traslado de la producción; considerando la maquinaria usual en el sur de la provincia de Santa Fe (Gerster, datos inéditos). Las labores de siembra y pulverización para el control de malezas requieren que el suelo posea niveles de humedad cercanos al intervalo

de máxima susceptibilidad a la compactación. A su vez, el desplazamiento de cultivares de soja de ciclo largo (grupos de maduración VI y VII) por cultivares de ciclos mas cortos (grupos IV y III) produjo un adelanto de la cosecha concentrándose en el mes de marzo, coincidiendo con un periodo de abundantes lluvias.

El avance de la agricultura desplazó a la ganadería, incluso en áreas de relieve deprimido y con napas freáticas cercanas a la superficie agravando los “problemas de piso” especialmente en otoños húmedos (Bragachini *et al.*, 2003).

En sistemas agrícolas en siembra directa continua, con monocultivo de soja, la ausencia de gramíneas en la rotación, sumada a la escasa actividad biológica contribuyen a que éstos sectores compactos perduren varios años. En años de déficit hídrico, la presencia de estos sectores incrementa la resistencia mecánica limitando el desarrollo de las raíces en profundidad provocando una mayor dependencia climática por parte de los cultivos (Gerster y Bacigaluppo, 2005).

Estudios realizados acerca de los efectos del tránsito sobre el suelo determinaron que, en estos sectores compactos hay restricciones al desarrollo radical, deficiente aireación y un pobre drenaje, generando condiciones de anaerobiosis (Letey, 1985). Soane (1980), sostiene que la compactación altera el volumen y la estructura de los poros del suelo: reduce el tamaño y el número de macroporos, afectando su forma y continuidad, de esta manera se modifica el estado de agregación y las interacciones existentes entre las fases sólida, líquida y gaseosa, disminuyendo la conductividad, permeabilidad y difusión del agua y aire, a través del sistema poroso. Así, la compactación afecta las propiedades de transferencia produciendo alteraciones perjudiciales en la dinámica del agua y del aire (Montico y Bonel, 2005).

El problema de la compactación no solo afecta al suelo y al cultivo sino también a la eficiencia de tracción del conjunto tractor-implemento produciendo aumentos del esfuerzo de tiro del tractor y por ende incrementos en el consumo de combustible (Jorajuría, 2004).

Cuando un rodado se desplaza sobre un suelo desnudo produce tensiones muy diferentes a las generadas en uno cubierto. La presencia de una abundante cobertura de rastrojos amortigua parcialmente el efecto del tránsito, dado que el esfuerzo mecánico se realiza sobre un intermediario que disminuye sus efectos perniciosos sobre el suelo. En lotes destinados a monocultivo de soja en cambio, la escasa cobertura agrava el problema (Gerster y Bacigaluppo, 2005).

Rodríguez da Silva *et al.*, (2000) en una evaluación del efecto del tránsito por maquinaria bajo dos sistemas de labranza diferentes, determinaron que en SD hubo mayor estado de compactación del suelo, que con respecto a labranza convencional. Según Tebrügge y Doring (1999) y Raper y Mac Kirby (2006) en la SD si bien generalmente aumenta la densidad aparente, aumenta también la estabilidad de agregados y la orientación vertical de los poros, lo que resulta en una mayor circulación de fluidos y una mayor transitabilidad bajo condiciones húmedas que en situaciones bajo labranza. En este sentido Steimbach y Álvarez (2006) trabajando sobre una recopilación de ensayos realizados en el área pampeana observaron que los planteos en SD presentan un incremento de densidad aparente pero paralelamente aumentan la estabilidad de agregados y la infiltración permitiendo un mayor almacenaje de agua para los cultivos. En contraposición a éstos autores, otros estudios realizados han detectado un mayor estado de compactación en éste sistema (Ferrerías *et al.*, 2001). Sasal *et al.*, (2004) observaron una tendencia a la formación de costras superficiales con un predominio de poros horizontales sobre los verticales que generan algunas dudas sobre las bondades de la SD cuando no se aplica una adecuada rotación con gramíneas.

La conductividad hidráulica se modifica sustancialmente ante cambios en la cantidad y distribución de los poros. Pequeños aumentos en la densidad aparente provocan grandes reducciones de esta propiedad. (Blake y Hartge, 1986).

Estudios realizados sobre el efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos genera muchas veces resultados contradictorios. Esto es lógico ya que los parámetros físicos evaluados presentan una relación indirecta con el funcionamiento del cultivo (Letey, 1985; de Battista, *et al.* 1994).

Para analizar el efecto del trabajo del suelo sobre el rendimiento del cultivo es necesario dividir la relación:

Trabajo del suelo → Rendimiento del cultivo
en

Trabajo del suelo → Estado generado → Funcionamiento del cultivo → Rendimiento

teniendo en cuenta la influencia del clima en cada una de éstas relaciones (Sebillote, 1978).

La compactación del suelo ha sido reconocida ampliamente como la causa de restricciones al desarrollo radical y rendimiento de numerosos cultivos (Cerana y Nicollier, 1969, Stengel, 1988; Demmi, 1993; de Battista *et al.*, 1993). Respecto a la interacción con el clima, Gaultney *et al.* (1982) midieron reducciones de rendimiento en maíz (*Zea mays*, L.) en veranos húmedos cercanos al 5 % mientras que en ciclos con menores precipitaciones las mermas alcanzaron el 25 %. Abu Hamedh (2003) trabajando sobre Haplustoles observó reducciones en el rendimiento de maíz entre 14,5 y 26 % en los tratamientos con densificaciones generadas por tránsito de maquinarias.

Gerster y Bacigaluppo (2005) trabajando en Argiudoles típicos, sobre huellas generadas por el uso de tolvas de doble eje de tipo tradicional observaron que los sectores transitados presentaban un incremento en la densidad aparente, reducción de la infiltración básica, menor exploración de raíces y una disminución en los rendimientos de soja y maíz de 1200 y 870 kg, respectivamente. En la actualidad estas tolvas fueron en gran medida desplazadas por el uso de monotolvas de mayor capacidad de carga y de neumáticos tipo tractor.

Resultados de investigaciones realizadas en Minnesota, (Voorhees *et. al.*; 1986) indican que el impacto de la compactación superficial sobre los rendimientos del cultivo de soja, depende fundamentalmente de las condiciones climáticas y del nivel de nutrimentos del suelo. Estos estudios se realizaron en suelos franco arcillosos, y determinaron que el rendimiento del cultivo de soja estuvo estrechamente relacionado con las cantidades de lluvia ocurridas en el periodo reproductivo. Bacigaluppo *et al.*, (2006) analizando datos de tres años en el sur de Santa Fe observaron que el impacto de la compactación sobre el rendimiento del cultivo de soja dependía de las lluvias acumuladas en los períodos reproductivos.

Taboada y Micucci (2004) destacaron que el efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos depende de las condiciones climáticas que interactúan con las propiedades de los suelos. Por este motivo, el efecto de la compactación sobre el cultivo es más grave en condiciones de estrés hídrico y con deficiencia de nutrimentos, mientras que en condiciones climáticas favorables, en muchos casos, no se observa efecto perjudicial sobre los cultivos. Montico y Bonel (2005) encontraron que la compactación por tránsito condicionó el crecimiento de raíces de soja limitando el número de bifurcaciones y su longitud, reduciendo la exploración radical.

Botta *et al.*, (2004) evaluaron el efecto del tránsito de un tractor de 4000 kg de peso sobre el suelo y el cultivo de soja, y encontraron que en la medida que aumentaba el número de pasadas se incrementaba la densidad aparente y el índice de cono. Sólo el pasaje en forma reiterada de ocho veces mostró diferencias significativas en éstos parámetros, por otra parte el rendimiento disminuyó con el número de pasadas, pero sólo encontraron diferencias significativas cuando realizaron más de seis pasadas. Concluyen que los suelos conducidos bajo SD son incapaces de limitar la compactación inducida por altas intensidades de tránsito.

Relevamientos realizados a productores del área del sur de Santa Fe, determinaron que la principal limitante a la producción es el uso ineficiente del agua del suelo (Fernández Alsina y Bacigaluppo, 2000). De un análisis de factores limitantes realizado sobre lotes de esta área, donde se evaluaron aspectos físicos, químicos y de manejo, se desprende que el rendimiento de soja apareció más asociado con las variables físicas que con otras variables (Gerster *et al.*, 2002). Como consecuencia de trabajar sobre información generada de lotes en sistemas reales de producción no fue posible ponderar la incidencia de cada uno de los factores analizados sobre el rendimiento.

Las alternativas para reducir o limitar los efectos negativos del tránsito consisten en utilizar maquinarias de menor peso por eje y/o adecuar los rodados para reducir su presión específica sobre el suelo.

Respecto al primer aspecto, es preocupante la tendencia a la utilización de cosechadoras y tolvas con mayor capacidad de trabajo y mayor peso (Jorajuría, 2005), por lo cual, el uso de neumáticos de mayor superficie de apoyo aparece como la alternativa para reducir o limitar los efectos negativos del tránsito de maquinarias. La ventaja de este tipo de rodados consiste en que permiten reducir la presión específica sobre el suelo ya que distribuyen la carga en su mayor superficie de contacto. En este aspecto, es importante

considerar que el efecto del tránsito sobre los horizontes superiores es dependiente de la presión específica, mientras que el efecto en estratos más profundos está asociado al peso por eje (Håkansson y Reeder, 1994). Sin embargo, a pesar de tener una gran difusión; la información existente sobre las ventajas del uso de neumáticos especiales y su efecto sobre el suelo y los cultivos en el área es insuficiente, existiendo dudas si permiten reducir el efecto negativo del tránsito en equipos de elevada carga por eje.

Considerando que, en el área pampeana la compactación asociada al tránsito es reconocida como uno de los factores limitantes de la producción, y que la información referida al uso de rodados alternativos con el objeto de reducir su impacto es limitada, se planteó el presente trabajo con el objeto de evaluar el efecto del tránsito de maquinarias con diferentes rodados sobre el suelo, y cuantificar su efecto sobre el crecimiento de raíces y la producción de los cultivos.

HIPÓTESIS:

- 1. El tránsito en húmedo modifica negativamente propiedades del suelo y la producción de cultivos de soja y maíz.**
- 2. El uso de rodados especiales permite reducir la degradación del suelo provocada por el tránsito en húmedo y sus efectos sobre soja y maíz.**

1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto del tránsito de maquinarias sobre el suelo y los cultivos de soja y maíz, utilizando diferentes tipos de rodados.

1.2 Objetivos parciales:

1. Evaluar el efecto del tránsito de maquinarias sobre el estado físico del horizonte superficial con elevados contenido de limo, en siembra directa.
2. Evaluar la incidencia de las modificaciones del estado físico sobre el crecimiento de raíces y producción de los cultivos de soja y maíz.
3. Evaluar los efectos del uso de diferentes tipos de rodados sobre el suelo y los cultivos.

CAPÍTULO 2:

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 **Localización del área de Estudio:**

El experimento se realizó en un Establecimiento ubicado a los 32° 46' 26'' L. S. y a los 61° 23' 47' L. O. Dicho sitio se encuentra en el distrito Cañada de Gómez, provincia de Santa Fe, república Argentina.

2.2 **Caracterización del área:**

2.2.1 **Condiciones climáticas**

El área donde se realizó el estudio se caracteriza por tener un clima templado húmedo a sub-húmedo, sin gran amplitud térmica anual. El régimen pluviométrico tiende a ser monzónico, es decir con concentración de las lluvias en verano ya que el período octubre a marzo comprende el 70 % de las lluvias (INTA, Carta de Suelos, 1988).

Analizando los valores de evapotranspiración potencial y el régimen de lluvias medias normal histórico, se observa un equilibrio entre la demanda y los aportes con una ligera deficiencia en verano y pequeños excesos entre junio y noviembre. La fecha media de la primera helada es a principios de junio y la media de la última helada se extiende hasta principios de septiembre. Estas fechas varían anticipándose o atrasándose en 20 a 25 días.

En la Tabla I se presentan los valores medios y extremos de temperaturas, humedad relativa y heladas.

Tabla I: Valores medios y extremos de temperaturas, humedad relativa y heladas para el área de la localidad de Cañada de Gómez.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Temperatura media °C	24,4	23,6	21,5	17,5	14,8	10,7	10,8	11,8	14,3	17,2	20,4	23,1	17,5
Temp. máxima absoluta °C	43,5	41,0	38,7	35,4	31,3	29,6	31,3	33,4	35,6	39,1	39,5	41,5	43,5
Temp. máxima media °C	31,2	30,3	27,6	23,4	19,6	16,0	16,0	17,6	20,4	23,2	26,9	29,6	23,5
Temp. mínima media °C	18,6	18,1	16,5	12,9	9,7	6,5	6,3	6,7	8,8	11,6	14,4	17,0	12,3
Temp. mínima absoluta	7,0	5,6	2,4	-1,5	-5,6	-8,1	-8,8	-5,8	-6,3	-1,2	1,2	4,2	-8,8
Humedad relativa media %	67	70	74	78	81	80	79	74	72	71	70	68	74
Frecuencia media días con heladas	0	0	0	0,1	1,3	4,4	5,2	3,6	1,2	0,2	0	0	16,0
Heladas	Primeras heladas					Últimas heladas					Periodo libre de heladas		
	Fecha Media		Variabilidad			Fecha Media		Variabilidad					
	3/6		+/- 20 días			4/9		+/-20 días			275 días		

Fuente: INTA. Carta de Suelos de la República Argentina (1988). Hoja 3360-13 y 14 Cañada de Gómez y Rosario.

En la tabla II se presentan los valores de precipitación media y variabilidad para la localidad de Cañada de Gómez.

Tabla II: Precipitación media y variabilidad en la localidad de Cañada de Gómez período 1901-1980.

Parámetro	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Precipitación media (mm)	116,9	89,9	137,7	81,4	46,6	31,9	30,4	32,0	59,5	90,5	100,8	98,5	916,2
Desviación típica (mm)	82,6	50,4	68,2	58,1	40	42,7	32,2	36,7	47,1	54,8	57,4	89,9	187,9
Coefficiente variación	71	56	50	71	86	134	106	115	79	61	57	91	21

Fuente: INTA. Carta de Suelos de la República Argentina (1988). Hoja 3360-13 y 14 Cañada de Gómez y Rosario

2.2.2 Condiciones Edáficas

El suelo correspondiente al sitio experimental, - área norte de Cañada de Gómez, departamento Iriondo, provincia de Santa Fe-, es un Argiudol típico serie Armstrong. Es profundo, oscuro, bien drenado que ocupa extensas lomadas suavemente onduladas, con

pendientes menores al 1 % entre las vías de drenaje. El perfil modal de este suelo presenta un horizonte superficial A de 20 cm de espesor, de textura franca limosa con 24 % de arcilla, bien provisto de materia orgánica; le sigue un horizonte transicional BA y a los 31 cm el horizonte Bt de 65 cm de espesor, divisible en Bt1, Bt2 y Bt3. Es de textura arcillo limosa, con 43 % a 48 % de arcilla y estructura en prismas moderados. Sigue un horizonte transicional BC de 34 cm de espesor y de textura franco limosa. El horizonte C, material originario, se encuentra a los 130 cm de profundidad con textura franco limosa con 24 % de arcilla (Tabla III) (INTA, Carta de Suelos, 1988). Estos suelos suelen presentar la napa freática a menor profundidad que las demás series del área, alcanzando la parte más profunda de los perfiles. Esta característica constituye un beneficio para la productividad de estos suelos ya que son menos propensos a sufrir los efectos de la sequía temporaria que puede afectar los cultivos del área (Michelena *et al.*, 1989).

Tabla III : Constantes hídricas de un suelo Argiudol típico serie Armstrong

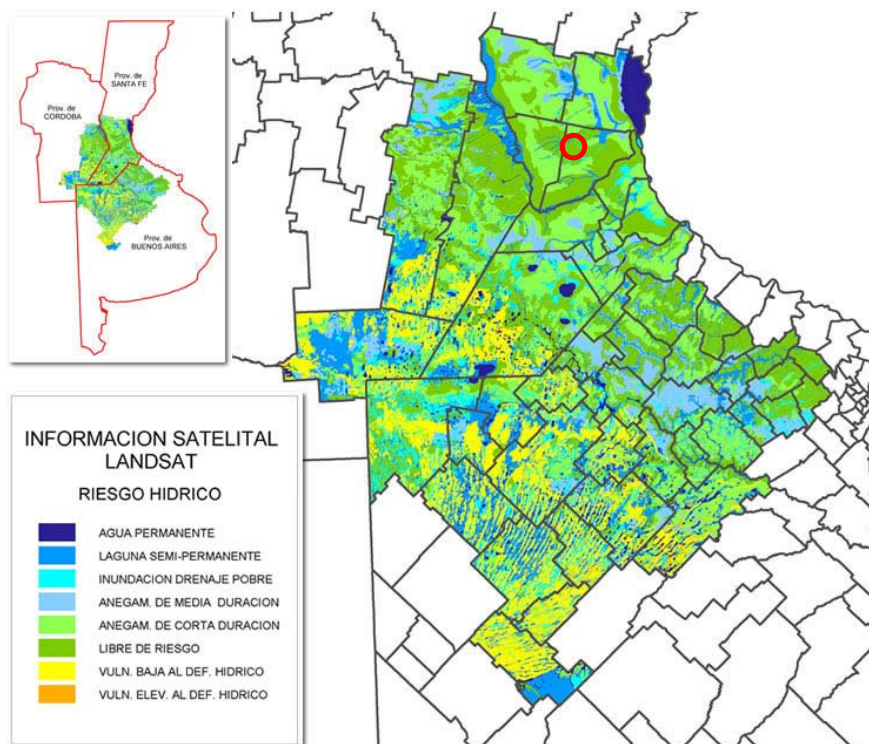
Serie Armstrong			DAP	PMP	C de C	C de C
Horizonte	Profundidad	Espesor	(g/cm ³)	g/100 g	g/100 g	mm
	(cm)	(cm)				
Ap	20	20	1,23	16	29,8	33,9
BA	20-31	11	1,38	18,1	29,2	16,8
Bt1	31-45	14	1,4	19,4	30,4	21,6
Bt2	45-70	25	1,4	19,5	30,5	38,5
Bt3	70-96	26	1,37	17,8	28,9	39,5
BC	96-130	34	1,33	17	28,2	50,6
C1	130-145	10	1,25	14,7	25,7	13,8
C	145-200	55	1,26	14,8	25,7	75,5
		200				290,3

Fuente: profundidad de horizontes según Carta de Suelos (INTA), 1988. Valores de PMP y C de C estimados para la serie por Andriani, (1995) (datos inéditos, com. personal)

PMP: punto de marchitez permanente; C de C: capacidad de campo.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas y edáficas el área es considerada como libre de riesgo climático desde el punto de vista de las deficiencias hídricas en un trabajo

realizado a partir de las imágenes satelitales de alta resolución Landsat TM 5 y 7 (Straschnoy *et al.*, 2006), (SAGPyA, 2006) (Figura 4).



Referencias: ○ Localización del ensayo

Figura 4: Localización del ensayo de Compactación por tránsito según riesgo hídrico, Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación.2006.

El consumo de agua de las napas freáticas por parte de los cultivos tiene lugar cuando las raíces alcanzan sectores influenciados por el ascenso capilar y permite reducir o minimizar un stress hídrico climático (Jobbágy *et al.*, 2007), en el área pampeana se considera que las raíces de los cultivos alcanzan habitualmente los 2 m de profundidad (Andriani, 1999).

El lote correspondiente al sitio experimental tiene más de veinte años de agricultura, de los cuales los últimos ocho años se realizaron en siembra directa continua.

Para la caracterización química del sitio experimental; se extrajo una muestra compuesta del suelo a tres profundidades 0-20, 20-40 y 40-60 cm, en base a los protocolos de

muestreo para los métodos de diagnósticos utilizados en el área pampeana (INTA, 2008). Los resultados se presentan en la tabla IV.

Tabla IV: Caracterización química del sitio experimental

Profundidad	M org %	P ppm	pH	Nitratos (ppm)	Sulfatos (ppm)
0-20	2,57	14,8	5,79	27	1,85
20-40	1,94	11,75	6,04	18,5	0,96
40-60		9,92	6,3	9,66	3,6

M org: materia orgánica por Walkeley y Black, 1934, P : fósforo Bray Kurtz, 1945; pH método potenciométrico dilución 1:2,5; Nitratos método fenoldisulfónico.

Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos de INTA Oliveros.

2.3 Descripción del Ensayo

Con el objeto de generar parcelas con diferentes niveles de compactación se utilizó un conjunto de tractor y monotolva cargado con cereal utilizando diferentes tipos y tamaño de neumáticos.

El experimento se inició en la campaña 2002/03. El tamaño de las parcelas experimentales fue de 9,6 m de ancho y 200 m de largo. El experimento tuvo una duración de 2 años, siendo la secuencia de cultivos evaluada Soja (Año 1, 02/03) – Maíz (Año 2, 03/04).

Previo a la siembra del cultivo de soja, con el suelo con contenido hídrico superior al límite plástico inferior, se realizaron 3 tratamientos: sin tránsito (T), tránsito con rodado convencional (RC) y tránsito con rodado especial (RE). En la instalación de los diferentes tratamientos para cada tipo de rodado utilizado, el tractor se desplazó 60 cm entre cada pasada a los efectos de que cada parcela fuera transitada en su totalidad por el equipo. Por la forma de realización de estos tratamientos el sector central (7 m) fue transitado para cada tratamiento, en dos oportunidades. En este sector es donde se realizaron todas las determinaciones. El tractor utilizado fue un Massey Ferguson modelo 1195L de 5.150 kilogramos de peso,

equipado con cubiertas 750-18 Guía 6T, con 207 kPa de presión, adelante; y cubiertas 18-4-34 Dyna Torque II 8 T, con 124 kPa de presión, con agua y 30 % de dibujo, atrás y un acoplado monotolva de un solo eje, de 3.500 kg de peso cargada con 9.800 kg de cereal (peso total 13.300 kilogramos), equipada con cubiertas 23-1-30 Dyna Torque II 12 T, con 207 kPa, sin agua y 40% de dibujo, para el tratamiento RC. Para el tratamiento RE, se usaron cubiertas 24-5-32 AWT, con 195 kPa, sin agua, y 100 % de dibujo y el tractor se utilizó con cubiertas duales.

El tratamiento T sólo recibió el tránsito normal ocasionado por las tareas de siembra, pulverización y cosecha. Para la cosecha de ambos cultivos se evitó el ingreso de acoplados tolva dentro del ensayo, las tareas de pulverización se realizaron en sentido transversal a las líneas de siembra.



Fotografía 1: Realización del tratamiento RE (rodados especiales) durante la instalación del experimento.

Los valores de humedad del horizonte superficial al aplicar los tratamientos fueron ligeramente superiores a la humedad crítica determinada por el test Proctor para cada horizonte (Tabla V).

Tabla V: Humedad de los horizontes superficiales en el momento de realizar el experimento de compactación por tránsito.

Profundidad cm	% H del suelo	Humedad crítica Test proctor
0-20	24,1 %	22,9 %
21-30	26,5 %	25,6 %
31-40	26,5 %	26,2 %

Las presiones en el área de contacto rueda/suelo se calcularon en base al peso por eje y a la superficie de contacto de los rodados con el suelo. El peso por eje se determinó a campo utilizando una balanza portátil modelo Seedmech. La superficie de contacto fue determinada mediante la fórmula propuesta Söne, (1953) citado por O'Sullivan et al. (1999): superficie de contacto = $d \cdot a / n$, donde d es el diámetro exterior del neumático; a el ancho del mismo (fotografía 2 y 3) y n es un valor dependiente del tipo de terreno transitado. El ancho se midió sobre el terreno al que previamente se removió el rastrojo (Fig. 5) y como valor de n se consideró 2,8 en base a la textura y los valores de materia orgánica del horizonte superficial (Pozzolo, 2008 com. personal). Las presiones así calculadas resultaron de 195 kPa en el tratamiento RC y 113 kPa en el tratamiento RE para el eje trasero del tractor y de 422 y 352 kPa para los tratamientos RC y RE en el eje del acoplado tolva (Tabla VI).

Tabla VI: Pesos, área de contacto y presión ejercida por eje en los tratamientos RC y RE.

Tratamiento	Tractor			Monotolva	
	Rod. delantero	Rodado trasero		RC	RE
		RC	RE		
Rodado	750-18 Guía 6T	18-4-34 Dyna Torque	Dual 18-4-34 Dyna Torque	23-1-30 DynaTorque	24-5-32 AWT
Peso por rueda (kN)	6,3	25,4	25,4	58,7	58,7
Peso por eje (kN)	12,7	50,8	50,8	117,4	117,4
Área de contacto por rueda (m²)	0,056	0,26	0,45	0,278	0,3
Presión de contacto por rueda (kPa)	113,0	97,7	56,6	211,2	176,2
Presión de contacto por eje (kPa)	226,0	195,4	113,3	422,3	352,3

RC: rodado convencional RE: rodado especial. Guía 6 T, Dyna torque, AWT son modelos comerciales de cubiertas de Goodyear.



Fotografías 2 y 3: Detalles de la determinación del ancho de huella para el cálculo del área de contacto en los tratamientos RE (rodado especial) izquierda y RC (rodado convencional) derecha.

El peso ejercido por el eje trasero del tractor y de la monotolva utilizado supera el valor de 36 kN sugerido por Botta (2005) como valor límite a partir del cual se pueden generar daños acumulativos a nivel subsuperficial. Sin embargo, dichos valores de masa resultan normales en los ejes traseros de los tractores modales así como en los acoplados tolva utilizados habitualmente en la región pampeana.

El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados, con tres repeticiones (Fig. 5).

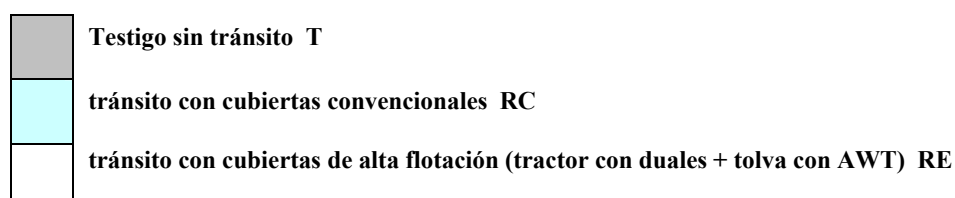
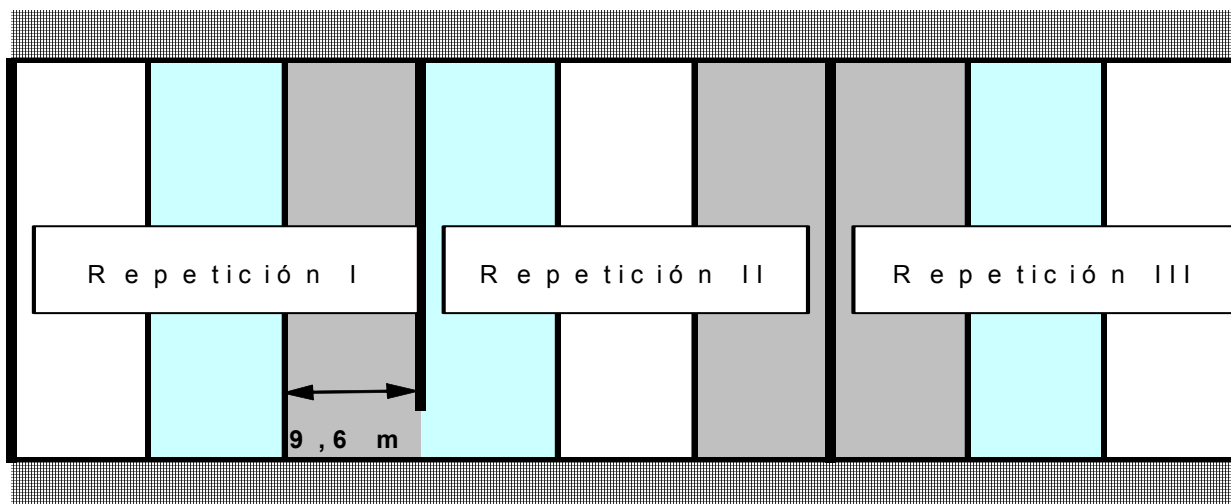


Figura 5: Diseño del experimento de compactación por tránsito en bloques completos aleatorizados

2.3.1 *Itinerario técnico del cultivo de soja.*

El cultivo antecesor fue soja, el 25 de mayo del 2002 se realizó un barbecho químico con 7 g ha^{-1} de metsulfuron metil al 60 % y 2 L ha^{-1} de glifosato al 48 %. Para el caldo de aplicación se utilizó 80 L ha^{-1} de agua. El equipo de aplicación utilizado es automotriz de 3000 L de capacidad de tanque y 25 m de ancho de botalón. Se utilizaron picos abanico plano 11002 con 30 libras pulgada⁻² de presión. El 20/10/02, dada la presencia de malezas, se realizó una nueva aplicación con $2,5 \text{ L ha}^{-1}$ de glifosato 48 E.

El 9/11/02 se sembró soja variedad DM 4400 grupo de madurez 4,4 a una densidad de 22 semillas por metro lineal, a 52,5 cm entre líneas de siembra. Para la siembra se utilizó una sembradora Giorgi de 22 líneas a 52,5 cm entre surcos, con fertilización en la línea y entre líneas (doble fertilización) provista de sistema de siembra de doble disco. En base a la

disponibilidad de nutrientes del sitio experimental se aplicaron a la siembra del cultivo 20 kg, ha⁻¹ de Fósforo y 20 kg ha⁻¹ de azufre. La emergencia del cultivo se produjo el 15/11/02.

Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo se realizaron 2 aplicaciones de glifosato a una dosis de 2,5 L ha⁻¹.

En estado R3 (Fehr y Caviness, 1977) se realizó una aplicación de fungicida pyraclostrobim-epoxiconazole (Opera^R) a una dosis de 0,5 L ha⁻¹ de producto comercial con el objeto de controlar las enfermedades de fin de ciclo.

2.3.2 *Itinerario técnico cultivo de maíz*

Luego de la cosecha del cultivo de soja, el 10/5/03 se realizó un barbecho químico con 7 g ha⁻¹ de metsulfuron metil al 60 % y 2 L ha⁻¹ de glifosato al 48 %.

El 12/09 se sembró maíz cultivar Titanium F1, a una densidad de 4,5 semillas por m lineal, a 52,5 cm entre líneas de siembra. La semilla se trató con Semevin (Thiodicarb) a la dosis de 2 L cada 100 kg de semilla con el objeto de evitar el daño de insectos de suelo sobre el stand de plantas.

Se utilizó el mismo equipo de siembra del cultivo anterior con placas ajustadas al calibre de semilla utilizado. Con la siembra, en base a la disponibilidad de nutrientes del sitio experimental, se aplicaron al cultivo, 20 kg ha⁻¹ de fósforo, 21 kg de azufre y 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno con el objeto de cubrir los requerimientos de un cultivo de maíz para un rendimiento esperado de 130 qq. ha⁻¹ (Inpofos-PPI, 1999).

Durante las dos campañas analizadas se detectó la influencia de la napa freática entre 1,5 y 2 m de profundidad.

2.4 **Variables Climáticas:**

2.4.1 ***Registro de precipitaciones***

Se tomaron en forma diaria en el Establecimiento donde está ubicado el experimento mediante un pluviómetro. Para su presentación se agruparon en forma decádica.

2.4.2 ***Evapotranspiración***

Considerando que la ubicación geográfica del ensayo se encuentra equidistante de las estaciones meteorológicas Oliveros y Marcos Juárez, se utilizaron los valores promedios de evapotranspiración según Penman calculados para éstas localidades.

La ETo (evapotranspiración potencial) es un indicador de la demanda climática. Sin embargo, no representa el valor de evapotranspiración de un cultivo, ya que este responde de una diferente manera a la demanda climática según su estado fenológico. Para realizar una correcta estimación del consumo del cultivo (ETc), al valor de ETo se lo debe afectar por un coeficiente de cultivo (Kc). Por lo tanto, el valor de Kc a utilizar dependerá del tipo de cultivo y su estado fenológico.

En este caso se utilizaron los Kc determinados en la EEA INTA Oliveros, con la fórmula de ETo de Penman (Andriani, 1999).

$$\mathbf{ETc = Eto * Kc}$$

La ETc así calculada, en base a la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo representa la tasa máxima de evapotranspiración del cultivo a lo largo de su ciclo, manifestada como respuesta a las condiciones preponderantes del clima del lugar, contando con una óptima disponibilidad de humedad. Sin embargo, cada cultivo responderá a esta demanda de la atmósfera de manera diferente, de acuerdo a las características intrínsecas, la disponibilidad de agua y el estado fenológico.

2.5 **Variables de Suelo**

Las variables de suelo determinadas en forma directa fueron: humedad gravimétrica, estado estructural, densidad aparente, resistencia a la penetración, cobertura, infiltración básica y porcentaje de pisos (Tabla VII).

Otras variables utilizadas surgieron de cálculos o combinaciones de las anteriores como compactación relativa, porosidad estructural, índice de vacíos e índice de anisotropía.

Tabla VII: Propiedades evaluadas de suelo y cultivo, momentos de muestreo, profundidad de muestreo y determinaciones por parcela en el ensayo de compactación por tránsito de maquinarias en un Argiudol típico

Propiedad	Abreviatura y método	Momento de Muestreo										Profundidad muestreo (cm)	Determinaciones por parcela * repetición
		Instalación ensayo	Año 1 Soja 1era				Post-cosecha	Año 2 Maíz					
S-E	R1		R3	R8	S-E	R1		R3	R6				
Humedad gravimétrica	HG	X	X		X	X		X	X		X	0-20, 20-40, 40-60, 60-100, 100-150; 150-200 en T y RC	1
Estado estructural	EE (perfil cultural)				X		X		X			0- 40 cm	1
Densidad aparente máxima	DAP MAX proctor						X					0-20 , 20-40	Muestra compuesta
Densidad aparente	DAP (Cilindro)						X					0-7; 7-14; 14-21; 21-28; 28-35	3
Densidad Textural	D TEX (Kerosene)						X					0-20 , 20-40	Muestra compuesta
Densidad Real	DR (picnómetro)						X					0-20 , 20-40	Muestra compuesta
Infiltración básica	IB (permeámetro)						X					superficie	5
Índice de cono	IC (penetrologger)						X					0-50 cada 1 cm	30 para cada prof.
Cobertura	COB (soga graduada)	X	X									superficie	3
Densidad plantas	DPL		X	X		X					X		3
Enraizamiento	MRAI (perfil expuesto)				X				X			0-50 cada 2 cm	1
Altura planta	H PL					X					X		3
Materia seca	MS									X	X		3
Rendimiento	Rto					X					X		3

Referencias: en el cultivo de soja; S-E: siembra emergencia, R1: inicio de floración; R3 inicio llenado granos, R6 plena desarrollo grano R8 madurez según la escala de Fehrs y Caviness, (1977). En el cultivo de maíz; S-E Siembra Emergencia y R1: inicio de floración, R3: grano lechoso y R6: madurez fisiológica según la escala de Ritchie y Hanway, (1982).

2.5.1 ***Humedad del suelo*** (HG)

Se utilizó el método gravimétrico (Klute, 1986). Al momento de aplicación de los tratamientos se tomaron tres muestras compuestas en los horizontes A, BA y Bt1 hasta los 60 cm de profundidad, para comparar con la humedad crítica del test Proctor.

A siembra, R3 y R8 (Fehr y Caviness, 1977) en soja y a siembra, R1 (Ritchie *et al.*, 1982) y cosecha en maíz hasta los dos metros de profundidad, utilizando un barreno manual en los tratamientos T y RC para determinar el contenido hídrico.

El conocimiento de la evolución del contenido hídrico del perfil, considerando el período crítico de los cultivos, permitió determinar si los cultivos evaluados fueron afectados por deficiencias hídricas durante sus diferentes etapas fenológicas. Los datos de agua en el perfil se expresan como agua útil (Tabla III).

2.5.2 ***Estado estructural:*** (EE)

Para conocer el estado estructural del suelo, se abrieron trincheras de 2 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de profundidad, en cada tratamiento. Dichas excavaciones se realizaron en forma transversal a las líneas de siembra y se trabajó sobre una de las paredes verticales. Se delimitaron y cartografiaron las unidades estructurales, según la metodología del perfil cultural (Gautronneau y Manichon, 1987). Según esta metodología se trabajó a dos niveles de organización estructural:

Estado interno de los terrones: según su cohesión y aspecto de las caras de ruptura, luego de una fragmentación manual, en terrones de más de 1 cm de diámetro, se distinguen dos estados típicos:

Γ (Gamma): Corresponde a una cara rugosa y porosidad visible importante, debido a la falta de contacto de los agregados constitutivos. Este estado parece relacionado en forma directa con los procesos naturales de estructuración.

Δ (Delta): Presenta una cohesión más elevada, caras de ruptura lisa de aspecto continuo sin porosidad visible. Se corresponde a coalescencia de los agregados preexistentes bajo una acción de compactación severa.

Disposición de los terrones: Se pueden definir las siguientes modalidades:

*Estado fragmentario, cuando varios terrones de dimensiones comparables coexisten en un volumen dado, se distinguen los estados “F” (terrones individualizados) y SF (terrones adherentes).

*M: (estado masivo) cuando la unidad morfológica está compuesta por un solo elemento de gran dimensión.

*SD: (terrones soldados) cuando los terrones se presentan soldados entre sí. Es un estado intermedio entre el masivo (M) y el de terrones adherentes (SF).

Para cuantificar el estado estructural del suelo y la distribución de los mismos en cada tratamiento se utilizaron 2 índices:

- Frecuencia de estados delta: se expresó como porcentaje de estados delta en el perfil sobre la superficie analizada del mismo (hasta los 30 cm de profundidad) (Manichon, 1986; De Battista, *et al.*, 1993; De Battista, *et al.*, 1994).

- Porcentaje de pisos: Se consideró el porcentaje del perfil, en sentido longitudinal, que presentó sectores masivos en estratos inferiores (Gerster *et al.*, 2002).

La primera variable de síntesis del perfil, representa la superficie del mismo afectada por estados delta (Δ). La segunda variable expresa la proporción de la longitud del perfil afectada por estados M delta.

La determinación del perfil cultural se realizó en forma previa a la determinación del mapa de raíces en cada cultivo y a post-cosecha del cultivo de soja. Esta metodología es de gran utilidad para estudiar el efecto de acciones antrópicas sobre el estado estructural de un suelo y para analizar los efectos de éstos cambios sobre la disposición y funcionamiento de las raíces (Manichon, 1986; Tardieu y Manichon, 1987; De Battista, *et al.*, 1994; Gerster *et al.*, 2002; Gerster y Bacigaluppo, 2005).

2.5.3 ***Densidad Aparente máxima: (DAP MAX)***

Se determinó mediante un análisis Proctor utilizando una muestra compuesta del área del ensayo de los horizontes superficiales (Proctor, 1933).

Esta prueba de laboratorio permite conocer los valores de compactación máxima que puede alcanzar un suelo y es dependiente de la textura del mismo y del contenido de materia orgánica.

Las profundidades muestreadas fueron 0-20 (horizonte A); 21, 30 (horizonte BA) y 30-40 cm (horizonte Bt1) y corresponden a los estratos donde se generan cambios, producto del tránsito de maquinarias (Botta, *et al.* 2002; Taboada y Micucci, 2004; Jorajuría, 2005).

2.5.4 ***Densidad aparente: (DAP)***

Se utilizó el método del cilindro (Blake *et al.*, 1986). Los cilindros utilizados tienen 5 cm de diámetro y 5 cm de alto. Se extrajeron muestras sobre la pared vertical del perfil hasta los 35 cm de profundidad en cada tratamiento, cada 7 cm de profundidad. De ésta manera el horizonte A fue relevado en 3 profundidades, 0-7 cm, 7-14 cm y 14-21 cm, correspondiendo la profundidad 21-28 cm al horizonte BA y 28-35 cm al Bt. Las muestras extraídas se secaron

a 105 °C hasta peso constante. Se tomaron tres repeticiones para cada profundidad en cada parcela. Los valores obtenidos se expresan en g cm^{-3} .

Las muestras para la determinación de ésta variable se extrajeron con una humedad cercana a capacidad de campo en todos los tratamientos, con el objeto de evitar que las variaciones del contenido hídrico incidieran en los resultados obtenidos. La determinación de ésta variable se realizó a post-cosecha del cultivo de soja.

Los valores de densidad aparente fueron calculados con la ecuación:

$$\text{DAP (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Peso suelo seco}}{\text{Volumen de suelo}}$$

2.5.5 ***Compactación relativa: (CR)***

Con los valores de densidad aparente se calculó la compactación relativa en función del porcentaje de la densidad máxima determinada por el test Proctor.

Se determina mediante el siguiente cociente:

$$\text{CR (\%)} = \frac{\text{DAP del tratamiento}}{\text{DAP Máxima de la capa de suelo}} * 100$$

La compactación relativa es una variable útil como indicadora del estado de compactación de los suelos (Moro *et al.*, 2004; Hakansson y Reeder, 1994).

Con los valores obtenidos se construyeron gráficos con la variación de ésta determinación a las diferentes profundidades evaluadas.

2.5.6 ***Porosidad total: (PT)***

Utilizando los valores obtenidos de DAP se calculó la porosidad total con la siguiente ecuación.

$$\text{PT: } 1 - (\text{DAP/DR}) * 100$$

Donde

DAP: densidad aparente medida.

DR: densidad real de partículas.

El valor de densidad real de partículas para el horizonte A y BA se determinó en el laboratorio de Suelos de la EEA INTA Paraná, utilizando una mezcla compuesta de las tres repeticiones para cada horizonte. Para su determinación se utilizó el método del picnómetro (Porta Casanellas *et al.*, 1999).

2.5.7 ***Porosidad textural: (P TEX)***

La porosidad textural se determinó en el laboratorio de Suelos de la EEA INTA Paraná utilizando una mezcla compuesta de las tres repeticiones para cada horizonte. Se utilizó la metodología propuesta por Monnier (1973), citado por Stengel (1988) que considera el volumen ocupado por la parte sólida y el espacio de poros texturales. Se determina sobre pequeños agregados tamizados entre 2 y 3 mm que se impregnan con kerosén y se calcula su volumen por medida de la presión hidrostática en el mismo líquido. La importancia de su determinación radica en que, siendo la porosidad textural un valor poco variable para cada tipo de suelo, el efecto del tránsito afectaría solo la porosidad estructural.

2.5.8 ***Porosidad estructural: (P ES)***

Se obtuvo utilizando la ecuación:

Porosidad estructural = P total - P textural

Dado que la porosidad textural permanece constante, discriminar los cambios generados en la porosidad estructural en cada tratamiento permite detectar las variaciones que

más inciden en el desarrollo de las raíces y en la infiltración del agua (Botta, 2005; Stengel, 1990; Guerif, 1990).

2.5.9 ***Índice de Poros Totales o de Vacío: (e)***

El índice de vacíos es la relación entre el volumen ocupado por el aire y el agua y el volumen real del suelo. Dado que los suelos pampeanos presentan una relación peso/volumen muy baja, el índice de vacíos constituye una herramienta apropiada para expresar la porosidad (Pecorari, 1998).

Para su cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$IPT = dr/dap - 1$$

Se determinó además el índice de poros texturales (Iptx) y por diferencia entre los anteriores se determinó el índice de poros estructurales (IPE):

$$Iptx = dr/dtex - 1$$

$$IPE = IPT - Iptx$$

El índice de vacíos está ligado a la porosidad total por la relación:

$$Pt = \frac{E}{1 + e} \%$$

2.5.10 ***Resistencia a la penetración- índice de cono: (IC)***

El penetrómetro es una de las herramientas más utilizadas para caracterizar el estado físico del suelo (Bradford, 1986; Cerana *et al.*, 2004; Montico y Bonel, 2005).

Se utilizó un penetrómetro Eijkelkamp con punta cónica cono de 30°. Se efectuaron diez repeticiones por parcela y por repetición, las determinaciones se realizaron entre las líneas de siembra, evitando las huellas visibles de las operaciones de siembra, fumigación y

cosecha. Se determinaron los valores promedio de resistencia a la penetración (expresado en MPa) de cada centímetro de profundidad, para todos los tratamientos, hasta los 50 cm de profundidad.

Al efecto de utilizar una escala similar a los mapas de raíces, se realizaron los perfiles de RP graficando los datos cada 2 cm de profundidad considerando el promedio de los datos medidos cada cm de profundidad

La resistencia a la penetración se determinó a cosecha del cultivo de soja. Conjuntamente con las mediciones de resistencia a la penetración se extrajeron muestras para la determinación de la humedad de suelo por gravimetría cada 10 cm de profundidad hasta los 50 cm en cada parcela en los tratamientos evaluados.

El promedio de las medidas de resistencia a la penetración se conoce como Índice de cono (IC) (Jorajuría, 2004).

2.5.11 ***Índice de Anisotropía: (IA)***

Se utilizó éste índice como variable de síntesis de la homogeneidad fisico-mecánica del perfil. El IA presenta la siguiente expresión matemática (Cisneros *et al.*, 1998):

Donde

$$IA \text{ (MPa)} = 0,7 \left(\frac{\sum RPi * Prof I}{Prof \text{ total}} \right) + 0,3 (RP \text{ max} - RP \text{ min})$$

IA= Índice Anisotrópico en MPa.

RPi= RP en cada horizonte o capa (cada 2 cm).

Prof.= espesor de la medición (2 cm).

Prof. total= Profundidad analizada (0-30 cm y 0-50 cm). Se consideró la profundidad 0-30 dado que en éste estrato se observaron las mayores variaciones de IC, y la profundidad 0-50 porque constituye la profundidad total analizada.

RP máx= Valor máximo de RP en la profundidad bajo estudio (30 cm).

RP mín = Valor mínimo de la RP en la profundidad bajo estudio (30 cm).

El primer miembro de la ecuación representa la RP ponderada del perfil cultural e indica la resistencia o dureza del suelo donde crecen las raíces. Se aplica un coeficiente 0,7 para resaltar la importancia de los valores de resistencia absolutos sobre el enraizamiento. El segundo miembro expresa la magnitud de las diferencias de RP y constituye una medida de la heterogeneidad mecánica del perfil. Se aplica un coeficiente de ponderación de 0,3.

El uso de este índice constituye una variable de síntesis de las características físicas del perfil asociados al perfil cultural que más inciden en el enraizamiento de los cultivos (Cisneros *et al.*, 1998; Montico y Bonel, 2005; Zerpa, 2007; Faíta, 2007).

2.5.12 ***Infiltración básica (IB)***

Las mediciones de la tasa de infiltración se relacionan con el deterioro de las propiedades hidráulicas del suelo.

Los valores de infiltración en condiciones saturadas (IB) están íntimamente vinculados a los poros de drenaje y su continuidad, responsables de la capacidad del suelo de captar agua en lluvias intensas.

Se determinó utilizando permeámetros de discos; dada la gran variabilidad en el espacio poroso del suelo se realizaron 5 repeticiones por parcela (Gil, 1999; Silva Rossi, 2004; Gil, 2006). Las mediciones de infiltración se realizaron luego de la cosecha del cultivo de soja, entre las líneas de siembra.

2.5.13 ***Cobertura del suelo: (COB)***

Se determinó el grado de cobertura utilizando el método de la transecta lineal con una cuerda de 10 m. de largo con marcas cada 10 cm (Laflen *et al.*, 1981). Se contabilizaron la coincidencia de cada marca con la presencia de residuos del cultivo anterior en la superficie.

Se consideró la presencia de cobertura cuando existía rastrojo cuya presencia impedía ver el suelo en el sector debajo del nudo de la cuerda. Se tomaron tres determinaciones por parcela. Los resultados se expresaron en porcentaje de marcas con presencia de residuos en superficie. Las determinaciones de cobertura se realizaron en forma previa a la implantación del ensayo y a emergencia del cultivo de soja.

La medición de la cobertura se determinó solo a siembra del cultivo de soja con el objeto de cuantificar el impacto de los diferentes rodados sobre la cobertura preexistente a la aplicación de los tratamientos.

2.6 **Variables de Cultivo**

2.6.1 ***Densidad de plantas: (DPL)***

En ambos cultivos se midió la densidad de plantas a floración y a cosecha. Se realizaron tres determinaciones de 1,92 m lineal de surcos por parcela (1 m²)

2.6.2 ***Características del Enraizamiento***

2.6.2.1 **Mapa de raíces: (MRAI)**

Se caracterizó el sistema radical en ambos cultivos, con este objetivo se utilizó una adaptación del método del perfil expuesto (Bhom, 1979).

Se construyeron trincheras en forma transversal a los surcos, colocando sobre una de las paredes una grilla de 50 cm x 50 cm dividida en cuadros de 2 cm x 2 cm. Se realizó el

recuento de raíces en cada cuadro hasta 1 cm de espesor, las raíces más gruesas, recibieron según su tamaño una mayor calificación numérica (Gil, 1986; Demmi, 1993). Los datos obtenidos se utilizaron para la construcción de gráficos que representan la distribución de raíces en el perfil (Mapa de raíces).

Se realizó un mapa de raíces por parcela, para el caso del cultivo de soja se determinó en R3 (Fehr y Caviness, 1977) y para maíz cuando el cultivo estuvo en R1 (Ritchie *et al.*, 1982).

2.6.2.2 **Profundidad de enraizamiento (PRAI)**

Se determinó mediante la observación de muestras extraídas para la determinación de H gravimétrica. En éstas se observó visualmente la existencia de raíces del cultivo en las distintas profundidades evaluadas a partir de los estados reproductivos.

2.6.3 ***Altura de plantas: (h)***

En los cultivos de soja y maíz se determinó altura de plantas a madurez fisiológica. La determinación se realizó sobre 10 plantas por parcela en todos los tratamientos utilizando una regla.

2.6.4 ***Materia seca : (MS)***

En el cultivo de maíz, en los tratamientos T y RC, se realizaron determinaciones de peso seco de la parte aérea de las plantas para determinar la producción de materia seca del cultivo. Se realizaron los muestreos en dos momentos, en R3 y en R6 (Ritchie *et al.*, 1982). Con este objeto se extrajeron tres muestras por tratamiento y por repetición de 1 m². Las muestras se secaron a estufa a 105 °C durante 48 h o hasta alcanzar peso constante.

2.6.5 ***Rendimiento: (Rto)***

Se realizó cosecha manual, en ambos cultivos tomando tres muestras por tratamiento y por repetición de 2 m². Se expresó en kg ha⁻¹ al 13,5 % de humedad.

2.7 **Análisis Estadístico de las variables relevadas**

Para conocer la asociación existente entre los aspectos relevados del suelo y la exploración de raíces, se realizó un análisis de componentes principales entre las variables relevadas. Para este análisis se consideraron los datos de Cob, hpl S, hpl M, IB, % Δ, % pisos, y DAP, IC, raíz S y raíz M en los estratos muestreados. Para la representación gráfica de correlaciones, entre las variables edáficas y de cultivo, se usaron biplots (Gabriel, 1971). En un biplot, la correlación entre dos variables queda representada por el ángulo entre los vectores que las identifican. Ángulos rectos indican que no hay correlación entre variables, ángulos agudos (menores de 45°) indican correlación positiva, mientras que ángulos que tienden a los 180° se corresponden con correlaciones negativas (Balzarini *et al.*, 2005).

El uso de ésta metodología de análisis permite conocer el grado de asociación entre variables que no son independientes entre sí (Vilche, 2005; Balzarini *et al.*, 2005; Lewis y Torres, 2006).

A los datos obtenidos de cada variable bajo análisis se le aplicó el test de normalidad Shapiro-Wilks (modificado), a aquellos que presentaban una distribución normal se compararon mediante un análisis de varianza y test de Comparación de medias utilizando el software estadístico InfoStat (InfoStat, 2002).

Para conocer el grado de asociación entre variables se realizaron correlaciones y regresiones entre las diferentes variables evaluadas.

Para relacionar IC con DAP se promediaron los valores de RP en cada estrato en que se determinó DAP, dado que los datos RP se determinaron cada cm de profundidad mientras que los de DAP se hicieron cada 7 cm.

CAPÍTULO N° 3

RESULTADOS

3.1 VARIABLES METEOROLÓGICAS

3.1.1 *Campaña 2002-2003*

Las temperaturas registradas para esta campaña durante el ciclo del cultivo se mantuvieron dentro de los valores normales históricos con un leve incremento en el mes de enero (Fig. 6).

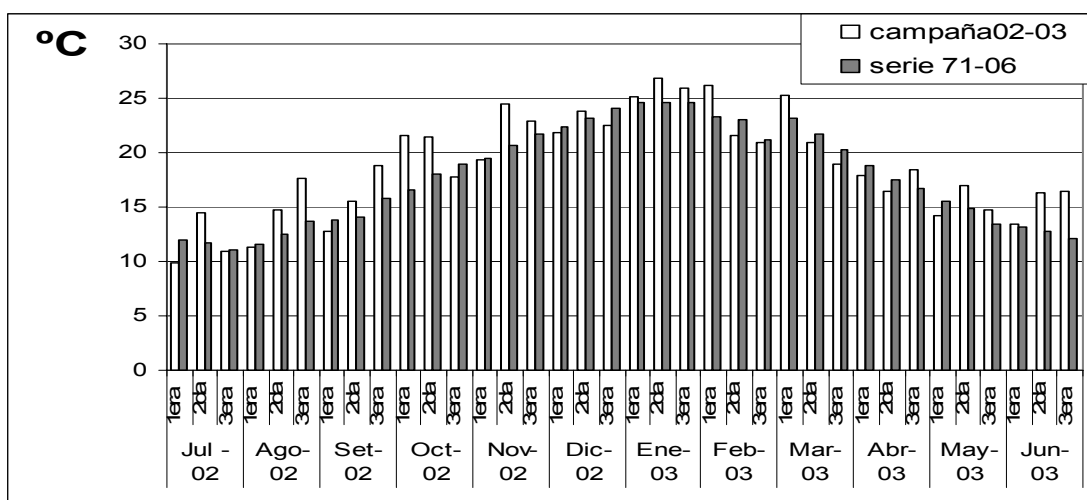


Figura 6: Valores decádicos de temperaturas medias para la campaña 2002/03 y promedios históricos para la serie 71-06 expresado en grados celsius. Valores medios entre las estaciones meteorológicas de INTA Marcos Juárez y Oliveros.

Los valores de radiación observados se mantuvieron dentro de los valores medios del periodo 76/06 (Fig. 7).

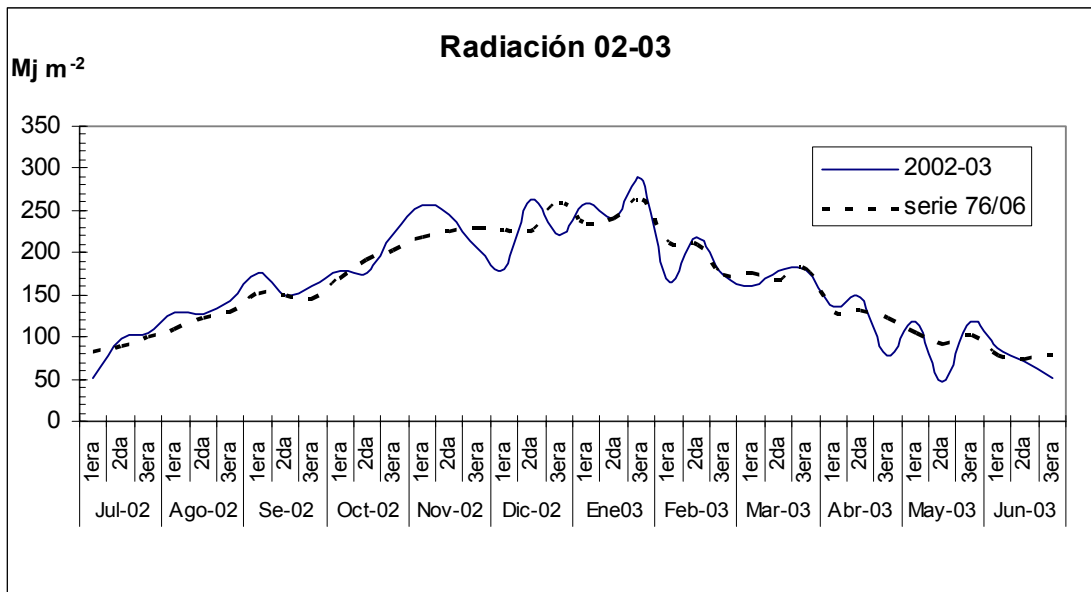


Figura 7: Valores decádicos de radiación solar incidente para la campaña 2002/03 ($Mj m^{-2}$) y valores promedios para la serie 76/06. Valores medios entre las estaciones meteorológicas de INTA Marcos Juárez y Oliveros.

Las precipitaciones de la presente campaña mostraron una distribución favorable. El balance hídrico resultó positivo a excepción del mes de enero en que las lluvias totalizaron 69 mm y la Evapotranspiración real 172 mm, las lluvias del mes de diciembre permitieron superar este periodo deficitario (Fig. 8).

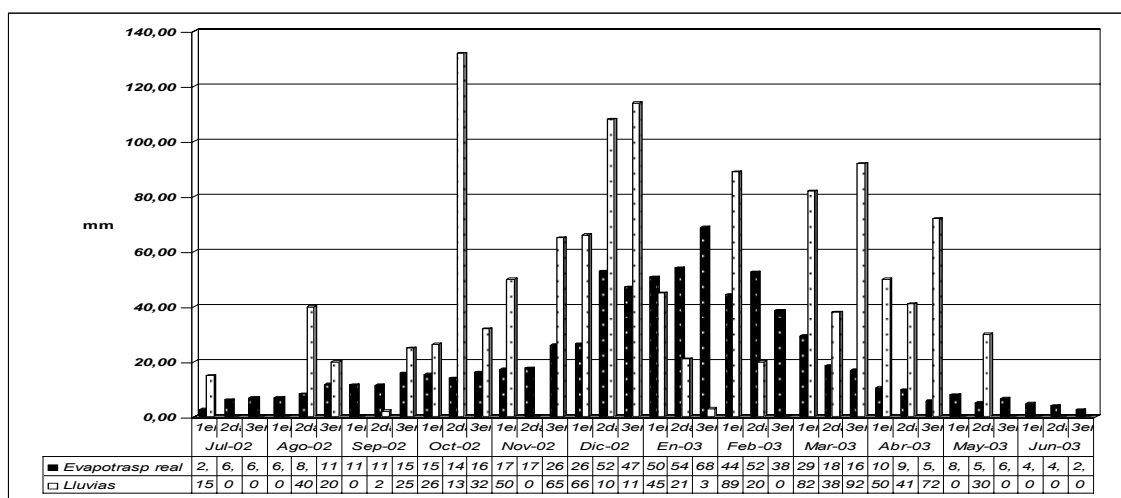


Figura 8: Evapotranspiración real y lluvias en el sitio experimental. Campaña 2002-2003, valores expresados en mm.

Durante el ciclo del cultivo los valores de agua total se mantuvieron por encima de los 240 mm de agua útil en el perfil en ambos tratamientos. El tratamiento RC presentó valores de humedad edáfica menores que T, observándose en algunos estratos diferencias significativas entre los 33 cm y 135 cm. Esta menor disponibilidad de agua en RC se intensificó en R3 y madurez comercial alcanzando valores inferiores al 50 % de AUM entre los 40 y 120 cm de profundidad con diferencias significativas en ese estrato entre ambos tratamientos evaluados (Fig. 9). Las diferencias observadas entre tratamientos pueden deberse a una menor captación de agua por parte de RC como consecuencia de la pérdida de porosidad de los horizontes superiores. Se observa que los valores de agua útil por debajo de 1,40 m son cercanos a 100 % lo que evidencia la influencia de la napa, no siendo limitante el agua en estos horizontes en los tres momentos de muestreo.

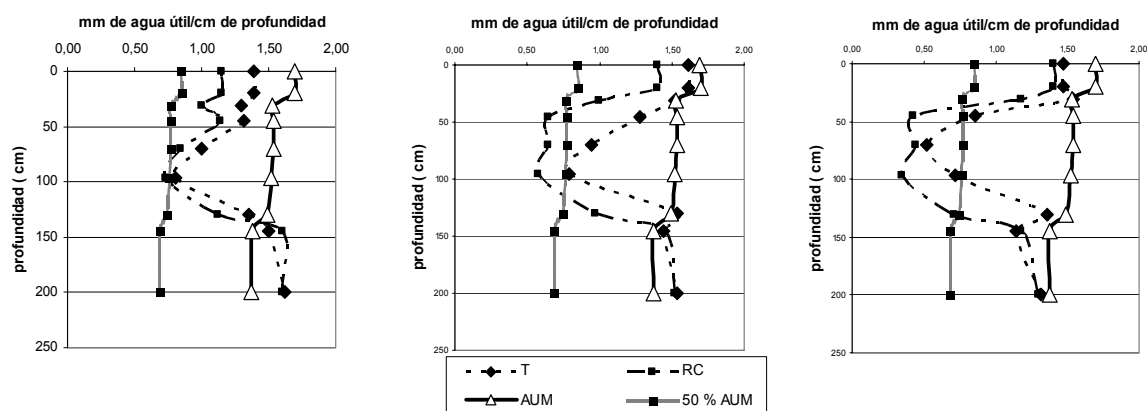


Figura 9: Agua en suelo expresada en mm de agua útil cada cm de profundidad, de izquierda a derecha; a siembra, R3 y R8 del cultivo de soja en los tratamientos T (testigo) y RC (rodado convencional), AUM agua útil máxima. Ensayo de compactación por tránsito.

3.1.2 Campaña 2003-2004

Los valores de temperatura media ocurridos durante el cultivo de maíz fueron similares a la serie histórica con un leve incremento en la 3^{er} período decádico de noviembre y en el mes de marzo (Fig. 10).

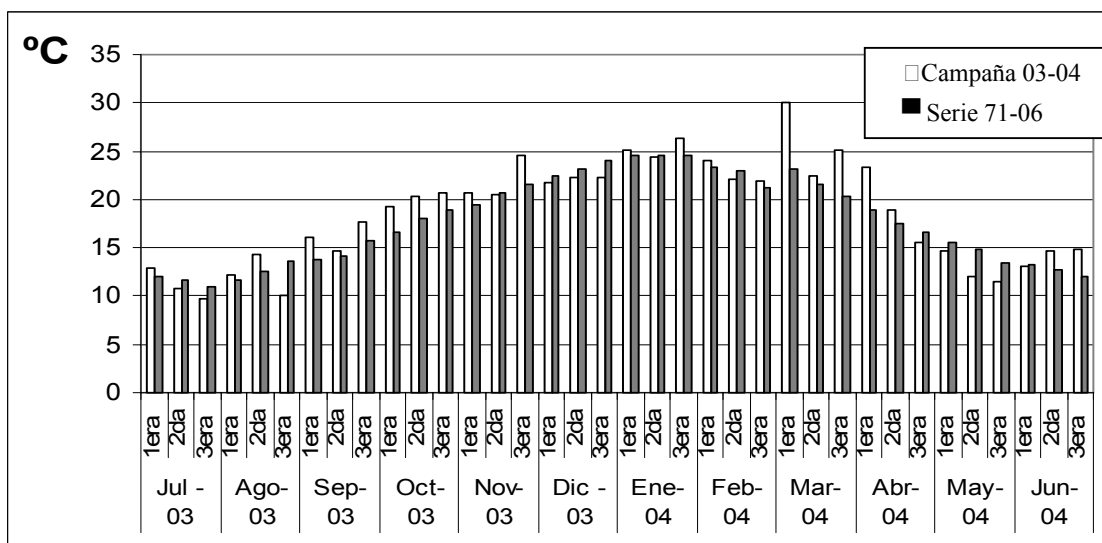


Figura 10: Valores decádicos de temperaturas medias de la campaña 03-04 y promedios históricos para la serie 71-06 expresado en grados Celsius. Valores medios entre las estaciones meteorológicas de INTA Marcos Juárez y Oliveros.

La radiación incidente fue más elevada, superando los promedios de la serie en las dos últimas período decádico de octubre y en los meses de Enero y Febrero (Fig. 11).

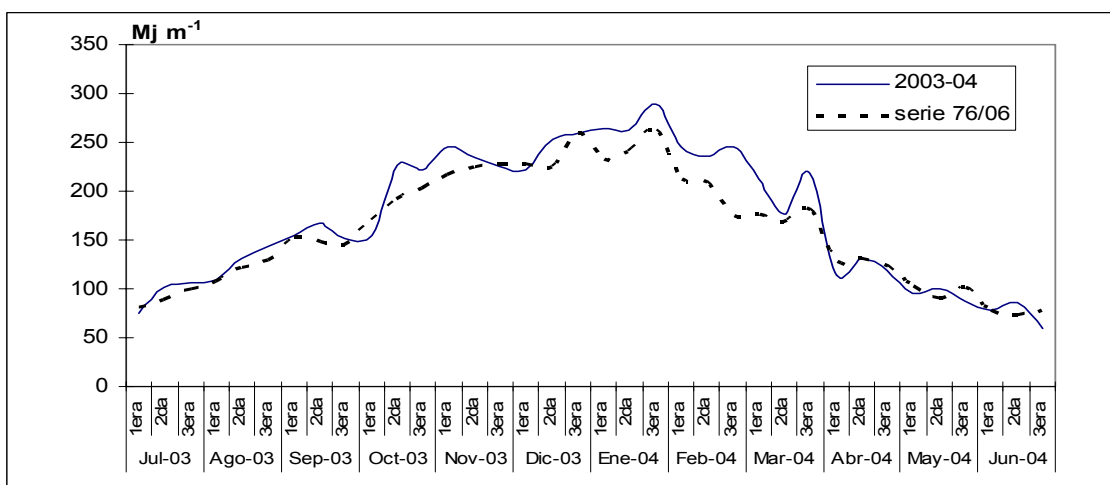


Figura 11: Valores decádicos de radiación solar incidente expresados en Mj m^{-2} de la campaña 03-04 y promedios históricos de la serie 76-06. Valores medios entre las estaciones meteorológicas de INTA Marcos Juárez y Oliveros.

A diferencia de la campaña anterior, este ciclo agrícola presentó una distribución de lluvias menos favorable para el crecimiento de los cultivos. El déficit se inició a partir del 2^{do} período decádico de diciembre hasta el mes de enero inclusive, si bien se registraron algunas precipitaciones a partir de febrero, éstas fueron menores a los valores de evapotranspiración real. Solamente se dieron lluvias de reposición del perfil a partir del 3^{er} período decádico del mes de marzo cuando el maíz se encontraba en madurez fisiológica (Fig.12).

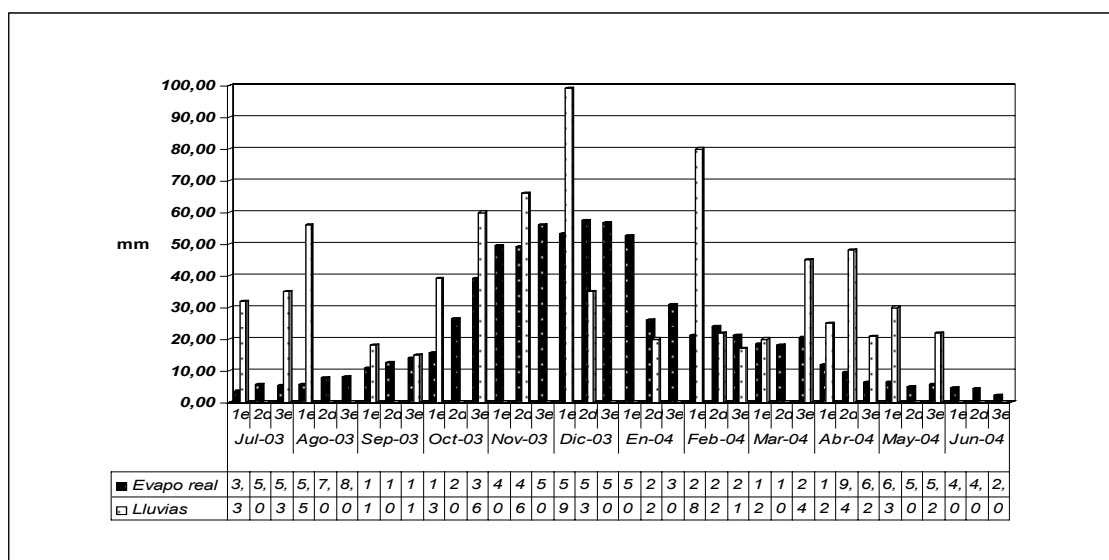


Figura 12: Evapotranspiración real y lluvias en el sitio experimental. Campaña 03-04, valores expresados en mm.

A la siembra del cultivo de maíz, el perfil en ambos tratamientos presentó valores superiores al 50 % del agua útil máxima hasta el metro de profundidad. El contenido de humedad fue mayor en el testigo observándose diferencias significativas a 45 y 135 cm de profundidad (Figura 14). En floración ambas curvas estuvieron por debajo del 50 % de capacidad de campo hasta 1,4 m incrementándose hasta el 100 % a los 2 m de profundidad, asociada a la influencia de la napa (Figura 13) las diferencias significativas en éste estado se presentaron a los 21, y 135 cm. A madurez fisiológica se observaron diferencias significativas desde los 21 cm hasta los 1,40 m de profundidad presentando el tratamiento RC valores

inferiores al 50 % de AUM. A partir de esta profundidad se observa un incremento en el contenido de agua del perfil hasta valores cercanos al 70 %.

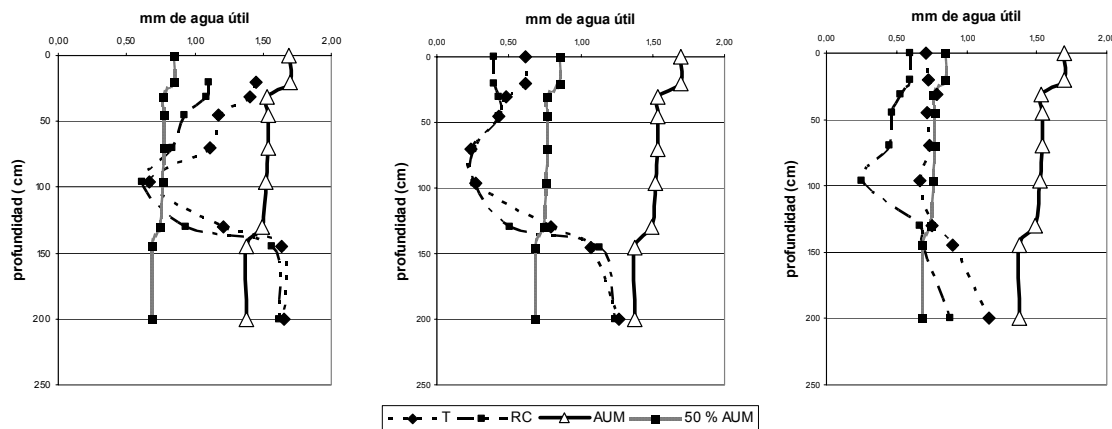


Figura 13: Agua en suelo expresada en mm de agua útil por cm de profundidad, de izquierda a derecha; a siembra, R1 y R6 de maíz en los tratamientos T (testigo) y RC (rodado convencional) de izquierda a derecha. AUM: agua útil máxima, profundidad en cm. Ensayo de compactación por tránsito.

3.2 Variables de Suelo:

3.2.1 *Estado Estructural: (EE)*

La determinación del perfil cultural se realizó en 3 momentos, en R3 y a la cosecha del cultivo de soja y en floración de maíz. En las determinaciones realizadas en R3 y a cosecha de soja, el tratamiento RC presentó un sector masivo Δ continuo desde los 3 a 25 cm de profundidad, se observaron raíces acodadas con deformaciones asociadas a la presencia de ésta impedancia; T presentó algunos sectores masivos asociados a huellas del tránsito hasta los 30 cm de profundidad, entre estos sectores se observaron estados estructurales favorables al crecimiento de raíces (SFT, SDT) (Figura 14). En el tratamiento RE se observó un sector masivo Δ a similar profundidad de gran desarrollo pero de menor continuidad respecto al RC interrumpidos por estados estructurales SDT. La proporción de pisos y de estados Δ en cada tratamiento en se expresan en la Tabla VIII.

A floración de maíz se observa que los sectores masivos persisten en los tratamientos RE y RC con un porcentaje de pisos y estados delta similar a los determinados en el cultivo de soja (Fig.15, Tabla IX).



Fotografías 3 y 4: Estados estructurales en los tratamientos RC (rodado convencional) izquierda y T (testigo) derecha. En rojo estados M Δ (masivos delta, sin porosidad visible), en amarillo estados SD Δ (terrones soldados sin porosidad visible).

Tabla VIII : Porcentaje de pisos y de estados delta determinados en base al perfil cultural en soja. Ensayo de compactación por tránsito.

	Tratamientos		
	T	RE	RC
% Pisos	45 a	78 b	93 c
% Estados delta	16 a	33 b	47 c

T: testigo, RE: rodado especial; RC: Rodado convencional. % pisos: % de la superficie del perfil afectada por estados masivos delta (en sentido horizontal); % delta porcentaje del perfil observado ocupado por estados delta.

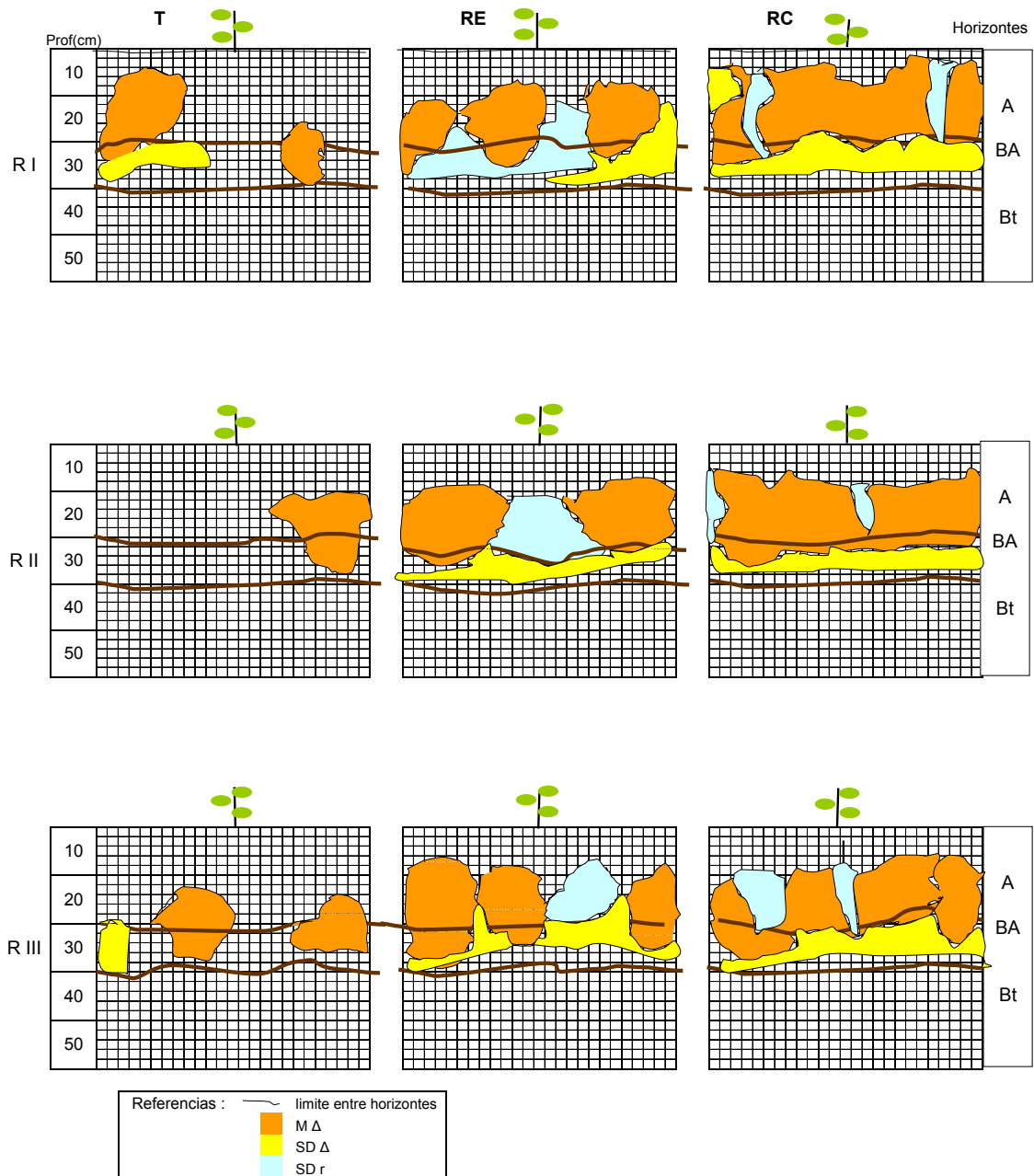


Figura 14: Cartas estructurales en Soja Tratamientos T(testigo), RE (rodado especial), y RC (rodado convencional) de izquierda a derecha, respectivamente. En Ensayo de compactación por tránsito.

Maíz

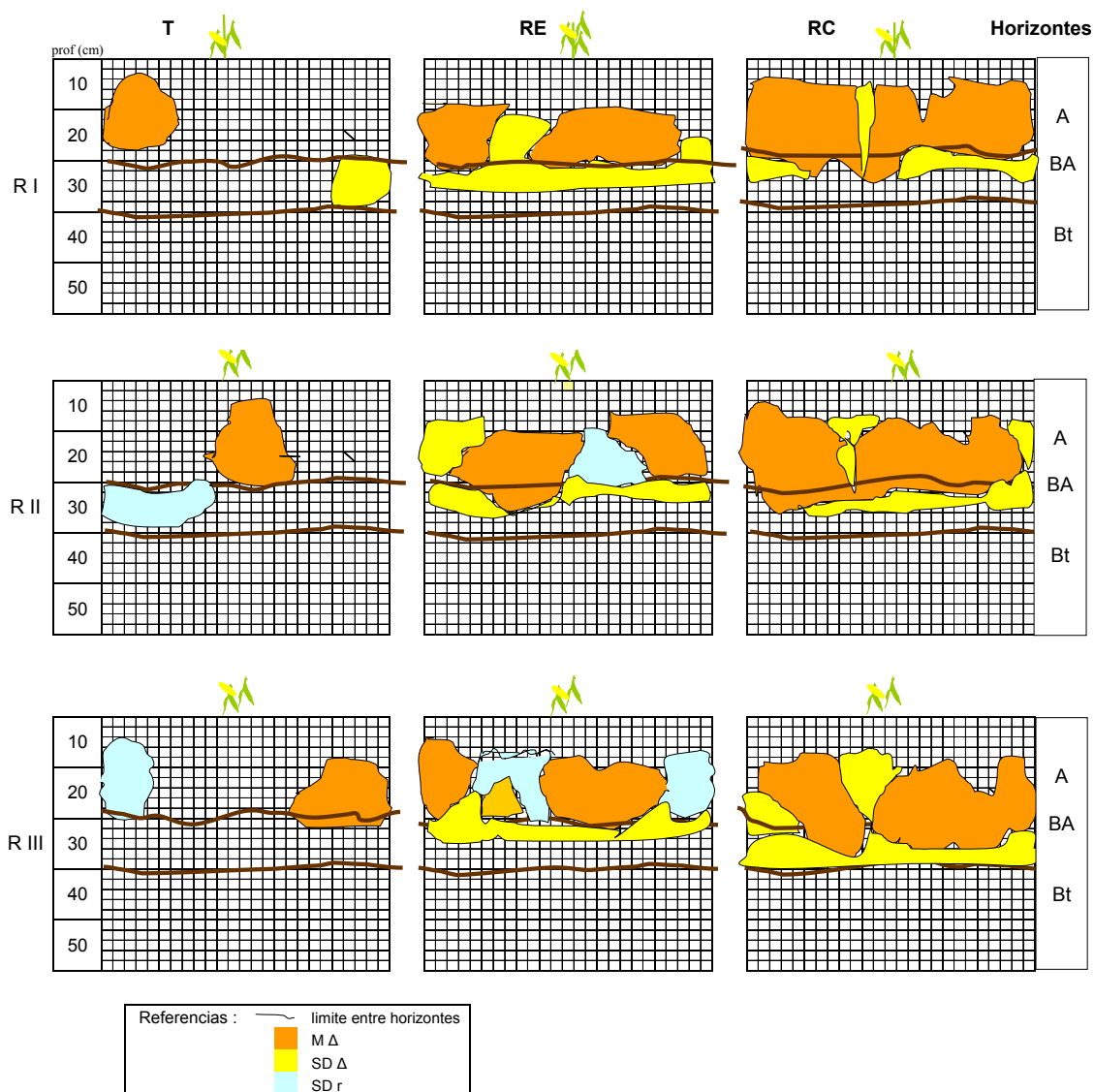


Figura 15: Cartas estructurales en Maíz Tratamientos T(testigo), RE (rodado especial), y RC (rodado convencional) de izquierda a derecha, respectivamente. Ensayo de compactación por tránsito.

Tabla IX: Porcentaje de pisos y de estados delta determinados en base al perfil cultural en maíz. Ensayo de compactación por tránsito.

	Tratamientos		
	T	RE	RC
% pisos	37 a	76 b	94 c
% estados delta	13 a	26 b	43 c

T: testigo, RE: rodado especial; RC: Rodado convencional. % pisos: % de la superficie del perfil afectada por estados masivos delta (en sentido horizontal); % delta porcentaje del perfil observado ocupado por estados delta.

3.2.2 Densidad Aparente máxima (DAP MAX)

En la Figura 16 se muestran las curvas características del test Proctor para los horizontes considerados. Se puede apreciar que tanto la humedad crítica como la densidad máxima fueron inferiores en el horizonte A; BA presentó valores mayores de densidad máxima e intermedios de humedad crítica mientras que B2t1 presentó los valores mas elevados de humedad crítica siendo la densidad máxima levemente inferior a BA. Si analizamos la pendiente de la curva ascendente del proctor observamos que ésta es mayor en BA que en los horizontes A y B2t1. La pendiente ascendente de la curva es indicativa de la susceptibilidad a la compactación del horizonte (Silva Rossi, 2004).

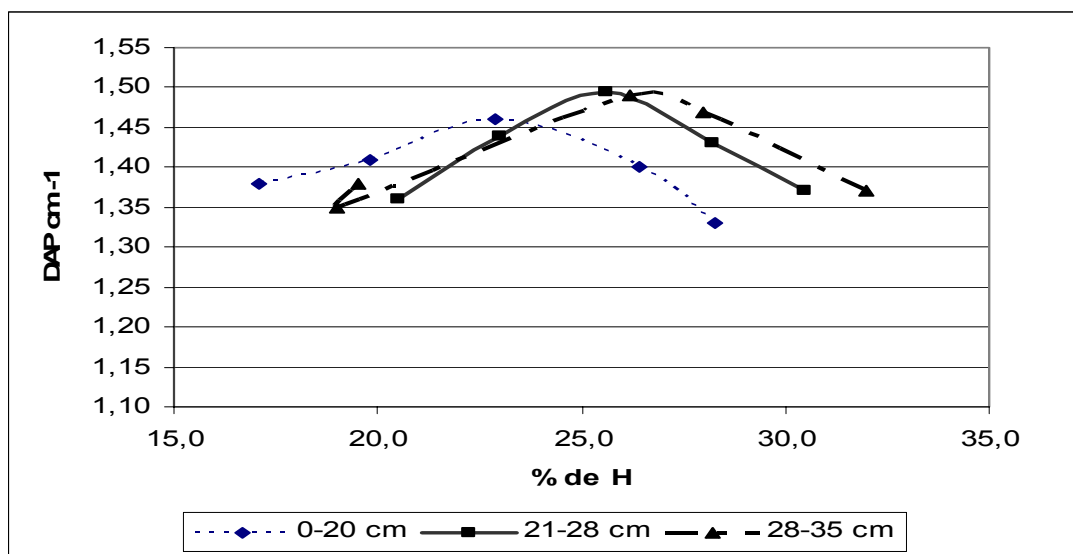


Figura 16: Variación de la densidad aparente del suelo (DAP) según el contenido hídrico a tres profundidades correspondientes al horizonte A(0-20 cm), BA(21-28 cm) y Bt1(28-35 cm) respectivamente usando el test Proctor.

3.2.3 Densidad Aparente (DAP)

El tratamiento testigo presentó menores valores de DAP en el perfil.

RC presentó valores superiores de DAP que el T desde la superficie, con diferencias significativas excepto en el estrato 14-21 cm y 28-35 cm. RE presentó valores inferiores al RC en superficie (0-7cm), pero no se diferenció en profundidad. El tratamiento RE presentó

valores significativamente superiores al testigo en los estratos 7-14 cm y 28-35 cm (Tabla X y Fig. 17).

Tabla X: Valores de Densidad Aparente en g cm^{-3} . Ensayo de compactación por tránsito.

Horizonte	Profundidad de muestreo(cm)	T	RE	RC
A	0-7	1,08 a	1,07 a	1,30 b
	7-14	1,28 a	1,38 b	1,42 b
	14-21	1,34 a	1,40a	1,41 a
BA	21-28	1,36 a	1,40 ab	1,41 b
Bt1	28-35	1,36 a	1,41 b	1,39 ab

Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05

T: testigo; RE: rodado especial; RC: rodado convencional

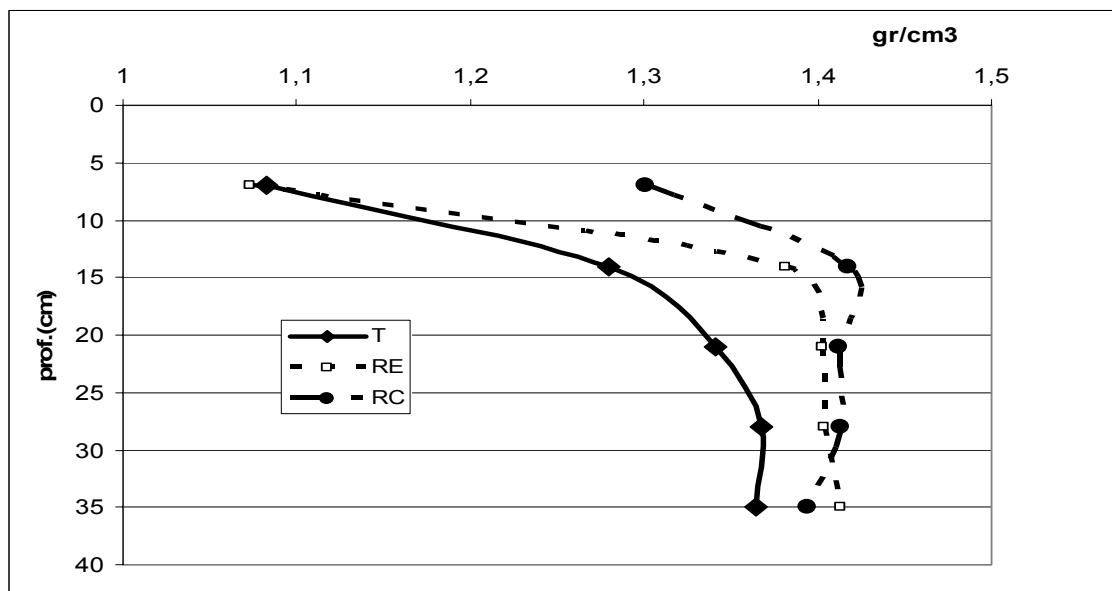


Figura 17: Perfiles de DAP en los distintos tratamientos. T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional); prof: profundidad en cm. Ensayo de compactación por tránsito.+

3.2.4 *Compactación relativa (CR)*

El tratamiento T que sólo tuvo el tránsito habitual de las operaciones de siembra, aplicación de agroquímicos y cosecha, presentó valores promedio de 84 % de CR en el horizonte A, de un 91,2 % en el BA y de un 91,6 % en el Bt1.

En RC se alcanzaron valores cercanos al 94 % en los horizontes superiores. Los valores observados en el horizonte superficial destacan un incremento de un 10 % de la CR para RC sobre el tratamiento T. RE presenta valores de CR levemente superiores al testigo en el estrato 0-7 cm y cercanos a RC entre los 7 y 35 cm (Tabla XI).

Tabla XI: Valores de Compactación relativa respecto a la máxima determinada por el test proctor en los distintos tratamientos para cada profundidad. (%) T: testigo; RE: rodado especial; RC: rodado convencional; HA horizonte A; BA- B21t; horizonte BA y B 21t. Ensayo de compactación por tránsito.

Horizonte	Profundidad de muestreo(cm)	T	RE	RC
A	0-7	74 a	73 a	89 b
	7-14	88 a	95 b	97 b
	14-21	92 a	96 a	97 a
BA	21-28	92 a	93 a	94 a
Bt1	28-35	92 a	95 a	93 a

Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05.

3.2.5 *Porosidad*

Para el cálculo de PT se determinó la densidad real, para el horizonte A fue de 2,45 g cm⁻³, y de 2,52 y 2,59 para los horizontes BA y Bt1 respectivamente. Estos valores son menores a 2,65 g cm⁻³ normalmente utilizado, debido a la presencia de fitolitos (materiales de baja densidad) que caracterizan a los Argiudoles de la Pampa húmeda (Pecorari, 1988) (Tabla XII).

Tabla XII: Valores de densidad textural, real e índice de poros textural para el horizonte A, BA y Bt1. Ensayo de compactación por tránsito

Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad textural (g cm ⁻³)	Densidad Real (g cm ⁻³)	Índice de porosidad textural (dr/dtex - 1)
A	0-20	1,38	2,45	0,78
BA	21-28	1,48	2,52	0,70
Bt1	28-35	1,50	2,59	0,72

RE y RC presentaron menores valores de porosidad total respecto a T con comportamiento similar entre sí a distintas profundidades (Tabla XIII). En la Figura 18 se presenta la variación de esta propiedad en profundidad para los tratamientos evaluados.

Tabla XIII: Valores de Porosidad total en los distintos tratamientos (%) para cada horizonte. Ensayo de compactación por tránsito.

Horizontes	Profundidad muestreo (cm)	T	RE	RC
A	0-7	55,8	56,2	46,9
	7-14	47,8	43,6	42,1
	14-21	45,3	42,8	42,3
BA	21-28	45,5	44,1	43,7
Bt1	28-35	45,6	43,7	44,4

T: testigo; RE: rodado especial; RC: rodado convencional.

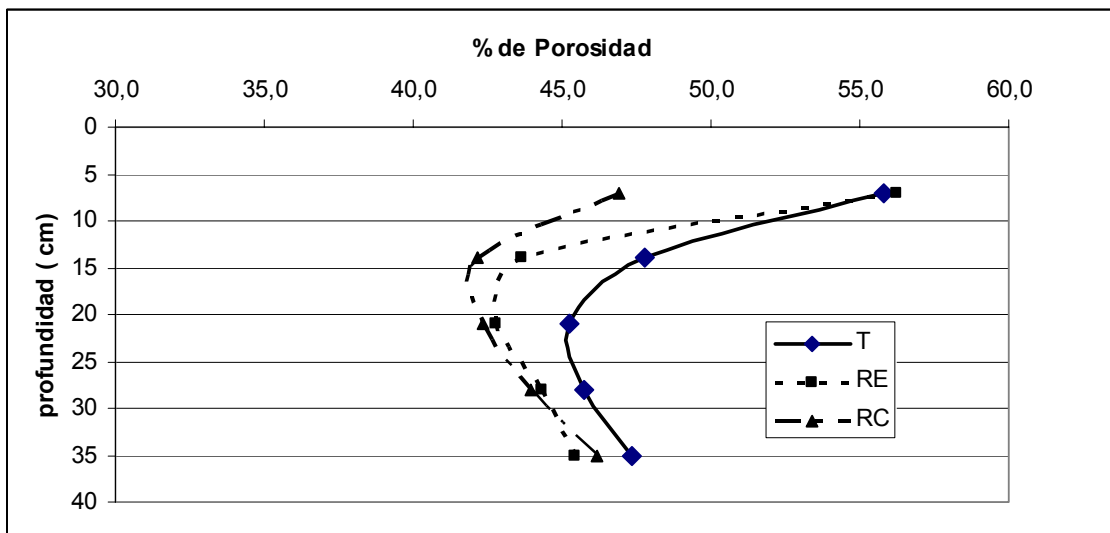


Figura 18: Perfiles de porosidad total en los diferentes tratamientos. Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial) y RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito.

En el estrato 0-7 cm T y RE no difieren estadísticamente entre sí, RC presenta un valor de porosidad estructural menor con diferencias significativas con ambos tratamientos. De 7 a 21 cm en cambio, la porosidad estructural en RE y RC se reduce a 0. En este último caso la pérdida total de porosidad estructural evidencia el efecto de una compactación severa (Tabla XIV).

Tabla XIV: Valores de Porosidad estructural en los distintos tratamientos.

Horizonte	Profundidad de muestreo (cm)	Porosidad Estructural (%)		
		T	RE	RC
A	0-7	12,1 a	12,5 a	3,2 b
	7-14	4,1 a	0 b	0 b
	14-21	1,6 a	0 b	0 b
BA	21-28	4,7 a	3,3 ab	2,9 b
Bt1	28-35	5,3 a	3,4 b	2,9 ab

Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %. Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial) y RC (rodado convencional).

3.2.6 Índice de Vacíos.

Determinando el índice de vacíos e, y por diferencia entre éste y el índice de poros texturales (Tabla XV) obtenemos el índice de poros estructural (IPE) (Tabla XVI). Se observa que éste último presenta valores de 0 entre los 7 y 28 cm indicando la pérdida total de porosidad estructural en los tratamientos RE y RC (Fig. 19).

Tabla XV: Índice de vacíos (e) en los tratamientos T(testigo), RE (Rodado especial) y RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito.

		Índice de Vacíos (e)		
Horizontes	Profundidad (cm)	T	RE	RC
A	0- 7	1,26 a	1,29 a	0,88 b
	7 – 14	0,92 a	0,77 b	0,73 b
	14 - 21	0,83 a	0,75 a	0,74 a
BA	21 - 28	0,78 a	0,74 b	0,73 b
Bt1	28 -- 35	0,89 a	0,83 b	0,85 ab

Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %.
Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial) y RC (rodado convencional).

Tabla XVI: Índice de poros estructurales (IPE) en los tratamientos T(testigo), RE (Rodado especial) y RC (rodado convencional)

		Índice de poros estructural (IPE)		
Horizontes	Profundidad (cm)	T	RE	RC
A	0- 7	0,49 a	0,51 a	0,11 b
	7 – 14	0,14 a	0 b	0 b
	14 - 21	0 a	0 a	0 a
BA	21 - 28	0 a	0 a	0 a
Bt1	28 -- 35	0,17 a	0,11 b	0,13 ab

Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %.
Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial) y RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito.

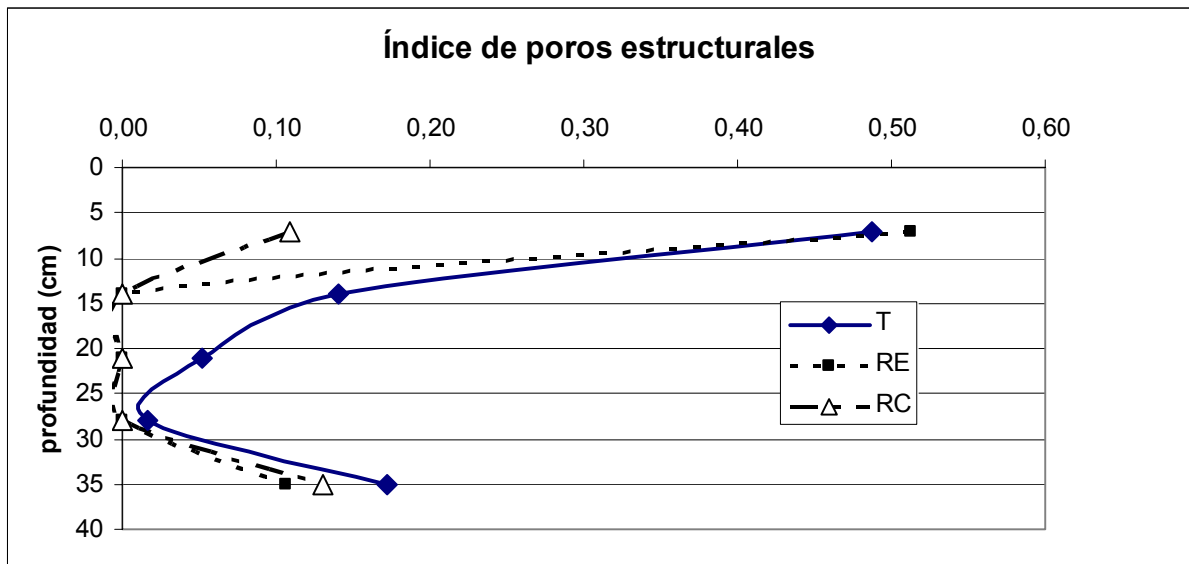


Figura 19: Índice de poros estructurales en cada tratamiento a diferentes profundidades. T testigo, RE: Rodados especiales; RC: Rodados convencionales. Ensayo de compactación por tránsito.

3.2.7 Resistencia a la penetración- índice de cono

Se observa un incremento en los valores de resistencia a la penetración en profundidad excepto entre los 18 y 28 cm. Desde la superficie los valores medidos son de 0,5 MPa incrementándose a valores de 2 MPa a los 10 cm de profundidad; a partir de los 30 cm los valores continúan aumentando superando los 2,5 MPa a los 50 cm de profundidad en todos los tratamientos (Fig. 20) (Tabla XVII).

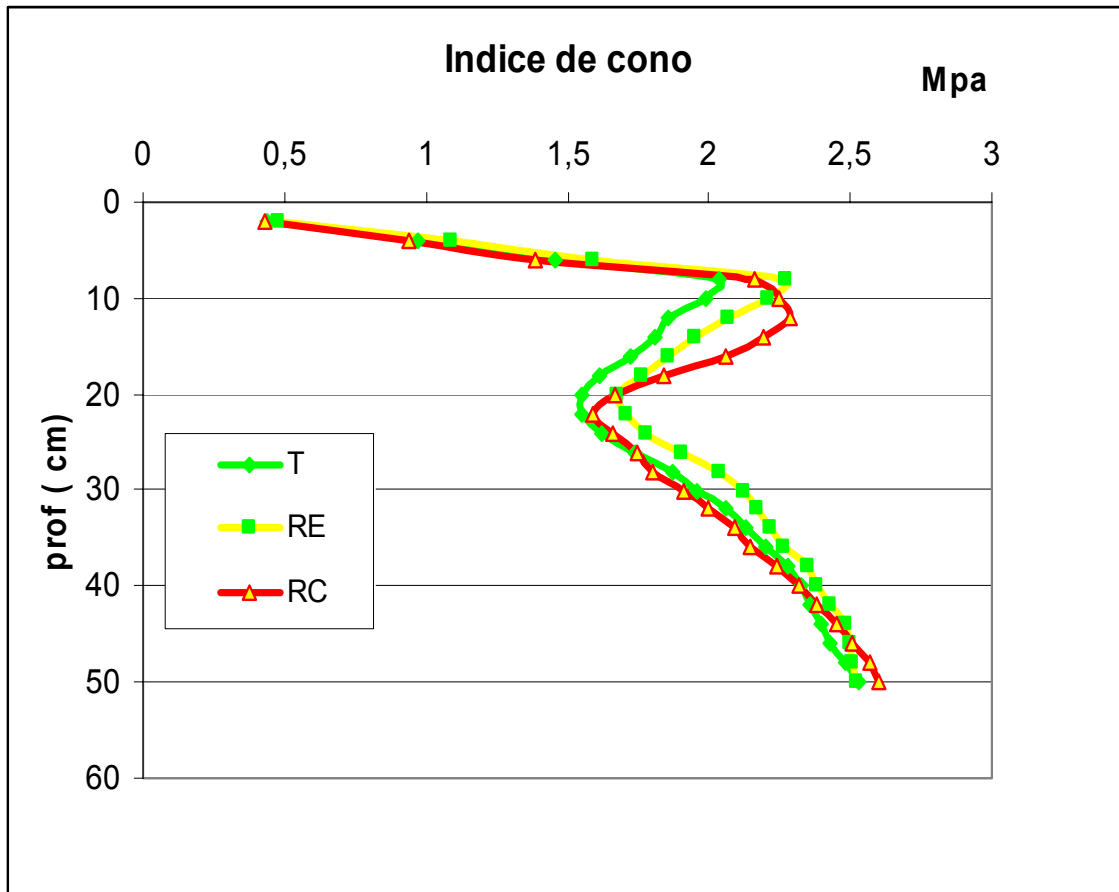


Figura 20: Valores promedio de la resistencia a la penetración-Índice de cono (MPa) en cada tratamiento a diferentes profundidades. T testigo, RE: Rodados especiales; RC: Rodados convencionales. Ensayo de compactación por tránsito.

Entre tratamientos se manifiestan diferencias significativas entre los 10 y 32 cm de profundidad, en este estrato el tratamiento RC presenta los valores promedios más elevados.

Dentro de este estrato, de 12 a 18 cm el tratamiento RC presentó valores de IC significativamente superiores al testigo ($p < 0,05$), no presentando diferencias significativas en los estratos inferiores con este. El tratamiento RE en cambio presentó un incremento del IC en los estratos de mayor profundidad, de 22 a 32 cm siendo éstos significativamente superiores a los tratamientos RC y T ($p < 0,05$) (Tabla XVII).

Tabla XVII: Índices de cono y porcentaje de humedad de suelos a diferentes profundidades en los tratamientos T, RE y RC. Ensayo de compactación por tránsito.

Prof	Penetrómetro MPa					
	T		RE		RC	
	IC	% H	IC	%H	IC	%H
2	0,44 a	22,5 a	0,48 a	22 a	0,43 a	21,7 a
4	0,97 a		1,09 a		0,94 a	
6	1,46 a		1,59 a		1,39 a	
8	2,04 a		2,27 a		2,16 a	
10	1,99 a		2,21 a		2,25 a	
12	1,86 a	23,8 a	2,07 ab	24 a	2,29 b	24,4 a
14	1,81 a		1,95 a		2,19 b	
16	1,72 a		1,86 ab		2,06 b	
18	1,61 a		1,76 ab		1,84 b	
20	1,55 a		1,68 a		1,67 a	
22	1,55 a	22,4 a	1,71 b	21 a	1,59 ab	21,4 a
24	1,62 a		1,78 b		1,66 ab	
26	1,74 a		1,90 b		1,75 a	
28	1,87 a		2,04 b		1,80 a	
30	1,96 a		2,12 b		1,91 a	
32	2,06 ab	23 a	2,17 b	23,7 a	2,00 a	22,9 a
34	2,13 a		2,22 a		2,09 a	
36	2,20 a		2,26 a		2,15 a	
38	2,28 a		2,35 a		2,24 a	
40	2,33 a		2,38 a		2,32 a	
42	2,36 a	24,5 a	2,43 a	24 a	2,38 a	23,8 a
44	2,40 a		2,48 a		2,45 a	
46	2,43 a		2,50 a		2,51 a	
48	2,48 a		2,51 a		2,57 a	
50	2,53 a		2,52 a		2,60 a	

Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05
Referencias: T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional); IC (índice de cono),
% H (% de humedad). Las celdas sombreadas destacan valores con diferencias significativas
Con el testigo.

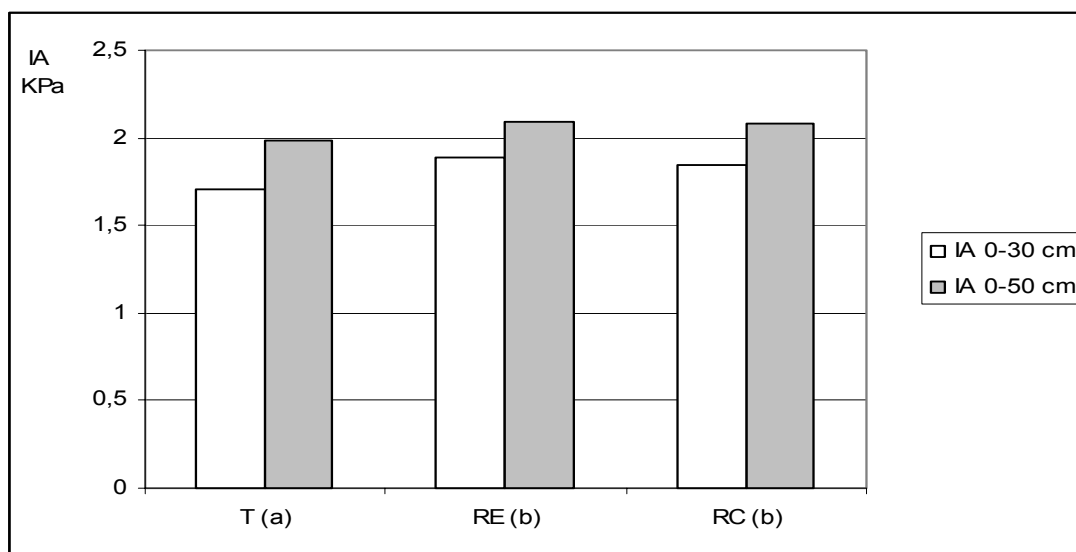
3.2.8 *Índice de Anisotropía:*

Para su cálculo se consideraron los estratos 0-30 cm y 0-50 cm.

Para el estrato 0-30 cm el tratamiento T presentó el valor más bajo de IA (1,71 MPa) con diferencias significativas sobre RE y RC (1,89 MPa y 1,85 MPa) ($p < 0,05$).

Para el estrato 0-50 cm el tratamiento T presentó un IA de 1,98 MPa con diferencias significativas sobre RE, RC (2,09 MPa y 2,08 MPa) ($p < 0,05$).

Los tratamientos RE y RC no presentaron diferencias significativas entre sí en ambos estratos (Fig. 21).



Letras diferentes entre paréntesis indican diferencias significativas en el test de Duncan para cada profundidad al 0,05%.

Figura 21: Índice de Anisotropía en los distintos tratamientos a dos profundidades; 0-30 y 0-50 cm. T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito.

3.2.9 Infiltración básica (IB)

Los tratamientos RC y RE presentaron valores de infiltración básica un 44 % y 43 % inferiores ($p < 0,05$) a T (Fig. 22). No se observaron diferencias significativas entre RE y RC (Tabla XVIII).

Tabla XVIII: Valores de infiltración básica en cm s^{-1} en los diferentes tratamientos determinados con permeámetros de discos. Ensayo de compactación por tránsito

Tratamientos	Promedio	Significancia
T	5,7E-04	a
RE	3,1E-04	b

RC	3,2E-04	b
----	---------	---

Letras diferentes en la columna indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %.
 Tratamientos T: testigo, RE: rodado especial y RC: rodado convencional.

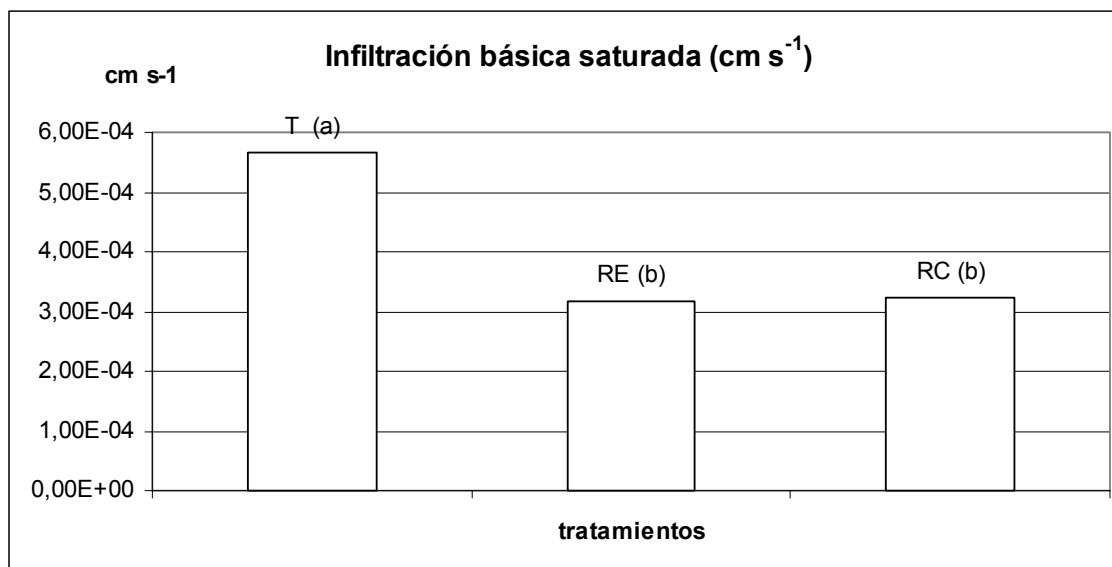


Figura 22: Infiltración básica saturada en los distintos tratamientos. T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional). Ensayo compactación por tránsito.
 Letras diferentes entre paréntesis indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05%

La infiltración presentó valores elevados en el tratamiento T en los primeros 15 minutos, mientras que en los tratamientos RE y RC se mantuvo con valores bajos desde el inicio (Fig. 23).

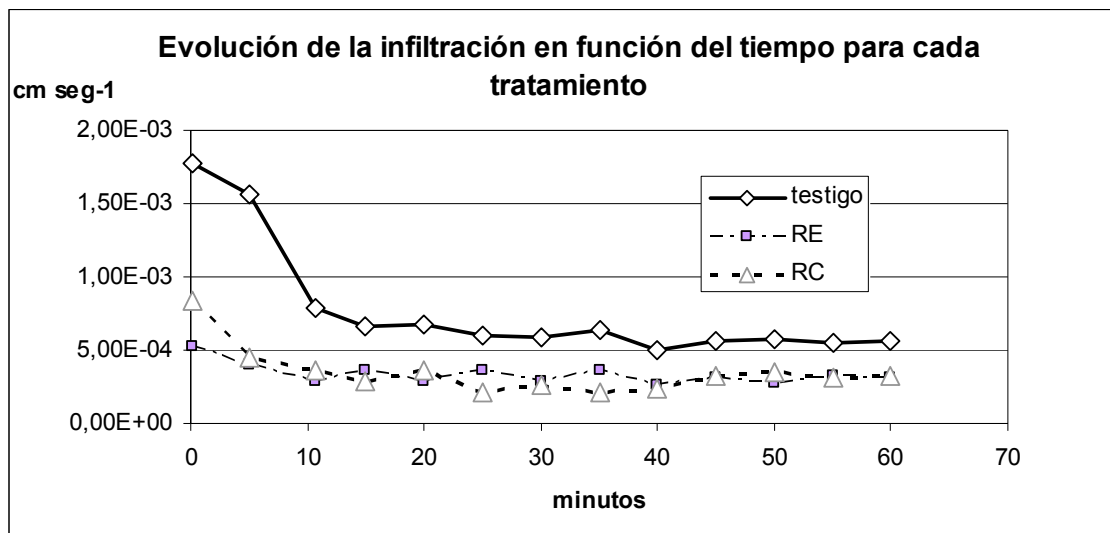


Figura 23: Evolución de la infiltración en función del tiempo. Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial) y RC (rodado convencional).

3.2.10 Cobertura de suelo (COB)

La cobertura inicial del lote fue de un 100 % con abundante presencia de residuos de cultivos anteriores. A emergencia del cultivo de soja, el testigo conservó un valor de 98 % mientras que RE y RC presentaron una reducción de la misma como consecuencia del fraccionamiento de los residuos y su posterior desplazamiento ocasionados por el movimiento del agua en superficie. Se observaron diferencias significativas entre el tratamiento T, RE y RC. Este último presentó valores menores de cobertura y mayor variación en la distribución de la misma (Tabla XIX).

Tabla XIX: Cobertura de suelo a la siembra expresado en % de suelo cubierto

Tratamientos	Promedio	CV %
T	98 a	3,37
RE	77 b	9,71
RC	72 b	14,19

Letras diferentes en la columna indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %
Tratamientos: T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional).

3.3 Variables de cultivo

3.3.1 *Soja*

3.3.1.1 *Densidad de plantas.*

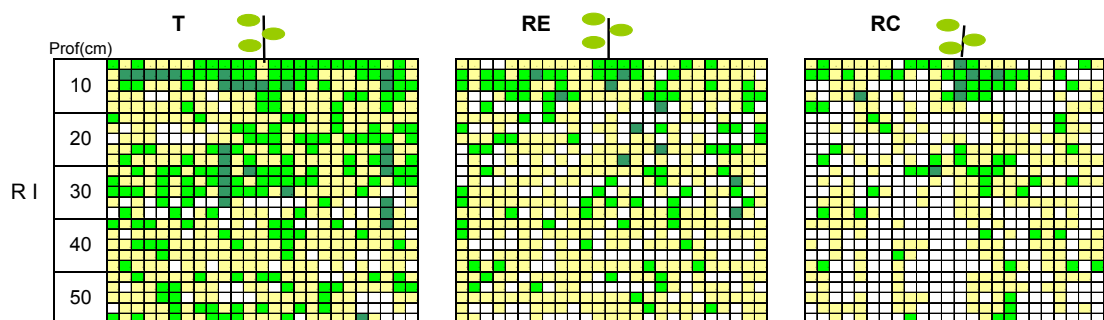
La densidad de plantas fue similar entre tratamientos, no existiendo diferencias significativas entre los mismos, tanto en implantación como en cosecha. La densidad de plantas a emergencia fue de 298.000 plantas ha⁻¹. A cosecha fue de 254.000 pl/ha con un cv de 10,8 % (Tabla XX). Esta densidad es considerada óptima para las características del cultivar y fecha de siembra en el área (Baigorri y Martini, 2007).

Tabla XX: Densidad de plantas de soja a emergencia y cosecha en los tratamientos T (testigo), RE (rodado especial) y RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito.

Plantas ha ⁻¹	T	RE	RC	Promedio
emergencia	297000 a	312000 a	285000 a	298.000
cosecha	249000 a	268800 a	244400 a	254000

3.3.1.2 *Características del enraizamiento.*

T presentó una mayor exploración radical que los tratamientos afectados por el tránsito. Dentro de éstos el tratamiento RC fue el más afectado observándose una disminución marcada en el crecimiento y exploración de raíces. Se observa que el efecto de la densificación de los horizontes superiores afecta la exploración de raíces en todo el perfil (Figura 24).



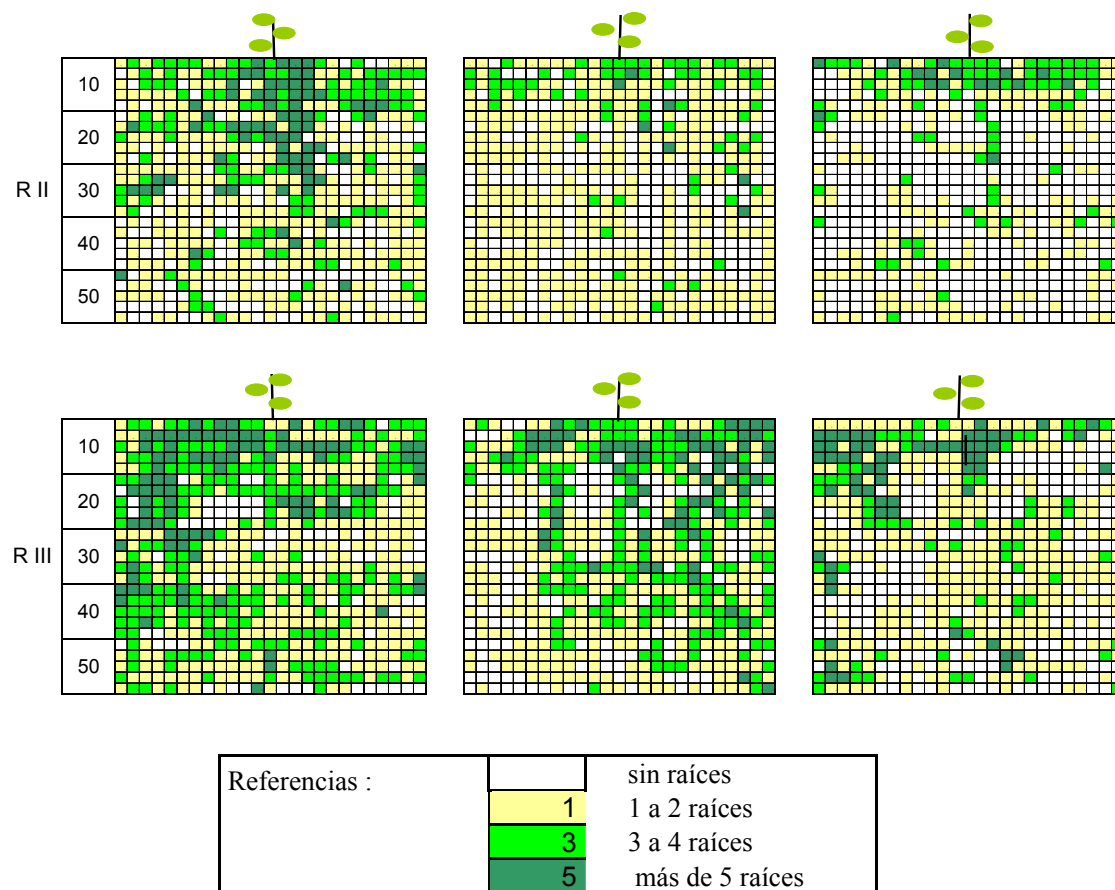


Figura 24: Mapa de raíces de soja Tratamientos T (testigo), RE (rodado especial), y RC (rodado convencional) de izquierda a derecha, respectivamente. Ensayo de compactación por tránsito.

Sumando los valores de raíces en cada fila y promediando los mismos se elaboraron perfiles de abundancia de raíces para cada tratamiento en cada profundidad (Fig. 25).

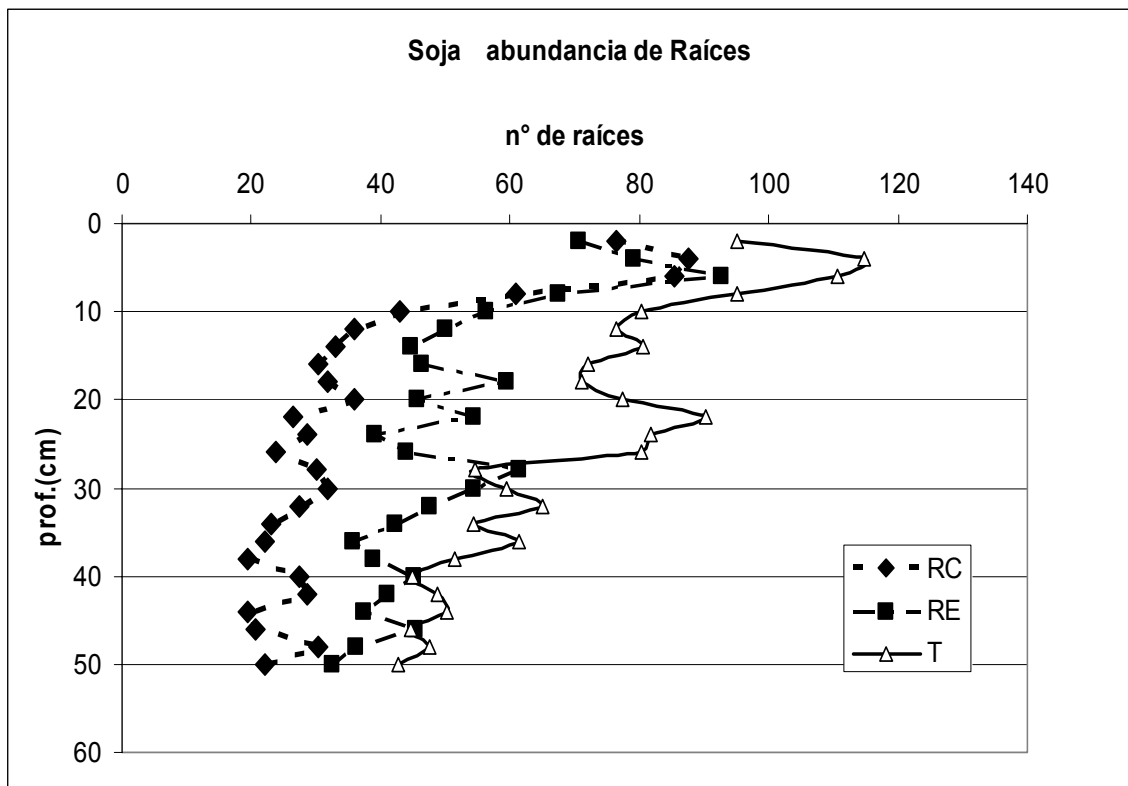


Figura 25: Perfiles de abundancia de raíces en los diferentes tratamientos. T (testigo), RE (rodado especial) RC (rodado convencional).

Se observaron diferencias significativas entre tratamientos entre los 10 y 50 cm. En casi todas las profundidades hubo mayor cantidad de raíces en el tratamiento T que en RE y RC. RC presentó una reducción del número de raíces del 50 % sobre el testigo mientras que el tratamiento RE la reducción fue de un 26 % en los 50 cm de profundidad.

A partir de los 12 cm de profundidad el tratamiento RC presenta diferencias significativas con el T. El tratamiento RE en cambio, solo presenta diferencias significativas a los 16 y 24 cm de profundidad, presentando en este estrato menor cantidad de raíces que T (Tabla XXI).

Tabla XXI: Abundancia de raíces de soja en los tratamientos T (testigo) RE (rodado especial) y RC (rodado convencional) para cada profundidad. Ensayo de Compactación por tránsito.

Prof	Abundancia de raíces de soja		
	T	RE	RC
2	95 a	71 a	76 a

4	115 a	79 a	88 a
6	111 a	93 a	85 a
8	95 a	67 a	61 a
10	80 a	56 a	43 a
12	76 a	50 ab	36 b
14	81 a	45 ab	33 b
16	72 a	46 b	30 b
18	71 a	59 ab	32 b
20	77 a	46 ab	36 b
22	90 a	54 ab	26 b
24	82 a	39 b	29 b
26	80 a	44 ab	24 b
28	55 a	61 a	30 a
30	59 a	54 a	32 a
32	65 a	47 ab	27 b
34	54 a	42 ab	23 b
36	61 a	36 ab	22 b
38	51 a	39 ab	19 b
40	45 a	45 a	27a
42	49 a	41 a	29 a
44	50 a	37 ab	19 b
46	45 ab	56 a	21 b
48	48 a	36 a	30 a
50	43 a	49 a	22 a

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %. Las celdas sombreadas destacan valores con diferencias significativas con el testigo. Tratamientos. T (testigo), RE (rodado especial) RC (rodado convencional)

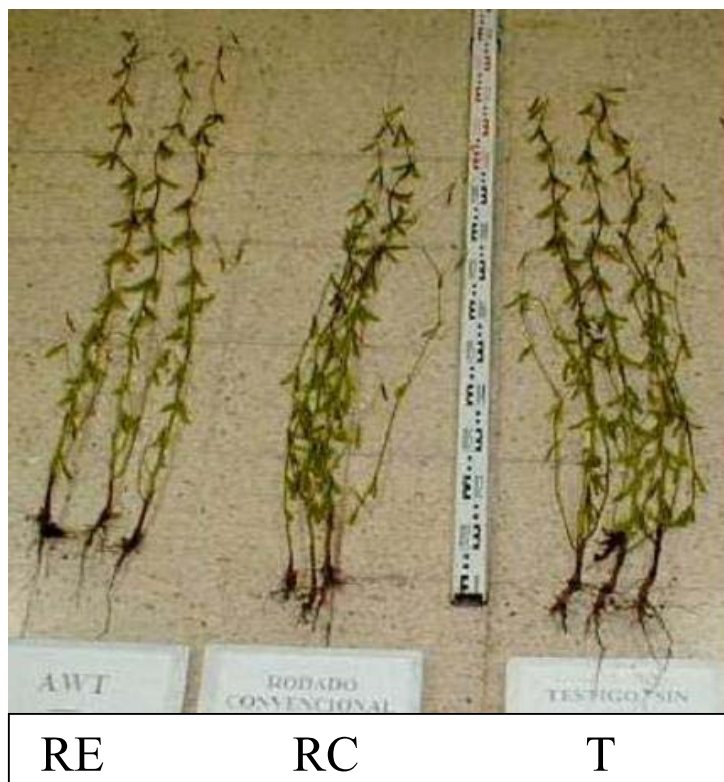
3.3.1.3 *Altura de Plantas en soja (cm)*

El tratamiento testigo presentó una mayor altura de plantas con diferencias significativas respecto a RE y RC (Tabla XXII) (Fotografía 5)

Tabla XXII: Altura de plantas en los diferentes tratamientos (cm)

Tratamientos	Promedio	Significancia
T	124	a
RE	117,1	b
RC	115	b

Letras diferentes en la columna indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %. Tratamientos: T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional).



Fotografía 5: Altura de plantas de soja en R8 en los tratamientos RE (rodado especial); RC (rodado convencional) y T (testigo) de izquierda a derecha. Ensayo de compactación por tránsito

3.3.1.4 Rendimientos en soja (kg/ha)

El rendimiento del cultivo fue en promedio de 4.261 kg ha^{-1} con un CV de 7,8 %, sin diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla XXIII). Esto se debió, probablemente, a la buena disponibilidad hídrica que tuvo el cultivo. En la fotografía 5 se observa el desarrollo de las plantas en los tratamientos evaluados.

Tabla XXIII: Rendimientos de soja en kg/ha en los tratamientos T, RE y RC

Tratamientos	Promedio (kg/ha)	Significancia
T	4.232	a
RE	4.261	a
RC	4.291	a

Letras diferentes en la columna indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %
Tratamientos: T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional)

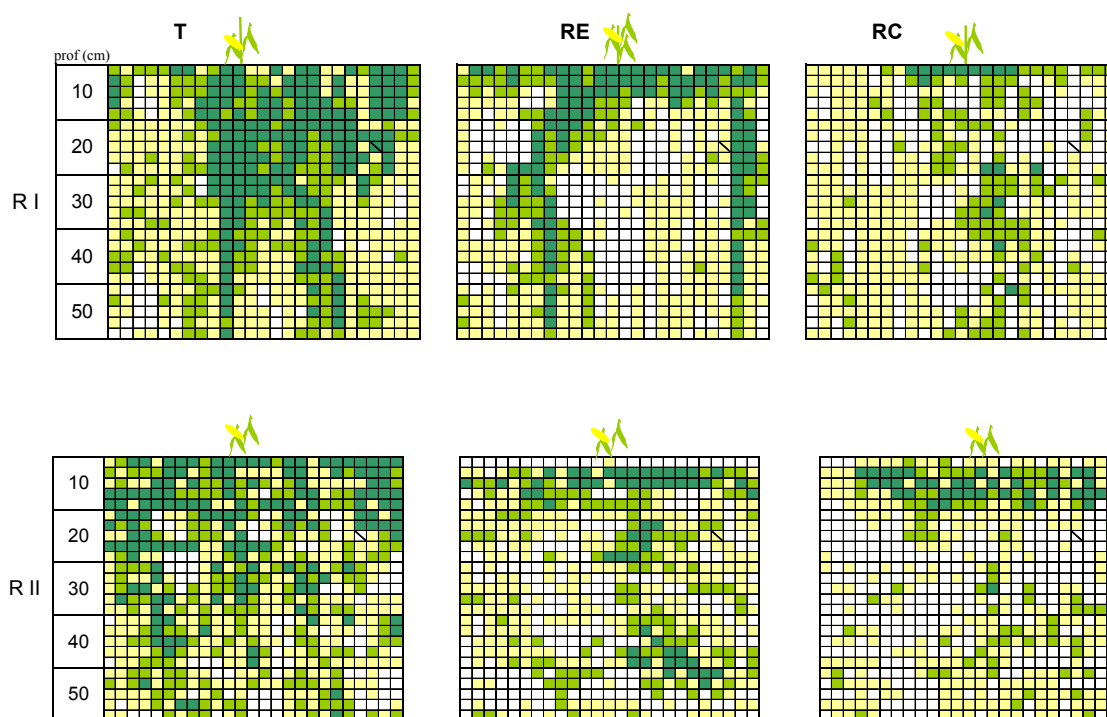
3.3.2 Maíz:

3.3.2.1 *Densidad de plantas*

La densidad de plantas a cosecha fue de 79.504 pl ha⁻¹ con un coeficiente de variación de 7,2 %. No hubo diferencias significativas en la densidad de plantas entre tratamientos. Los valores de densidad de plantas alcanzados son considerados óptimos para el híbrido utilizado en ese ambiente (Cirilo, 2003).

3.3.2.2 *Características del enraizamiento .*

Analizando la abundancia de raíces se encontraron diferencias significativas a partir de los 10 cm de profundidad. En el tratamiento RC presentó la menor cantidad de raíces con un marcado efecto por debajo de ésta profundidad, mientras que RE mostró valores intermedios (Fig. 26 y 27) (Tabla XXIV).



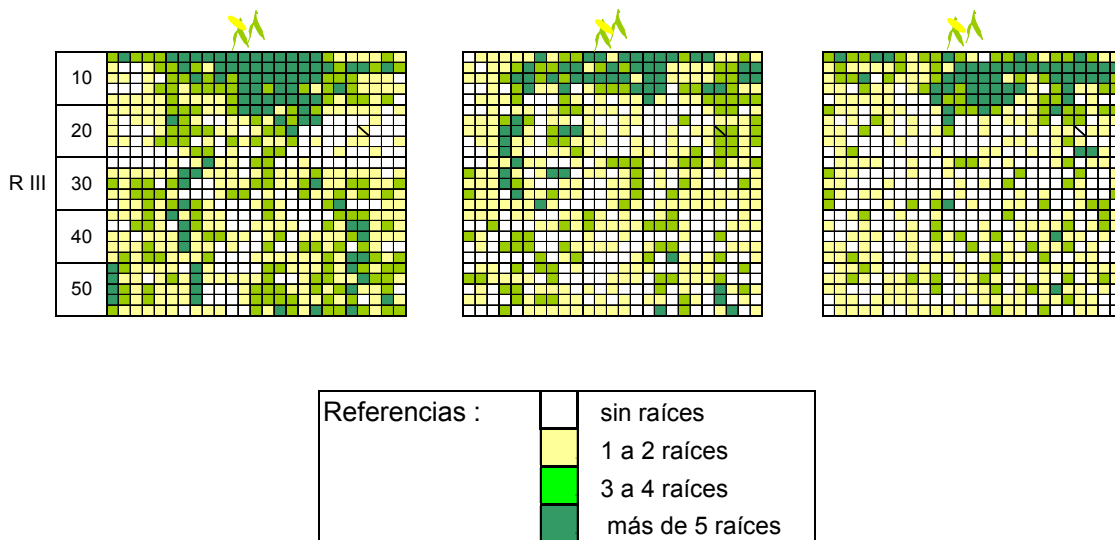


Figura 26: Mapa de raíces de Maíz.

Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial) y RC (rodado convencional) de izquierda a derecha, respectivamente. Ensayo de compactación por tránsito.

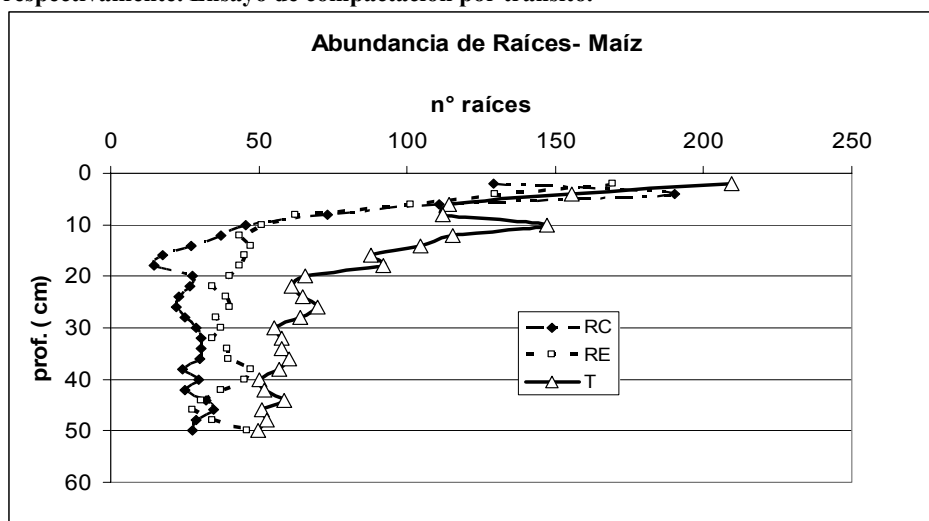


Figura 27: Abundancia de raíces de maíz en los diferentes tratamientos.

T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional).

Tabla XXIV: Abundancia de raíces de maíz en cada tratamiento a cada profundidad.

prof	Abundancia Raíces Maíz		
	T	RE	RC
2	0		
4	155 a	162 a	161 a
6	114 a	136 a	182 a
8	112 a	66 a	97 a
10	147 a	53 a	59 b
12	115 a	44 b	40 b
14	105 a	42 b	26 b
16	88 a	54 ab	22 b

18	92 a	38 ab	14 b
20	66 a	45 a	25 a
22	61 a	39 a	28 a
24	65 a	33 ab	20 b
26	70 a	40 b	24 b
28	64 a	39 b	23 b
30	55 a	34 ab	30 b
32	58 a	35 ab	26 b
34	58 a	39 b	30 b
36	60 a	33 b	34 b
38	57 a	44 ab	24 b
40	50 a	50 a	26 b
42	52 a	40 ab	29 b
44	59 a	40 b	30 b
46	51 a	26 b	32 b
48	53 a	30 b	31 b
50	50 a	46 a	29 b

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %
Las celdas sombreadas destacan valores con diferencias significativas con el testigo. T (testigo);
RE (rodado especial); RC (rodado convencional.)

3.3.2.3 *Altura de plantas a floración:*

El tratamiento T presentó plantas de mayor altura que RC sin diferencias significativas

(Fig. 28) (Tabla XXV).

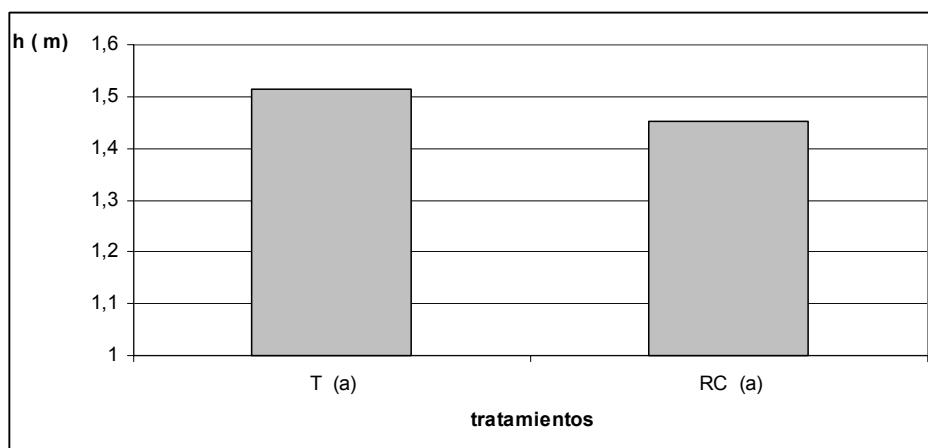


Figura 28: Altura de plantas en maíz en los tratamientos. T y RC
T (testigo) y RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito

Tabla XXV: Altura de plantas en maíz en los tratamientos. T y RC. T (testigo) y RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito

	R1	R2	R3	Promedio
T	1,4725	1,575	1,4935	1,51 (a)
RC	1,37	1,52	1,4675	1,45 (a)

3.3.2.4 *Materia seca*

Se presentan los resultados de MS de maíz obtenidos, en dos momentos, grano lechoso (R3) y madurez fisiológica (R6), (Tabla XXVI).

No se observaron diferencias significativas en los valores de materia seca en los dos estados fenológicos analizados (R3 y R6)

Tabla XXVI: Materia Seca de maíz en kg ha^{-1} en los tratamientos T y RC

Tratamientos	T	RC
R3	9314 a	9.359 a
R6	24.158 a	24.381 a

Letras diferentes en la columna indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 % T (testigo 100 kg ha^{-1} de N); RC (rodado convencional)

3.3.2.5 *Rendimiento de maíz:*

Los rendimientos alcanzados en todos los tratamientos fueron elevados; con una media de 13.825 kg/ha y un cv. de 13,9 %. No hubo diferencias significativas de los tratamientos de rodados al nivel de nitrógeno analizado (Tabla XXVII) (Fig. 29).

Tabla XXVII: Rendimiento promedio de maíz (en kg ha^{-1}) según tratamientos (expresado al 14,5% de humedad).

Tratamientos		
T	RE	RC
14.101 a	13.601 a	13.773 a

Letras diferentes indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 %. Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito

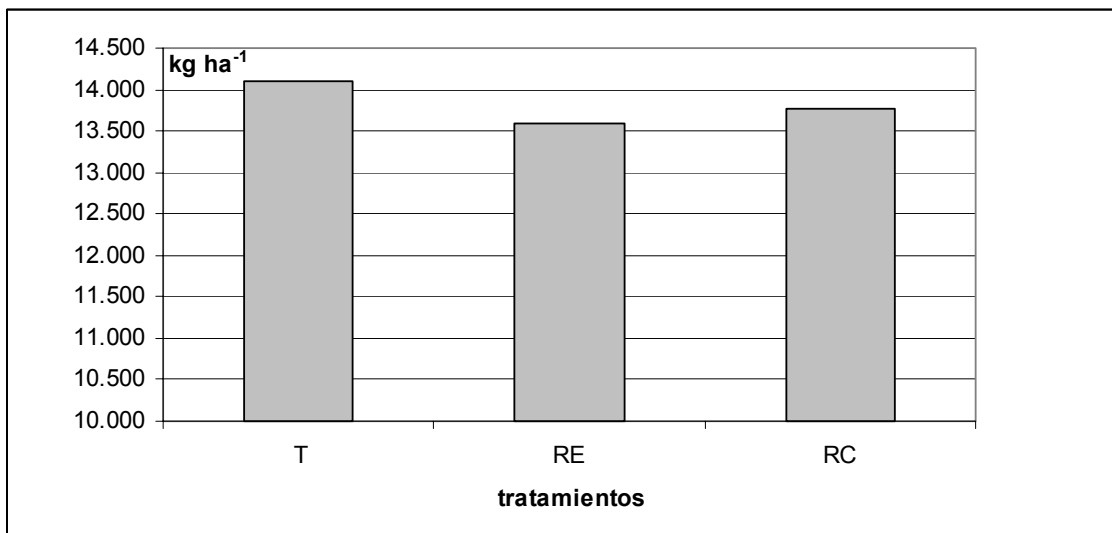


Figura 29: Rendimientos de maíz en kg ha⁻¹ para cada tratamiento expresados al 14,5 % de humedad. Tratamientos T (testigo); RE (rodado especial); RC (rodado convencional). Ensayo de compactación por tránsito.

Relaciones entre variables

3.3.3 *Análisis de Componentes principales*

Del análisis de ACP se observa que el tratamiento T se separó en forma opuesta al tratamiento RC. El primero está asociado positivamente con todas las variables de cultivo, o sea tanto las raíces de soja y maíz como la altura de plantas fueron mayores en el tratamiento testigo. También se ve una asociación positiva entre este tratamiento y las variables de suelo IB y Cob. Todas las variables mencionadas anteriormente se observan a su vez relacionadas negativamente con el tratamiento RC. Éste se observa muy asociado a las variables que hacen referencia a los efectos de la compactación: % pisos, % delta, IC entre los 10 y 20 cm, estrato donde el Índice de cono presentó diferencias significativas con el testigo y el tratamiento RE. Por otro lado el tratamiento RE presenta una situación intermedia respecto a los dos anteriores, mostrando una fuerte relación con la resistencia a la penetración entre 0-10 cm y 20-40 cm de profundidad, estratos donde este tratamiento mostró valores más elevados que T y RC. En forma coincidente RE se encuentra asociado con los valores de DAP a los 28-35 cm dado que ésta variable, en este estrato presentó diferencias significativas con el T pero no con el tratamiento RC. El IA también muestra una mayor asociación con RE observando en este tratamiento diferencias significativas de dicho parámetro con T en las profundidades evaluadas.

Analizando la relación entre variables podemos observar que la variable DAP, IC, IA, % de pisos y % de estados Δ son las que presentan un mayor grado de asociación inversa con IB y la presencia de raíces de soja y maíz. Los ejes del gráfico explican el $80,8\% + 19,2\% = 100\%$ de la variancia total (Fig. 30).

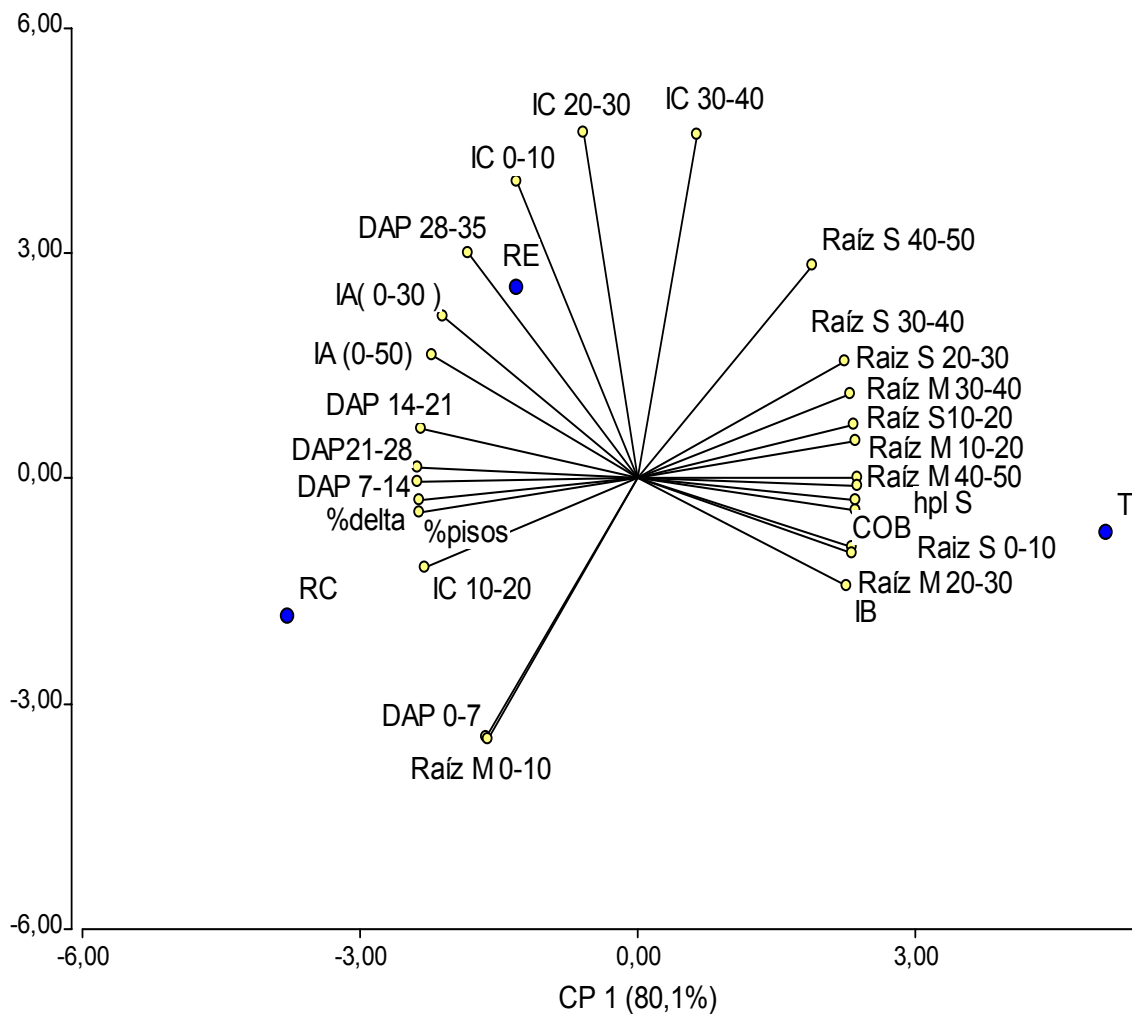


Figura 30: Gráfico Biplot del análisis de componentes principales de variables de cultivo y suelo en los tratamientos de rodados.

Tratamientos : T: testigo; RE: rodado especial; RC: rodado convencional; DAP: densidad aparente; IC: índice de cono; Raíz M: raíces maíz; Raíz S: raíces soja; Cob: cobertura; hpl S: altura plantas; IB: infiltración básica; % estados Δ ; números indican estratos en profundidad expresados en cm.

3.4 Relaciones entre las variables físicas:

Se realizó un análisis de regresión entre los datos de densidad aparente y resistencia a la penetración; se observa que los valores de penetrometría explican un 51 % a los valores densidad aparente (Fig. 31).

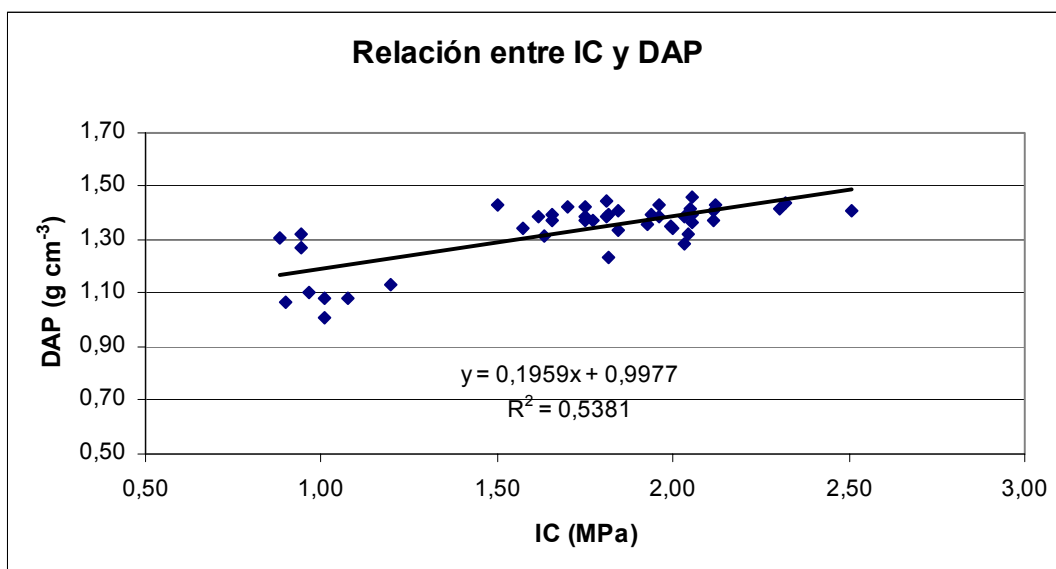


Figura 31: Relación entre penetrometría y densidad aparente en el estrato 0-35 cm de profundidad. DAP: densidad aparente en g cm⁻³ RP: resistencia a penetración en KPa.

3.4.1.1 *Relaciones entre las variables físicas de suelo y raíces de Soja y Maíz*

En la Tabla XXVIII se presentan los resultados obtenidos de DAP y penetrometría en cada tratamiento y la abundancia de raíces de soja y maíz. Con color verde se destacan los datos que no presentaron diferencias estadísticas, con rojos aquellos que fueron estadísticamente diferentes y con amarillo aquellos que tuvieron un comportamiento intermedio no difiriendo estadísticamente de los otros tratamientos. Se observa que el efecto del tránsito en el tratamiento RC presentó un efecto más superficial que en RE. Considerando la presencia de raíces para ambos cultivos se observa una menor cantidad en el perfil en el tratamiento RC que RE.

Tabla XXVIII: Variables físicas de suelo y abundancia de raíces de soja y maíz a cada profundidad

prof	DAP (g cm ³)			IC (Kpa)			abundancia raíces soja (n° raíces)			abundancia raíces maíz (n° raíces)		
	T	RE	RC	T	RE	RC	T	RE	RC	T	RE	RC
2				0,44 a	0,48 a	0,43 a	95 a	71 a	76 a	134	141	150
4	1,03 a	1,07 a	1,3 b	0,97 a	1,09 a	0,94 a	115 a	79 a	88 a	155 a	162 a	161 a
6				1,46 a	1,59 a	1,39 a	111 a	93 a	85 a	114 a	136 a	182 a
8				2,04 a	2,31 a	2,16 a	95 a	67 a	61 a	112 a	66 a	97 a
10				1,99 a	2,21 a	2,25 a	80 a	56 a	43 a	147 a	53 a	59 b
12	1,28 a	1,38 b	1,42 b	1,86 a	2,07 ab	2,29 b	76 a	50 ab	36 b	115 a	44 b	40 b
14				1,81 a	1,95 a	2,19 b	81 a	45 ab	33 b	105 a	42 b	28 b
16				1,72 a	1,86 ab	2,06 b	72 a	46 b	30 b	88 a	54 ab	22 b
18				1,61 a	1,76 ab	1,84 b	71 a	59 ab	32 b	92 a	38 ab	14 b
20	1,34 a	1,4 a	1,41 a	1,55 a	1,68 a	1,67 a	77 a	46 ab	36 b	66 a	45 a	25 a
22				1,55 a	1,71 b	1,59 ab	90 a	54 ab	26 b	61 a	39 a	28 a
24				1,62 a	1,78 b	1,66 ab	82 a	39 b	29 b	65 a	33 ab	20 b
26				1,74 a	1,90 b	1,75 a	80 a	44 ab	24 b	70 a	40 b	24 b
28	1,37 a	1,4 ab	1,41 b	1,87 a	2,04 b	1,80 a	55 a	61 a	30 a	64 a	39 b	23 b
30				1,96 a	2,12 b	1,91 a	59 a	54 a	32 a	55 a	34 ab	30 b
32				2,06 ab	2,17 b	2,00 a	65 a	47 ab	27 b	58 a	35 ab	26 b
34				2,13 a	2,22 a	2,09 a	54 a	42 ab	23 b	58 a	39 b	30 b
36	1,36 a	1,41 b	1,39 ab	2,20 a	2,26 a	2,15 a	61 a	36 ab	22 b	60 a	33 b	34 b
38				2,28 a	2,35 a	2,24 a	51 a	39 ab	19 b	57 a	44 ab	24 b
40				2,33 a	2,38 a	2,32 a	45 a	45 a	27 a	50 a	50 a	26 b
42				2,36 a	2,43 a	2,38 a	49 a	41 a	29 a	52 a	40 ab	29 b
44				2,40 a	2,48 a	2,45 a	50 a	37 ab	19 b	59 a	40 b	30 b
46				2,43 a	2,50 a	2,51 a	45 ab	56 a	21 b	51 a	26 b	32 b
48				2,48 a	2,51 a	2,57 a	48 a	36 a	30 a	53 a	30 b	31 b
50				2,53 a	2,52 a	2,60 a	43 a	49 a	22 a	50 a	46 a	29 b

Letras diferentes en la fila para cada tratamiento en cada determinación indican diferencias significativas en el test de Duncan al 0,05 % Con color verde se destacan los datos que no presentaron diferencias estadísticas para cada variable en cada profundidad, con rojos aquellos que fueron estadísticamente diferentes y con amarillo aquellos que tuvieron un comportamiento intermedio no difiriendo estadísticamente de los otros tratamientos.

Se evaluaron regresiones entre las variables físicas y abundancia de raíces en soja y maíz, utilizando los registros obtenidos en todos los tratamientos.

Para el cultivo de soja la DAP explicó un 46 % la presencia de raíces en los 35 cm superiores mientras que para maíz dicha variable explicó un 60 % (Fig. 32 y 34).

El IC explicó un 54 % las presencia de raíces de soja y un 52 % de las raíces de maíz para 0-50 cm. La ecuación de ajuste en ésta última fue cuadrática mientras que en la primera fue lineal (Fig. .33 y 35).

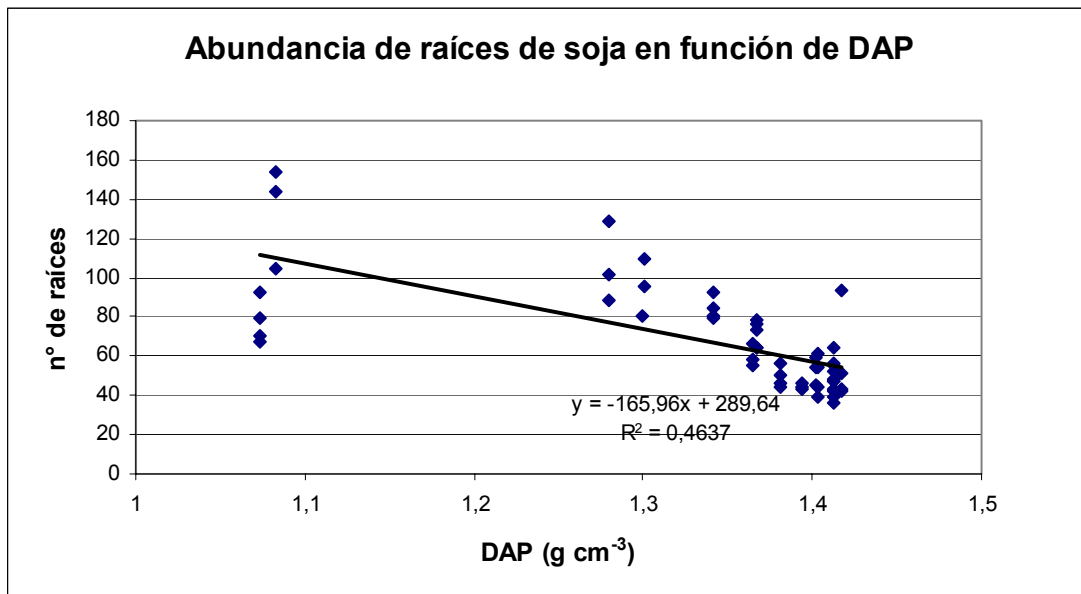


Figura 32: Variación del número de raíces en función de la densidad aparente (DAP) del suelo en el estrato 0-35 cm en el cultivo de soja.

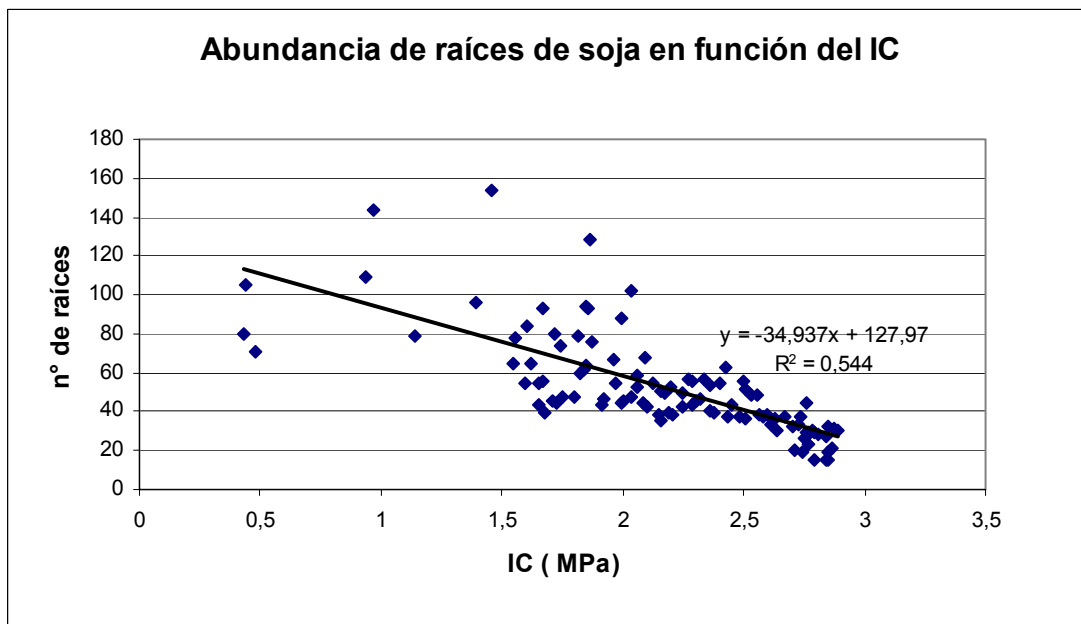


Figura 33: Variación del número de raíces en función del índice de cono (IC) para el estrato 0-50 cm en el cultivo de soja.

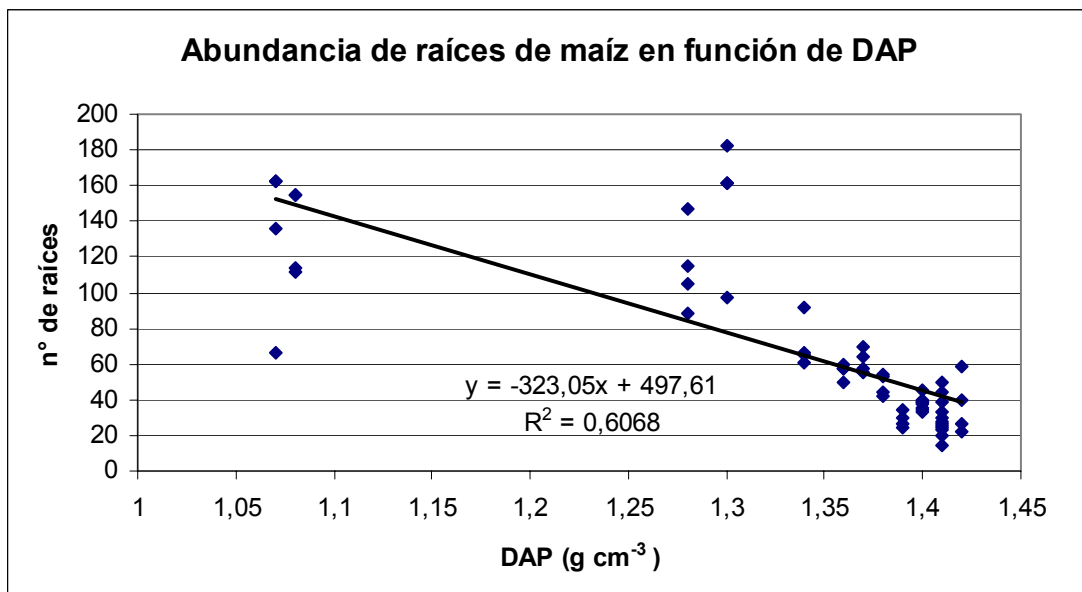


Figura 34: Variación del número de raíces de maíz en función de la densidad aparente (DAP) del suelo en el estrato 0-35 cm en el cultivo de maíz.

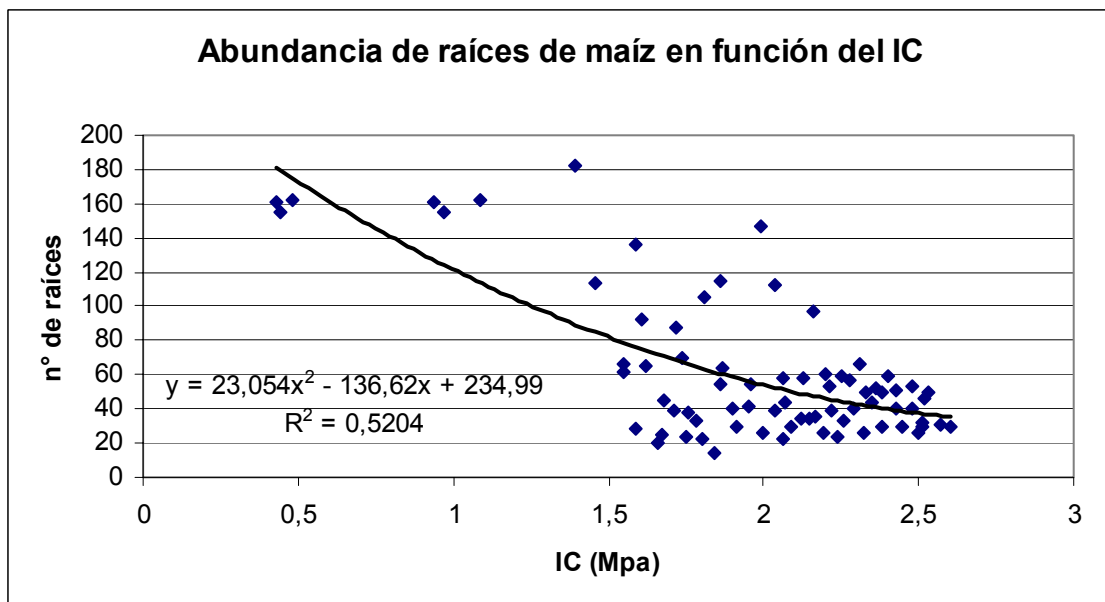


Figura 35: Variación del número de raíces en función del Índice de cono (IC) en el estrato 0-50 cm en el cultivo de maíz.

CAPITULO N° 4

DISCUSIÓN

En base a las observaciones realizadas con la metodología del perfil cultural (Gautronneau y Manichom, 1987) se destaca que el tratamiento testigo presentó sectores masivos aislados asociados al tránsito normal de maquinarias, situación similar a perfiles observados bajo siembra directa continua (De Battista *et al.*, 1994; Gerster *et al.*, 2002), sin embargo, en los tratamientos RE y RC se alcanzó un mayor porcentaje de estados masivos respecto al T. El uso de rodados especiales redujo la presencia de bloques sin porosidad estructural respecto al RC, pero el efecto negativo del tránsito se evidenció en ambos tratamientos. Estas observaciones son coincidentes con trabajos anteriores realizados por Tardieu y Manichom (1987); De Battista *et al.*, (1994); Cerana *et al.* (2004) y Gerster y Bacigaluppo (2005) donde se observó un notable incremento de estados masivos y de baja porosidad estructural en situaciones afectadas por el tránsito. Estos cambios físicos en el perfil se corroboran además con incrementos en los valores de densidad aparente, de resistencia a la penetración y con la pérdida de la porosidad estructural y cobertura de rastrojos. Este estado de mayor degradación en los tratamientos RE y RC generó un mayor índice de anisotropía, redujo la conductividad hidráulica saturada y generó patrones diferentes de desarrollo radical.

En las cartas estructurales realizadas en el cultivo de maíz, se observa que la densificación generada en RE y RC persiste al 2do año. Esta observación es coincidente con otros trabajos realizados por Gaultney *et al.*, (1982); Gerster y Bacigaluppo, (2002) y Botta *et al.* (2007) donde se destaca la permanencia de los sectores densificados provocados por el

tránsito en húmedo, generando incluso efectos acumulativos cuando el tránsito en húmedo es reiterado durante varias campañas.

Es probable que la historia del lote de agricultura continua sea la causa de la alta densidad aparente en T con valores similares a los mencionados por Steinbach y Álvarez (2006) para planteos de siembra directa en suelos de similar textura y en concordancia con Taboada y Micucci (2004) y Dragui *et al.*, (2005). Además, los valores de densidades relativas observadas en los tratamientos RC y RE fueron inferiores a los máximos encontrados por Steinbach y Álvarez (2006) en la Región y semejantes a los observados por Gerster y Bacigaluppo (2005) en situaciones de alta compactación, en suelos de características similares.

En los tratamientos RE y RC con 2 pasadas de equipo se alcanzaron valores entre 90 y 94 % de la compactación máxima; valores levemente superiores a los observados por Faíta (2007) y más elevados que los observados por Botta *et al.* (2005) quienes encontraron registros del 80 % de la compactación máximas con las primeras pasadas. Carter (1990) y Ferreras *et al.* (2001) destacan que cuando la compactación relativa supera el 85 % se produce una reducción importante de los macroporos afectando el normal movimiento de fluidos en el suelo. En éste mismo sentido considerando la porosidad estructural, se observa que para el horizonte A ésta variable alcanza valores de 3,9 % y de 0,1 % para los tratamientos RE y RC, mientras que T presenta un valor de 6. Respecto al funcionamiento hídrico del perfil observamos que IB mostró una reducción significativa en los tratamientos afectados por el tránsito respecto al testigo en coincidencia con lo observado por Silva Rossi (2004) en el área de Venado Tuerto (Sta. Fe).

El incremento de los valores de densidad aparente hasta los 35 cm de profundidad es coincidente con los observado por Claverie *et al.* (2000), Taboada *et al.* (2004); Machado *et al.* (2005) y Streck *et al.* (2004) quienes analizaron el efecto del tránsito de maquinaria sobre el suelo.

Dado que al determinar penetrometría, no se observaron diferencias significativas entre los contenidos de humedad en los diferentes tratamientos, las variaciones encontradas entre los valores de RP medidos son comparables entre sí y atribuibles a los diferentes tratamientos evaluados (Draguí, 2000; Jorajuría, 2004). Analizando el IC, dentro del estrato de 10 a 32 cm, los tratamientos RE y RC presentaron un efecto diferente; RC presenta las mayores diferencias en los valores de resistencia respecto al testigo entre los 11 y 18 cm; mientras que en RE los valores más elevados se encuentran entre los 22 y 32 cm de profundidad, asociadas a las diferentes presiones debidas a los distintos neumáticos utilizados. En RE las presiones fueron de 113 y 352 KPa para el eje trasero del tractor y la monovolva respectivamente, mientras que en RC fueron de 195 y 422 kPa. En coincidencia a lo observado en este trabajo, Botta (2005), observó que el uso de rodados de mayor superficie de apoyo generó un impacto menor en la resistencia a la penetración en los estratos superiores transmitiendo este efecto a mayor profundidad. La densificación superficial está asociada a la presión ejercida, mientras que a nivel sub-superficial depende más del peso total del equipo (Voorhess *et al.*, 1986; Hakansson and Reeder, 1994; Jorajuría, 2004).

Las determinaciones de resistencia a la penetración permitieron detectar diferencias en estratos más delgados que la densidad aparente en coincidencia con lo observado por Taboada, *et al* (2004), Jorajuría (2004) y Zerpa (2007).

Se observaron diferencias significativas en el IA entre T y los tratamientos RE y RC, presentando T un menor valor en las dos profundidades evaluadas. Este índice no mostró

diferencias significativas entre RE y RC, si bien se observan entre éstos tratamientos patrones de crecimiento radical diferentes. Los valores de IA determinados para estos estratos son similares a los determinados por Faíta (2007) en Argiudoles típicos en siembra directa.

La pérdida de cobertura por efectos del tránsito contribuye a una mayor evaporación (Sinclair *et al.*, 2006), y a una mayor susceptibilidad a la degradación por tránsito futuro ya que la cobertura genera una mayor resistencia a la deformación favoreciendo la de transitabilidad en suelos con contenido hídrico cercano a capacidad de campo (Draguí, *et al.* 2005). Sin embargo, si bien existen diferencias significativas entre T, RE y RC, los valores de cobertura medidos en todos los tratamientos son considerados adecuados para planteos de siembra directa continua (Marelli, 1998 y Michelena *et al.*, 1989). En el tratamiento RC se observó una mayor variabilidad en la cobertura asociado a la pérdida del anclaje de la misma provocada por el trozado del rastrojo debido al tránsito, mientras que el tratamiento RE presentó un comportamiento entre los tratamientos T y RC.

El estado estructural generado por el tránsito en los tratamientos RE y RC afectó el desarrollo de las raíces en ambos cultivos. Estudios anteriores indican que en los suelos compactos el crecimiento de raíces es afectado, ya que las mismas requieren un mayor gasto energético para obtener el mismo crecimiento que en sectores no compactos, además la escasa porosidad afectó a los niveles de oxígeno disponibles para la raíz dependiendo del contenido hídrico (Taboada y Micucci 2004).

En RC el aumento de la densificación puesta de manifiesto por un incremento en los valores del IC en el estrato 10 a 32 cm redujo la presencia de raíces y condicionó la exploración de horizontes inferiores provocando un efecto de sombreado en coincidencia con lo encontrado por Tardieu y Manichon (1987) y Taboada *et al.* (2004). Este efecto se explica por una parte, porque solo unas pocas raíces atraviesan los sectores densificados del perfil y

por otra, por la escasa porosidad estructural y la orientación esencialmente vertical de la porosidad inter-agregados del horizonte Bt.

Los valores límites de resistencia a la penetración para el crecimiento de raíces de 2 MPa citado por Taboada y Micucci (2004) se presentan en todos los tratamientos a partir de los 35 cm de profundidad, sector vinculado al horizonte Bt. Según observaciones de Stengel (1990), si bien el horizonte Bt presenta menor porosidad que los horizontes superiores, las raíces encuentran por desecamiento mayores vías de penetración que en el horizonte BA. La presencia de raíces en estos horizontes está asociada a las típicas fisuras verticales, que constituyen áreas de menor resistencia tanto para la infiltración del agua como para el crecimiento de raíces, que si bien profundizan el horizonte, realizan una exploración limitada de éste. En el cultivo de soja, T presentó una mayor cantidad de raíces que RC y RE. El tratamiento RC presentó valores de abundancia de raíces de un 80 % respecto al T en los primeros centímetros. En este estrato se observó una mayor presencia de raíces en RC que en RE en forma coincidente con lo destacado por Tardieu y Manichon (1987) y Taboada *et al.* (2004), quienes citan que cuando existen sectores compactos las raíces tienden a concentrarse en los horizontes superficiales. A partir de los 20 cm de profundidad el sistema radical del cultivo de soja en el tratamiento RE presentó una mayor exploración del perfil que el tratamiento RC. Si observamos los valores de IC de éstos tratamientos vemos que el tratamiento RE presenta valores de IC superiores a RC en este estrato. Es decir, que aún con mayores valores de RP, existen más raíces que en RC, este efecto pareciera estar asociado al efecto sombra que generan las compactaciones superficiales, las que al ser atravesadas por ocas raíces limitan la exploración profunda del perfil en forma coincidente a lo destacado por Tardieu y Manichon, (1987).

En el cultivo de maíz el tratamiento T presentó una mayor presencia de raíces en el perfil respecto a los tratamientos RC y RE. Situación similar a la observada por Abu-Hamedh (2003) en un ensayo sobre Haplustoles. Los tratamientos RE y RC presentan un comportamiento diferente en la distribución de raíces en el perfil; en el tratamiento RC se observa una mayor concentración en los primeros centímetros, entre los 6 y 12 cm una distribución similar y por debajo de este estrato el tratamiento RE presenta una mayor cantidad de raíces que RC situación similar a lo observado en soja.

El análisis de componentes principales permitió separar claramente los tres tratamientos, asociando T a las variables de suelo; Cob IB y de cultivo como H y abundancia de raíces de soja y maíz; el tratamiento RC asociado a las variables indicativas de una mayor degradación en los horizontes superiores del perfil como DAP 7 a 14cm, Ic de 10 a 20 cm, % de delta y pisos; y el tratamiento RE con las variables de suelo que indican una densificación en estratos más profundos que RC; DAP 28-35 cm e Ic 20-30 cm. En forma similar a lo expresado por Vilche et al. (2000) se destaca una correlación inversa entre las variables físicas; densidad aparente, e IC y presencia de raíces de soja y maíz.

Las diferencias en la altura de maíz y soja coinciden con lo expresado por Botta *et al.* (2002) y Abu-Hamedh (2003) quienes observaron menor crecimiento de cultivos en tratamientos afectados por la compactación severa. En este sentido Botta (2005) observó que el rendimiento de soja también fue afectado, al igual que trabajos anteriores de Gerster y Bacigaluppo (2005) realizados en suelos de textura similar.

Si bien hubo diferencias significativas en el desarrollo radical entre los tratamientos evaluados, y además se observó una mayor altura de plantas en el testigo en ambos cultivos, no se manifestaron diferencias significativas en el rendimiento. Estos resultados pueden explicarse por el hecho que no hubo limitaciones hídricas, ya que en todos los tratamientos se

observaron raíces por debajo de 1,5 m de profundidad, sector donde se detectó la influencia del ascenso capilar de la napa durante el ciclo de ambos cultivos dado que el contenido hídrico se mantuvo por encima de la capacidad de campo. El ascenso de la napa fue observado en perforaciones cercanas al ensayo, fluctuando ésta entre los 2 y 2,5 mts de profundidad durante el periodo bajo análisis. En este sentido, Letey (1985) evaluando el impacto de la compactación con diferentes regímenes hídricos observó que los cultivos pueden alcanzar altos rendimientos en suelos compactos, en la medida que dispongan de un adecuado aprovisionamiento de agua. Por otra parte, Sinclair (2006) destacó que en numerosas áreas de la región pampeana, la existencia de niveles freáticos elevados, que son alcanzados por las raíces contribuyen al abastecimiento de agua de los cultivos en periodos secos. En otros trabajos en la misma área, Jobbágy *et al.* (2007) estimaron que el aporte freático contribuye a generar entre un 25 y 45 % de los rendimientos de maíz y soja en años secos cuando las raíces de estos cultivos alcanzan el sector de ascenso capilar de los niveles freáticos.

CAPÍTULO N° 5

CONCLUSIONES

- Los tratamientos con tránsito evidenciaron un incremento de estados estructurales menos favorables para el crecimiento de los cultivos, observándose un incremento de la densidad aparente, del índice de cono y una reducción en la tasa de infiltración.
- La resistencia a la penetración resultó una determinación de gran utilidad para la realización de diagnósticos rápidos, permitiendo obtener un gran número de datos con precisión y rapidez, siendo un buen indicador de condiciones para el enraizamiento de soja y maíz.
- Los diferentes rodados evaluados generan cambios en la distribución de la compactación en la masa del suelo. Los rodados convencionales (RC) concentran su efecto en forma más superficial mientras que los rodados especiales (RE) lo hacen en estratos más profundos. Este cambio en la distribución de la compactación generada por el uso de rodados especiales permiten un mejor enraizamiento de los cultivos de soja y maíz.
- En un manejo sustentable es necesario integrar todas las prácticas que contribuyan a reducir la compactación; reducir al mínimo el pasaje sobre suelo húmedo, uso de equipos de menor peso por eje, ordenar el movimiento de acoplados dentro del lote y utilizar neumáticos de mayor superficie de contacto para reducir la presión específica.
- El estudio de la distribución de raíces en el perfil asociado a las variables físicas del suelo contribuye a la interpretación del efecto del tránsito.

Los trabajos de investigación sobre los efectos del tránsito en el suelo y los cultivos requieren un abordaje multidisciplinario que incluya los aspectos: mecánico-tractivos, físicos y químicos del suelo y ecofisiológicos del cultivo.

Luego de la realización del trabajo surgen algunas preguntas que pueden ser futuras líneas de investigación:

- El uso continuo de rodados especiales podría generar densificaciones a mayor profundidad y por ende más difíciles de revertir. Este aspecto requiere la realización de nuevos estudios, que permitan verificar en otras situaciones, si su uso continuo podría generar efectos acumulativos.
- Si el uso de rotaciones intensivas con gramíneas (trigo/soja-maíz) adecuadamente fertilizadas permiten recuperar la porosidad de los suelos afectados por tránsito en planteos de siembra directa continua.

BIBLIOGRAFÍA

- Abu Hamed, N. 2003. *Compaction and subsoiling effects on corn grown and soil bulk density*. Soil Science Soc. Am. J. Soil and water management and conservation. 67:1213-1219.
- Andriani, J. M. 1999. *Coeficientes de cultivo para soja de distinta época de siembra.*, Resumen de trabajos y conferencias presentadas, Rosario, Argentina. Mercosoja 99 Ecofisiología y Climatología: 1.
- Bacigaluppo, S.; Dardanelli, J.; Gerster, G.; Quijano, A.; Balzarini, M.; Bodrero, M.; Andreani, J. y Enrico, J. 2006. *Variaciones del rendimiento de soja en el sur de Santa Fe. Factores limitantes de clima y suelo*. Mercosoja 2006: 57-70.
- Balzarini, M.; Bruno, C. y Arroyo, A. 2005. *Análisis de ensayos agrícolas multiambientales*. Ejemplos en Info-Gen. Estadística y Biometría. U.N.C.: 41-46.
- Baigorri H y Martini, E. 2007. *Elección y Manejo de cultivares de soja*. Planeta Soja. <http://www.planetasoja.com.ar>
- Bhom, W. 1979. *Methods of studing root systems*. Berlin: Springer Verbag, 188 pp.
- Blake, G. and Hartge, K. 1986. *Bulk density*. In: Methods of soil analysis. Part 1. SSA Books Series. 59. Editor Klute. Am. Society of Agronomy, Inc. Soil Sci. Soc. Am., Inc. Madison, Wisconsin, USA.: 363-375.
- Bray R. and Kutz L. 1945. *Determination of total, organic and available forms of phosphate in soils*. Soil Sci. 59: 39-45.
- Botta, G.; Jorajuría, D.; Balbuena, R. y Rosatto H. 2004. *Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (Glycine max L.)yields*. Soil and Tillage Research 78: 53-58.

- Botta, G.; Jorajuría, D. y Draghy I. 2002. *Distribución de la compactación inducida por el tráfico agrícola*. Revista de Investigaciones Agropecuarias Vol 17 (1): 15-25.
- Botta G. 2005. *Compactación en suelos labrados de baja capacidad portante*. Reología del suelo agrícola bajo tráfico. Universidad Nacional de la Plata: 73-84.
- Botta G.; Pozzolo O.; Bomben M.; Tourn M.; Soza E.; Rosatto H.; Gili A.; Ressia J.; Rivero D.; Vazquez J.y Stadler S. 2007. *Aplicación del tráfico controlado en la cosecha de maíz: Efectos sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo*. Agro-Ciencia 23 (1): 2007.
- Bragachini, M.; von Martini A.y Méndez A. 2003. *Como enfrentar la cosecha en un año niño*. Proyecto Agricultura de Precisión. <http://www.agriculturadeprecisión.org>
- Bradford J. 1986. *Penetrability*. In A Klute (ed) Methods of soil analysis Part 1. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9 ASA and SSSA: 463-478.
- Carter, M. R. 1990. *Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams*. Canadian journal of Soil Science, Ottawa, v 70: 425-433.
- Cerana.; J., Pozzolo, O.; Benavides, R.; Rivarola, S.; Wilson, M. y De Battista, J. (2004) *"La determinación de la Resistencia a la Penetración para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas productivos"*. Metodologías físicas para la Investigación del Suelo : penetrometría e infiltrometría: 55-73.
- Cerana y Nicollier V. 1969. *Las Capas densas o duras y el Crecimiento de los órganos de las plantas*. EEA INTA Pergamino, 25 p.
- Cirilo A. 2003. *Manejo de la densidad y distancias entre surcos en maíz*. IDIA XXI: 128-133.

- Cisneros, J.; Cholaky K.; Giayetto G.; Bricchi E.; Marcos J. y Cerioni G. 1998. *Influencia de diferentes sistemas de laboreo sobre la resistencia mecánica de suelos del área manisera*. XVI Congreso Argentino de Ciencias de Suelo: 253-254.
- Claverie J.; Balbuena R.; Terminiello A., Casado J.; Manghi E. y Jorajuría D. 2000. *Compactación inducida por el tráfico de maquinas en suelo forestal*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental: 286-289.
- De Battista J.; Andriulo A. y Pecorari C. 1993. *El Perfil Cultural: un método para la evaluación de sistemas de cultivo*. Ciencias del Suelo. Vol. 10-11: 89-93.
- De Battista J.; Andriulo A.; Ferrari M. y Pecorari C. 1994. *Evaluación de la Condición Estructural del Suelo bajo diferentes sistemas de labranza en la pampa húmeda argentina*. 13th International ISTRO Conference, Aalborg, Dinamarca, 24-29 July, Vol I: 99-103.
- Demmi M. 1993. *Evaluación de sistemas de cultivo (rotaciones y labranzas) a través de la determinación de estados estructurales y confección de mapas de raíces*. Informe para extensión. EEA INTA Oliveros. 5 pp.
- Draghi L. 2000. *Compactación del suelo del huerto frutal bajo diferentes intensidades de tráfico*. Tesis de Posgrado. Universidad Politécnica de Valencia, 99 p.
- Draghi L.; Botta G.; Balbuena R.; Claverie J. y Rosatto H. 2005. *Diferencias de las condiciones mecánicas de un suelo arcilloso sometido a diferentes sistemas de labranza*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental. v. 92: 120-124.
- Faíta E. 2007. Tesis de posgrado “*Calidad de suelo en sistemas de laboreo bajo cubierta en argiudoles típicos representativos de la pampa ondulada*”. Biblioteca Facultad de Agronomía y Veterinaria Univ. Nac. De Río Cuarto. 147 p.

- Fehr, W.R and C.E. Caviness. 1977. *Stages of soybean development*. Special report n° 80. Iowa State University of Science and Technology. 11 pp.
- Fernández Alsina, M. y Bacigaluppo S. 2000. *Planificación interactiva en el sur de Santa Fe*. EEA INTA Oliveros. En http://www.inta.gov.ar/oliveros/info/documentos/extension_desarrollo
- Ferreras L.; De Battista J.; Ausilio A. y Pecorari C. 2001. *Parámetros Físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo*. Pesquisa Agropecuaria., Brasilia Vol. 36 (1): 161-170.
- Gabriel, K. 1971. *The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis*. Biometrika 58: 453-467.
- Gautronneau, Y y Manichon, H. 1987. *Guide Methodique du Profil Cultural*. CEREF. Gueara 71 pp.
- Gaultney, L.; Krutz G.; Steinhart G. and Liljedhl J. 1982. *Effects of subsoil compaction on corn yields in Indiana*. Am. Soc. of Agric. Engineers ASAE Paper N° 80-1011: 563-569.
- Gerster G.; Vidal D.; Gudelj O.; y De Battista J. 1996. *Análisis del Efecto de las Labranzas sobre el estado físico de un argiudol típico*. Informe técnico Np 19. EEA INTA Marcos Juárez. 15 pp.
- Gerster G.; Gargicevich A., Cordone G. y González C. 2002. *Factores edáficos y prácticas culturales asociados al rendimiento de soja*. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn: 297.
- Gerster G. y Bacigaluppo S. 2002. *Consecuencias de la densificación por tránsito en el cultivo de Trigo*. Revista para mejorar la producción n° 19. INTA Oliveros: 15-18.
- Gerster G. y Bacigaluppo S. 2005. *Efecto del tránsito en húmedo sobre el suelo y los cultivos en sistemas de siembra directa*. Actas Congreso Aapresid 2005: 32-36.

- Gil R. 1999. *El sistema de Producción. Curso para Profesionales de Dinámica del Agua en el Suelo*. Firmat 89 pp.
- Gil R. 1986. *Observación y medición de raíces de los cultivos. Método del perfil expuesto*. INTA AER Río Tercero . Material para Extensión. 4 pp.
- Gil R. 2006. *Infiltrómetro. Permeómetro de Disco*. Actas XX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo: 138.
- Guerif. 1990. *El análisis de porosidad, Aplicación al estudio de la compactación de suelos*. III Curso de física de suelos INTA Pergamino 1990: 96-104.
- Hakansson I. and Reeder R. 1994. *Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response*. Soil and Tillage Research. Vol. 29: 277-304.
- InfoStat 2002. InfoStat versión 1.1 Grupo Infostat FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Las Brujas, Argentina 266 pp.
- Inpofos PPI-PPIC. 1999. *Planilla de Cálculo para Estimar Requerimientos Nutricional Cultivos de Grano y Forrajeros*. Disponible on line: [http:// www.inpofos.org/ppiweb/ltams.nsf](http://www.inpofos.org/ppiweb/ltams.nsf)
- INTA 2008. *Técnicas de Muestreo para análisis químico*. Instituto de suelos Castelar. En <http://www.inta.gov.ar/suelos/Servicios/Laboratorio.htm>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1988. *Carta de Suelos de la República Argentina*. Hoja 3360-13 y 14 Cañada de Gómez y Rosario. 197 pp.
- Jobbágy E.; Nosetto M. y Aragón R. 2007. *Dinámica de napas y riesgo de inundación. Influencias y efectos en la variabilidad de los cultivos*. Mundoagro Junio 2007 Buenos Aires Argentina, y en planeta soja <http://planetasoja.com>, 7 pp.
- Jorajuría D.2004. *La Resistencia a la penetración como parámetro Mecánico del Suelo*. Metodologías físicas para la Investigación del Suelo: penetrometría e infiltrometría: 43-54.

- Jorajuría, D. 2005. *Compactación del Suelo Agrícola inducida por tráfico vehicular. Reología del suelo Agrícola bajo tráfico Una revisión*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata: 39-56.
- Klute A. 1986. *Water Retention. Laboratory Methods*. American Society of Agronomy – Soil Science Society of America Agronomy Monograph nº9 (2nd edition): 635-660.
- Laflen, J.; Ameniya, M. and E. Hinta. 1981. *Measuring crop residue over*. Soil and Water Conservation. 36: 341-43.
- Letey J. 1985. *Relation ship between soil Physical Properties and Crop production*. Advances in Soils Science. vol 1:277-295.
- Lewis, J.P. y P. Torres. 2006. *Curso de análisis multivariado*. Escuela de Graduados. Facultad de Cs. Agrarias-UNR. 42 pp.
- Machado A.; Reis A.; Ferreira M., Machado R. y Bauer G.2005. *Influencia da pressao de inflacao do pneu do trator na resistencia do solo a penetracao*. Revista Brasileira Agrocienza, Pelotas, v.11: 481-486.
- Manichom H. 1986. *Observación morfológica del estado estructural y efectos de la compactación en horizontes trabajados*. En: III Curso de física de suelos INTA Pergamino 1990. 157 pp.
- Marelli H. 1998. *La siembra directa como práctica conservacionista*. Siembra directa. Ed Hemisferio Sur S.A. Argentina:127-140.
- Martini E. y Baigorri H. 2002. *Manejo del cultivo de soja en suelos con influencia de napa freática*. Soja actualización 2002.INTA Marcos Juarez: 9 –13.
- Michelena R.; Irurtia C.; Vavruska F.; Mon R. y Pittaluga A. 1989. *Degradación de suelos en el norte de la Región Pampeana*. Publicación técnica Np 6. Proyecto de Agricultura Conservacionista. INTA EEA Pergamino. 132 pp.

- Monnier, G.; Stengel, P. et Fies, J. C. 1973. *Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux, application à l'analyse de porosité du sol.* Annales Agronomiques 24 (5): 533-545.
- Montico S. y Bonel B. 2005. *Influencia de la Compactación por tránsito sobre la arquitectura de raíces.* Reología del Suelo bajo tráfico Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata: 13-20.
- Moro E.; Venialgo C.; Gutierrez N.; Ingaramo O. 2004. *Variabilidad temporal de la compactación máxima en suelos de la provincia del Chaco.* Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. ResumenA-069, 4 pp.
- Murphy J and Riley H P. 1962. *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water.* Anal. Chim. Acta 27:31-36.
- Orellana, J. 1993. *Cambios edáficos inducidos por labranzas convencionales versus siembra directa.* Publicación técnica Facultad de Agronomía y Veterinaria de Esperanza (Sta. Fe). 17 pp.
- O'Sullivan M.; Henshall J. and Dickson J. 1999. *A simplified method for estimating soil compaction.* Soil and Tillage Research V 49 4: 325-335(II).
- Pecorari C. 1988. *Características Físicas de las fracciones granulométricas de los horizontes superficiales de un Argiudol Típico.* Informe Técnico n° 220 . INTA Pergamino 18 pp.
- Pecorari C. 1998. *Guía Conceptual para elaborar metodologías de evaluaciones físicas de suelo. Siembra Directa.* Editores Panigatti, Marelli, Buschiazzo, Gil INTA ISBN 950-504-551-4 : 35-55.

- Pilatti, M.; Orellana, J.; Priano, L.; Felli, O. y Grenon D. 1988. *Incidencia de Manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de un Argiudol en el sur de Santa Fe*. Ciencia del suelo 6(1): 19-29.
- Porta Casanellas, J.; López Acevedo, M y C. Roquero de Laburu (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundiprensa, 2da Edición .Madrid. 876 pp.
- Precop INTA 2007. *Evolución de la Siembra directa en Argentina*. Convenio Argentina Karjastian. En www.cosechayposcosecha.org.
- Proctor, R.R. 1933. *Fundamental principles of soil compaction*. Engineering New-Record, New York, 11 (9): 148:156.
- Raper R. Mac Kirby J. 2006. *Soil compaction: How to do it, Undo it, or avoid Doing it*. Agricultural Equipment Technology Conference. Louisville, Kentucky, USA. American Society of Agricultural and Biological Engineers 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA. 13 pp.
- Ritchie, Hanway y Benson.1982. *How a maize plant develops*. Special report n° 48.Iowa State University of Science and Technology. 24 pp.
- Rodrigues da Silva V.; Reinert D. y Reichert J. 2000. *Resistencia mecánica do solo a penetracao influenciada pelo tráfago de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo*. Cielo. Ciencia do solo. Cienc. Rural vol 30 Np 5 Santa María. Septiembre octubre 2000. 11 pp.
- Sasal C., Andriulo A., Taboada M. 2004. *Orientación de poros en Argiudoles bajo siembra directa continua*. XIX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo. Paraná: 44.
- Sebillote M. 1978. *Itinéraire techniques et evolution de la pensée agronomique*. Comtes Rendus des Seances de L'Academie d'Agriculture de France 11: 906-914.

- Secretaria de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación. 2005. *Informe mensual*. Marzo 2005. 12 pp.
- Secretaria de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación. 2006. *Estimaciones Agrícolas 2006*. 18 pp.
- Secretaria de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación. 2006 *Evaluación del riesgo climático y vulnerabilidad de los ambientes a partir de imágenes satelitales de alta resolución Landsat TM5 y 7*. disponible on line en: <http://www.ora.gov.ar/climatico>.
- Silva Rossi M. 2004. *Evaluación de la Estabilidad Estructural en Superficie a través de las Propiedades Hidráulicas*. Penetrometría e Infiltrometría. Filguiera y Micucci Editores: 121- 130.
- Sinclair T. 2006. *Optimizing water use efficiency in soybean crops*. En XIV Congreso de Aapresid Rosario. Argentina: 14-17.
- Soane B. D. 1980. *A Method of predicting bulk density changes in field soils resulting from compaction by agricultural traffic*. J. Soil Sci. 32: 51-65.
- Söne, W, 1953. *Druckverteilung im Bodem und Bodenverformung unter Schleppereifen (pressure distribution in soil and soil deformation under tractor tyres)*. Grundlagen der Landtechnik 5: 49-63.
- Stengel P. 1988. *Análisis de la porosidad en un suelo Brunizem serie Pergamino en distintas condiciones de manejo y su relación con el crecimiento de raíces de maíz*. Informe Técnico n° 211, INTA Pergamino. 22 pp.
- Stengel P. 1990. *Utilización del análisis de los sistemas de porosidad para la caracterización del estado físico del suelo "in situ"*. III Curso Física de Suelos INTA Pergamino: 1-33.

- Straschnoy, J. V.; Di Bella C. M.; Jaimes F.; Orichio P. y Rebella C. 2006. *Caracterización del estrés hídrico y de las heladas en la región pampeana a partir de información Satelital y Complementaria*. Revista RIA Vol. 35 (2): 117-141 y en <http://www.ora.gov.ar/climatico.2006>.
- Steinbach H. y Álvarez R. 2006. *Cambios en las propiedades físicas de los suelos pampeanos por adopción de la siembra Directa*. Resúmenes XX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo Salta y Jujuy: 84.
- Streck, C.; Reinert D.; Reichert J. y Kaiser D. 2004. *Modificscoes em propriedades físicas com a compactao do solo causada pelo tráfgo inducido de um trator em plantio direto*. Ciencia Rural, Santa María, v 34 (3): 755 -760.
- Taboada M., Alvarez C., Tellería M. 2004. *Distribución y abundancia de raíces de maíz en argiudoles pampeanos bajo diferentes sistemas de labranza*. XIX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo Parana: 60.
- Taboada M. y Micucci F. 2004. *Fertilidad física de los suelos*. Facultad de Agronomía UBA. 80 pp.
- Tardieu F y Manichon H. 1987. *Consecuencias del Estado del Perfil Cultural sobre el enraizamiento; caso del maíz.III*. Curso de Física de Suelos INTA Pergamino 1990: 168-177. Extraído de Soil Compaction and Regeneration. G Moniers; M. Goss Editors. Balkena Rotterdam: 131-143.
- Tebrügge F. and Düring R. 1999. *Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany*. Soil and Tillage Research Volumen 53, Issue 1, Noviembre 1999: 15-28.

- Vilche M. 2005. *Diagnóstico de las Propiedades Edáficas y las Prácticas de Manejo que condicionan la respuesta de la Soja (glycine max merril) a la Fertilización Azufrada*. Tesis de posgrado Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario. 72 pp.
- Vilche M.; Alzugaray C. y Montico S. 2000. *Relación entre la heterogeneidad de un suelo y la distribución de raíces*. Revista Facultad de Agronomía: 75-81.
- Vorhess, W.; Nelson W. and Randall G.1986. *Extend and persistence of subsoil compaction with heavy axle loads*. Soil Science Society of America Journal, Madison. 50: 428-433.
- Walkley A, Black A. 1934. *An examination of the method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Science. 37:29-38.
- Zerpa G. 2007. *Tesis de posgrado "Degradación de Suelos en uso pastoril"*. Manejo y conservación de recursos naturales. Biblioteca Facultad de Ciencias Agrarias UNR. 131 pp.