

Capítulo 10

Efectos y manejo de la compactación en suelos del centro-sur de Santa Fe

Effects and management of soil compaction in the south-central of Santa Fe province

Guillermo Gerster^{1*}
gerster.guillermo@inta.gob.ar

Silvina Bacigaluppo¹

Rubén Tossolini²

Verónica Sapino²

** Autor de contacto*

¹ Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros – Ruta 11 km 353, 2206 Oliveros, Santa Fe.

² Estación Experimental Agropecuaria INTA Rafaela.

ÍNDICE CAPÍTULO 10

■ RESUMEN.....	215
■ ABSTRACT.....	216
■ INTRODUCCIÓN	217
■ DESCRIPCIÓN DEL ÁREA	218
■ COMPACTACIÓN EN SISTEMAS AGRÍCOLAS	222
Efectos del tránsito de maquinarias sobre el suelo y los cultivos	222
Como prevenir o reducir la compactación	224
Estrategias para recuperar la porosidad de suelos compactados por tránsito	226
■ CONCLUSIONES	228
■ BIBLIOGRAFÍA.....	229

■ RESUMEN

El centro-sur de Santa Fe (31° 37' S - 34° 22' S) presenta un clima templado, con un periodo libre de heladas de 250 días. Las temperaturas medias anuales varían entre 16 °C y 18 °C y las precipitaciones entre 975 a 1075 mm, con una alta variación interanual. Los suelos predominantes son Argiudoles típicos y ácuicos.

En los últimos años, se observó un claro predominio del monocultivo de soja, la escasa presencia de gramíneas en la rotación y el tránsito de la maquinaria sobre suelo húmedo, favorecieron la formación de bloques densificados. Este estado de degradación, en suelos con alto contenido de limo en los horizontes superficiales, produjo consecuencias negativas en aspectos físicos, químicos y biológicos, afectando seriamente la conservación del recurso.

El uso de neumáticos de mayor superficie de apoyo y el tránsito controlado, son alternativas favorables para reducir su impacto negativo en condiciones edáficas húmedas.

En suelos ya afectados por compactación, la actividad radical es un factor primordial para la regeneración de su estructura. Las gramíneas, en especial el trigo, tienen una gran capacidad de exploración en zonas densificadas. La soja en cambio, presenta un sistema de raíces de escasa capacidad de exploración.

En una experiencia de larga duración, en siembra directa, implantada sobre un Argiudol típico con una severa degradación física en su perfil (36 % de bloques masivos delta) se evaluó el efecto de diferentes secuencias de cultivos sobre la regeneración de la estructura del horizonte superior: 1) Soja-Soja; 2) Soja-cultivo de cobertura (trigo)-Soja; 3) Maíz-Soja-Trigo/Soja y 4) Maíz-Trigo/Soja.

Luego de 9 años, se observaron; 38 %, 22%, 18% y 14% de bloques MΔ, en los perfiles de suelo de las secuencias 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Estos resultados muestran la aptitud de la actividad radical de las gramíneas para recuperar porosidad en suelos compactados.

Palabras clave

densificación edáfica,
rodados especiales,
rotación de cultivos,
actividad radical.

■ ABSTRACT

The Center-South of Santa Fe province (31 ° 37 'S - 34 ° 22' S) presents a temperate climate, with a frost-free period of 250 days. The annual average temperatures vary between 16 °C and 18 °C and the precipitations between 975 to 1075 mm, with a high interannual variation. Predominant soils are Typic and Aquic Argiudolls

In recent years, a clear predominance of soybean monoculture was observed, the scarce presence of grasses in the rotation and the machinery transit on humid soil, favored densified blocks formation. This degradation state, in soils with high silt content in the surface horizons, results in negative consequences in physical, chemical and biological aspects, seriously affecting the conservation of the resource.

The use of tires with greater surface support and controlled traffic are favorable alternatives to reduce their negative impact on wet soil conditions.

In soils already affected by compaction, radical activity is a fundamental factor for the regeneration of its structure. Grasses, especially wheat, have a high exploration capacity in densified areas. On the other hand, soybean, has a root system with scarce exploration capacity.

In a long-term experience in non tilled system, implanted on a Typic Argiudoll with a severe physical degradation in its profile (36% of massive delta blocks), the effect of different crop sequences on the regeneration of the upper horizon structure was evaluated: 1) Soybean - Soybean; 2) Soybean-cover crop (wheat) -Soybean; 3) Corn-Soybean-Wheat /Soybean and 4) Corn-Wheat /Soybean.

After 9 years, they were observed; 38%, 22%, 18% and 14% of MΔ blocks, in the soil profiles of sequences 1, 2, 3 and 4, respectively. These results show the ability of the grass's radical activity to recover porosity in compacted soils.

Keywords | soil densification,
special tires,
crop rotation, root activity.

■ INTRODUCCIÓN

La degradación del recurso suelo es producto de la combinación de efectos naturales y antrópicos de gran intensidad (Pecorari, 1988a, 1988b). Muchos suelos de la región presentan un marcado deterioro estructural causado por descensos significativos de la materia orgánica, evidenciados por la formación de costras superficiales, el incremento en las tasas de escurrimiento, la pérdida de suelo por erosión y una menor disponibilidad de agua para los cultivos (Michelena *et al.*, 1988; Senigagliesi & Ferrari, 1993). Otra evidencia de esta degradación es el incremento de la susceptibilidad del horizonte superior a formar una estructura masiva con pérdida de porosidad estructural (Pecorari, 1988a, 1988b, Gerster, *et al.*, 1996). Estos procesos tienen como consecuencia negativa, entre otras, un incremento en la resistencia mecánica del suelo a la penetración, con efectos adversos sobre el crecimiento radical y una disminución de la velocidad de infiltración del agua (Cosentino & Pecorari, 2002). Según Barbosa *et al.* (1997), la baja estabilidad de los suelos y la escasa regeneración de la estructura, en la región sojera núcleo argentina, están asociadas a su alto contenido de limo. Las características físicas particulares de los limos de origen biológico, con alto contenido de biolitos y vidrios volcánicos, que poseen muchos Argiudoles pampeanos, confieren al horizonte superficial de estos suelos, rasgos de fragilidad estructural, tales como alta porosidad textural y débil resistencia mecánica y consecuentemente una alta susceptibilidad a la degradación. El elevado contenido de minerales de baja densidad en la fracción limo del horizonte superficial de muchos suelos pampeanos, aumenta la porosidad a nivel textural y es el principal causante de la inestabilidad estructural del esqueleto mineralógico (Cosentino & Pecorari, 2002).

Una manera de entender la complejidad del funcionamiento del suelo es centrando la atención en su sistema poroso, en donde se cumplen la mayoría de los procesos físicos, químicos y biológicos. En principio, se pueden definir dos grandes grupos de factores de variación de la porosidad del suelo, uno es su constitución que emerge del conjunto de sus partículas elementales calificado como porosidad textural, mientras que el otro es la historia del lote que refleja la acción de los factores externos (climáticos, biológicos, mecánicos) sobre el material original del suelo y que da origen a la porosidad estructural (Venialgo *et al.*, 2002). Es importante destacar que de las propiedades del suelo, la porosidad estructural es tal vez la más alterada por las operaciones de labranza o manejo sin laboreo. El conocimiento del funcionamiento estructural del suelo, con sus variaciones propias y aquellas modificadas por el hombre, permite mejorar el uso, manejo y conservación del suelo (Gil, 2001; Gerster & Bacigaluppo, 2004).

Por otro lado, se ha identificado a la compactación como una de las principales causas de la degradación de los suelos que afecta la productividad y acelera la pérdida de calidad de las tierras agrícolas por limitación del desarrollo radical de los cultivos (Plá Sentis & Nacci, 1990; Gerster & Bacigaluppo, 2004; Silva Rossi, 2005).

El tránsito de la maquinaria en suelos agrícolas es una de las principales causas de la formación de capas compactas, con pérdida de la macroporosidad del suelo, pudiendo causar una disminución en los rendimientos de los cultivos, aumentar el riesgo de erosión, dificultar la absorción de agua y nutrientes por las plantas, afectar el crecimiento de raíces y la difusión de oxígeno pudiendo incrementar las pérdidas de nitrógeno por denitrificación en años húmedos.

En el sur de Santa Fe, donde las labores de siembra y cosecha se concentran en períodos lluviosos, el tránsito de maquinaria se produce habitualmente con contenidos de humedad de suelo elevados y cercanos al punto de máxima susceptibilidad a la compactación. Una forma de cuantificar esta susceptibilidad es a través del análisis del test proctor que relaciona densidad aparente y contenido hídrico del suelo (Taboada & Micucci, 2002; Silva Rossi, 2005).

Existen marcadas diferencias en la susceptibilidad a la compactación entre suelos aunque sean morfológicamente similares. Ésta depende de la calidad de los mismos y va a estar determinada en gran medida por los tenores de materia orgánica. Por ello es importante promover aquellas prácticas de uso y manejo de la tierra tendientes a incrementar los tenores de materia orgánica del suelo (Taboada y Micucci, 2002; Silva Rossi, 2005).

El método del perfil cultural, basado en la descripción morfológica del estado estructural, es una herramienta útil para caracterizar el estado físico del suelo y estudiar su efecto sobre el funcionamiento del cultivo. Describe la disposición y estado interno de los terrones, constituyentes de la estructura del suelo, en un volumen dado del perfil (De Battista *et al.*, 1993; Bacigaluppo *et al.* 2011).

■ DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

El centro-sur de la provincia de Santa Fe se encuentra dentro de la región de la Pampa Ondulada, subregión de la Pampa Húmeda Argentina. De Sur a Norte, se extiende desde el límite con la provincia de Buenos Aires (34° 22' S) hasta la latitud de la ciudad de Santa Fe (31° 37' S), mientras que de Oeste a Este se extiende desde el límite con la provincia de Córdoba hasta el río Paraná. El clima es templado, con un periodo libre de heladas de 250 días (mediados de setiembre a mediados de mayo), pudiendo variar en 20 ó 25 días, según el año. Las temperaturas medias anuales varían entre 16 y 18 °C y las precipitaciones entre 975 y 1075 mm, con una alta variación interanual. Aumentan de Oeste a Este y el régimen pluviométrico tiende a ser monzónico, o sea con concentración de lluvias en primavera-verano. El período octubre-marzo concentra el 70% de las lluvias (Mosconi *et al.*, 1981).

El relieve es suavemente ondulado, recortado por cañadas, arroyos y ríos. Posee pendientes medias con gradientes menores de 2%, aunque en algunos sectores pueden alcanzar el 3%. En los interfluvios y en las nacientes de los cursos de agua, el terreno suele ser más plano. Los materiales sobre los cuales se formaron los suelos son sedimentos loésicos de textura predominante franco-limosa (Mosconi *et al.*, 1981). Los suelos del área son genéticamente similares, una alta proporción de los mismos pertenece al gran grupo Argiudol, variando sólo a nivel de series por diferencias en sus contenidos de limo, arcilla y arena y/o en el espesor de los horizontes que las componen.

La capacidad productiva de estos suelos permite diferenciar distintas áreas:

A- **Áreas en las que predominan tierras de aptitud productiva alta** (identificadas en la **Figura 1** con el color verde).

Los suelos predominantes son Argiudoles típicos y ácuicos, siendo los Argiudoles acuérticos y Hapludoles típicos los subordinados. Como suelos menores se reconocen Argialboles y Natralboles típicos. El drenaje de los suelos predominantes varía entre bueno a moderadamente bueno, presentan pocas limitaciones para la producción, sin riesgo de inundación/anegamiento prolongados o encharcamiento generalizado. Las tierras predominantes corresponden a las clases I y/o II de capacidad de uso.

B– Áreas en las que predominan tierras de aptitud productiva media: se reconocen dos categorías:

B1– Aptitud productiva media-alta (identificadas en la **Figura 1** con el color amarillo)

Los suelos predominantes corresponden a Argiudoles ácuicos, Hapludoles énticos y Argialboles típicos, siendo los Natralboles típicos los subordinados. Como suelos menores se reconocen Natracualfes típicos, Argiudoles típicos y Hapludoles típicos.

El drenaje de los suelos predominantes es algo excesivo en los Hapludoles y moderadamente bueno o imperfecto en los Argiudoles ácuicos y Argialboles. Son tierras sin riesgo de inundación/anegamiento prolongados y bajo riesgo de encharcamiento. Más del 30% de la superficie está ocupada por suelos con limitaciones moderadas (drenaje imperfecto, epipedones ócricos, erosión actual, etc.). Las tierras predominantes corresponden a la clase III de capacidad de uso.

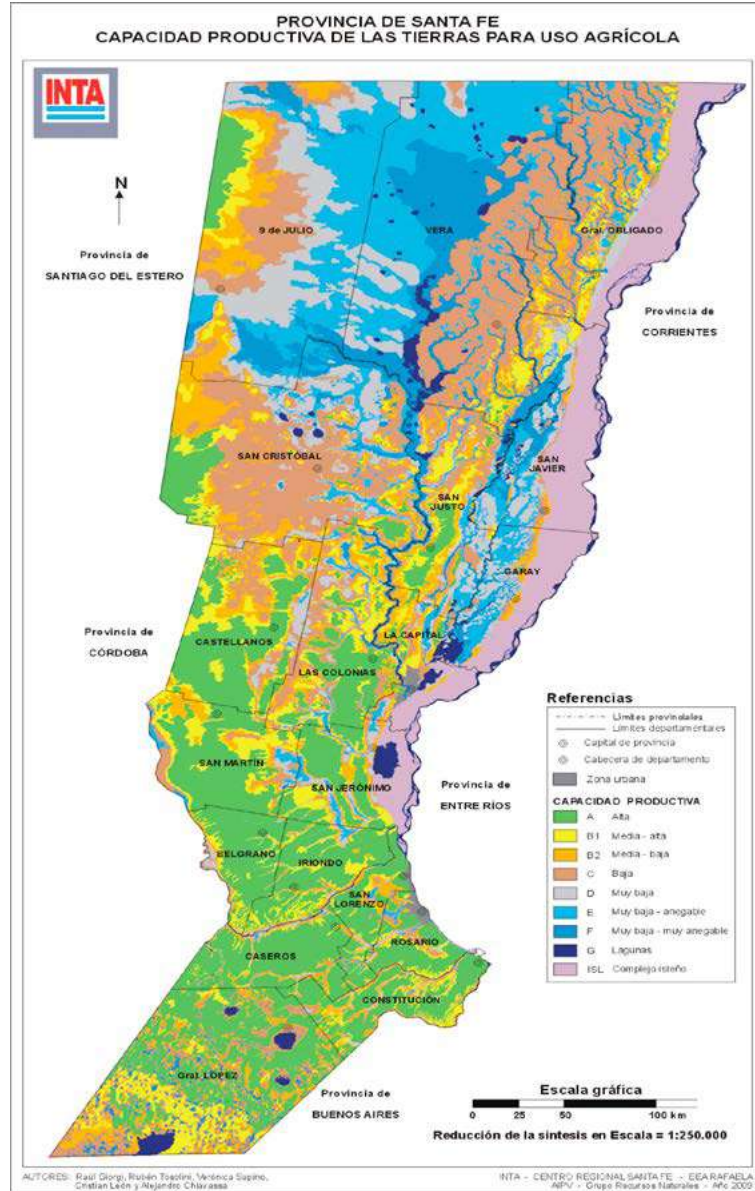


Figura 1: Capacidad productiva de las tierras de uso agrícola, provincia de Santa Fe.

Figure 1: Productive capacity of land for agricultural use, Santa Fe province

B2– Aptitud productiva media/baja (identificadas con el color naranja en la **Figura 1**)

Los suelos predominantes son Argialboles típicos, Natralboles típicos y Hapludoles thapto nátrico, siendo los Argiudoles ácuicos y Natracualfes típicos los suelos subordinados y como suelos menores, se reconocen Natracuales típicos y Entisoles.

El drenaje de los suelos predominantes varía entre imperfecto para el primero e imperfecto/pobre para los restantes. Son tierras sin riesgo de inundación/anegamiento (o excepcional) y con moderado riesgo de encharcamiento, más del 30% de la superficie está ocupada por suelos con limitaciones severas (drenaje pobre, sodicidad moderada, epipedones ócricos, erosión actual, etc.). Las tierras predominantes corresponden a la clase IV de Capacidad de uso.

Como se observa en la **Figura 2**, en los suelos del centro-sur de Santa Fe, resalta la fuerte participación de suelos zonales con una textura del horizonte superficial franco-limosa, en menor medida

la franca y muy escasa participación de las texturas areno-franca y franco-arenosa, cuya presencia es notoria en el límite con la provincia de Buenos Aires.

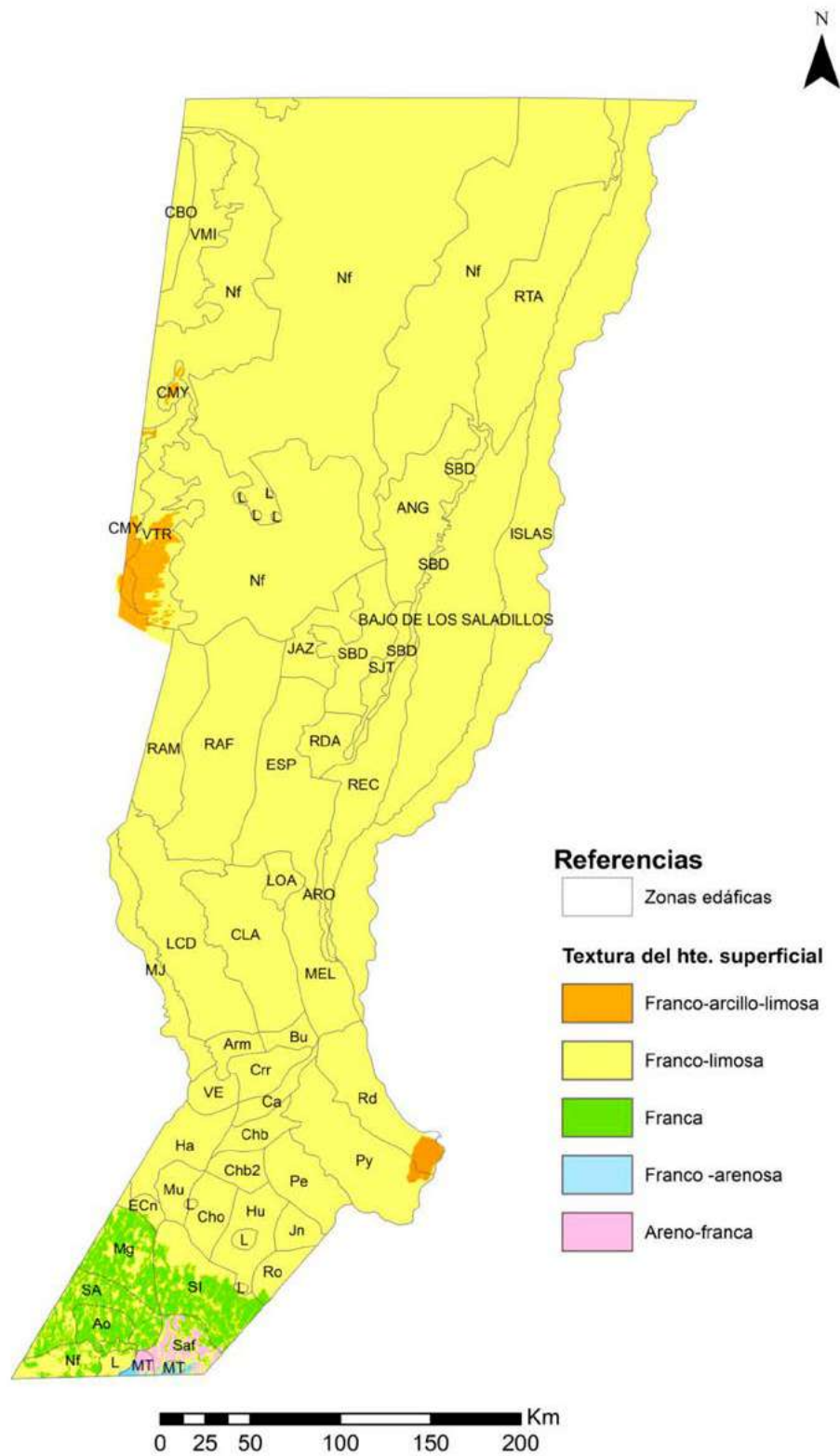


Figura 2: Clases texturales del horizonte superficial, de suelos de la provincia de Santa Fe.

Figure 2: Textural classes of the superficial horizon of Santa Fe province soils.

Dentro de la clase textural predominante es posible determinar un incremento importante de la fracción limo en el sentido Oeste-Este.

En la **Tabla 1** se muestran las series de suelo de tres transectas en sentido O-E y S-N, donde es posible observar el incremento de la fracción limo de los suelos zonales, en detrimento de la fracción arena y arcilla.

Tabla 1: Diferencias texturales entre los principales suelos zonales del centro-sur de Santa Fe, en tres transectas de Oeste a Este y de Sur a Norte.

Table 1: Textural differences between the main zonal soils of the center-south of Santa Fe, in three transects from West to East and from South to North.

Transectas W-E y S-N	Serie	Fracción mineral (%)		
		Arcilla	Limo	Arena
1	Venado Tuerto	25,1	60,0	14,9
	Hughes	24,2	63,4	12,4
	Pergamino	22,7	64,8	12,5
	Peyrano	21,3	67,8	10,9
	Roldán	23,7	74,1	2,2
2	Montes de Oca	27,4	68,4	4,2
	Clason	26,5	70,5	3,0
	Los Cardos	25,0	72,5	1,9
	Maciel	21,5	74,5	3,4
3	Ramona	35,3	62,2	2,5
	Rafaela	26,0	72,0	2,2
	Esperanza	28,7	66,7	4,7
	Recreo	22,1	58,8	19,1

La primer transecta comprende el sur de Santa Fe e involucra a las series Venado Tuerto, Hughes, Pergamino, Peyrano y Roldán, los valores de la fracción limo van de 60 % (oeste), hasta el 74,1% en la Serie Roldán (este), este incremento de limo trae aparejado una reducción de las arenas (de 14,9 a 2,2 %) y en menor medida de las arcillas (de 25,1 a 23,7 %).

La segunda transecta, caracteriza el sector central del área en estudio y las series que participan son Monte de Oca, Los Cardos, Clason y Maciel, donde se repite el mismo esquema anterior, un incremento de la fracción limo (de 68,4 % a 74,5%), un descenso importante de la fracción arcilla (de 27,4 % a 21,5%) y en menor medida del contenido de arena (de 4,2 % a 3,4%), en este caso el incremento observado en la serie Maciel puede deberse a posible aporte fluvial.

La tercera, identifica al sector norte del área y está representada por las series Ramona, Rafaela, Esperanza y Recreo, las dos primeras reúnen las típicas características de los suelos santafesinos de mucho limo y poca arena, la serie Esperanza y Recreo presentan características intermedias debido a posibles aportes de materiales fluviales, lo que explica la no continuidad de las tendencias vistas en las transectas anteriores.

■ COMPACTACIÓN EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

Efectos del tránsito de maquinarias sobre el suelo y los cultivos

En la región centro-sur de Santa Fe, se observa en los últimos años, un claro predominio del monocultivo de soja. Si bien la siembra directa continua es una práctica generalizada y eficaz para el control de la erosión hídrica, la escasa presencia de gramíneas en la rotación **Figura 3** es preocupante, generando consecuencias negativas en aspectos físicos, químicos y biológicos del suelo.

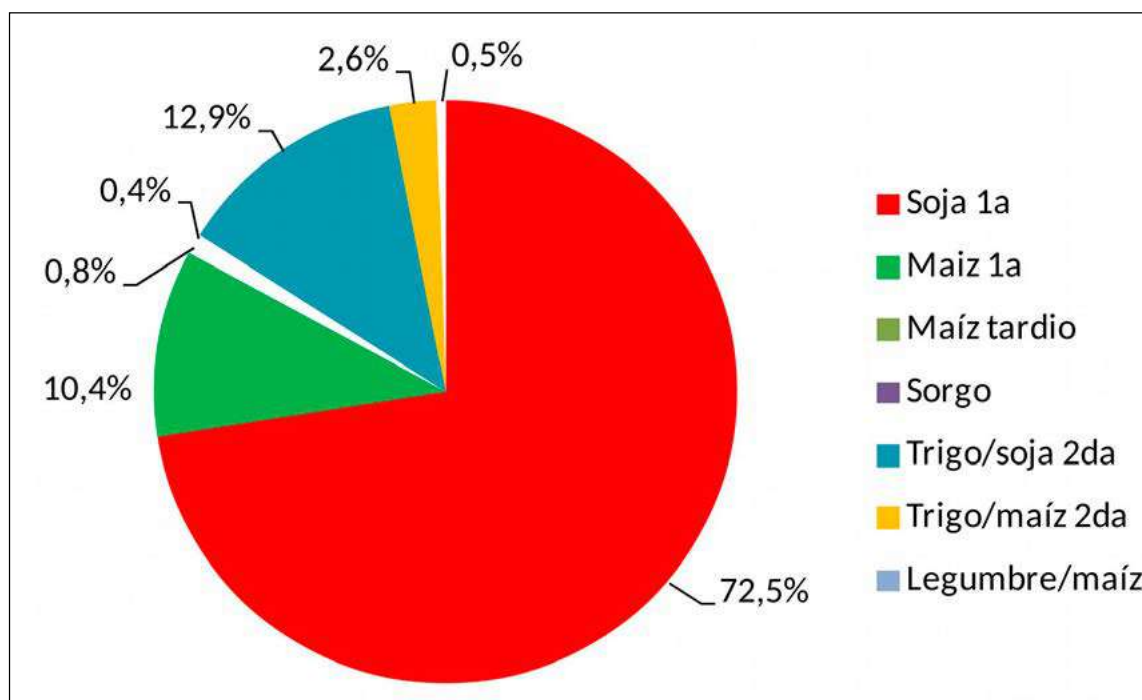




Figura 3: Superficie ocupada por diferentes cultivos en el sur de Santa Fe (deptos Belgrano, Iriondo, San Lorenzo, Rosario, Caseros, Constitución y General López), campaña 2014/15.

Figure 3: Area occupied by different crops in the south Santa Fe (Belgrano, Iriondo, San Lorenzo, Rosario, Caseros, Constitución y General López), 2014/15.

Se puede estimar la superficie transitada por los rodados en un lote, relacionando el ancho de trabajo de la maquinaria y el de los neumáticos. En el caso de la soja en siembra directa, considerando la maquinaria utilizada usualmente en el sur de Santa Fe, para siembra, pulverización y cosecha, la superficie del lote afectada cada año por las ruedas de estos implementos, sería de aproximadamente un 60 % del mismo (Gerster, datos inéditos). Muchos de los pasajes de la maquinaria se realizan con suelo húmedo, dado que la siembra y pulverización para el control de malezas, requieren que el suelo posea niveles de humedad cercanos a capacidad de campo, coincidiendo en muchos casos con el intervalo de máxima susceptibilidad a la compactación. A su vez, la implantación de cultivares de soja de ciclos más cortos (grupos de madurez III y IV) produjo un adelanto de la cosecha, concentrándose en el mes de marzo, coincidiendo con un periodo de abundantes lluvias. La existencia de cobertura del suelo con rastrojos amortigua el impacto del tránsito, distribuyendo el peso de la maquinaria en una mayor superficie, esta situación no se observa en situaciones de monocultivo de soja por la escasa cobertura vegetal remanente. La ausencia de raíces de gramíneas, capaces de explorar los sectores densificados,

sumada a la escasa actividad de la mesofauna del suelo en este sistema, contribuyen a que los sectores compactos generados por el tránsito perduren varios años. En condiciones de sequía, los cultivos sobre suelos compactos sufren aún más el déficit hídrico. Por un lado, porque presentan menor enraizamiento y, por otro, por una menor eficiencia de captación de agua por parte del suelo durante precipitaciones intensas, como consecuencia de la reducción de su sistema poroso.

Gerster & Bacigaluppo (2004), trabajando en Argiudoles típicos sobre huellas generadas por el paso de tolvas auto-descargables sobre suelo húmedo, observaron que los sectores transitados presentaban un incremento en la densidad aparente, fundamentalmente una pérdida de la macroporosidad que generó una reducción de la infiltración básica (del 30%), menor exploración de raíces **Figura 4** , disminución en el número y peso de nódulos en soja **Figura 5** , y una disminución en los rendimientos de soja y maíz de un 28 % y de 15 %, respectivamente, respecto a zonas sin tránsito.

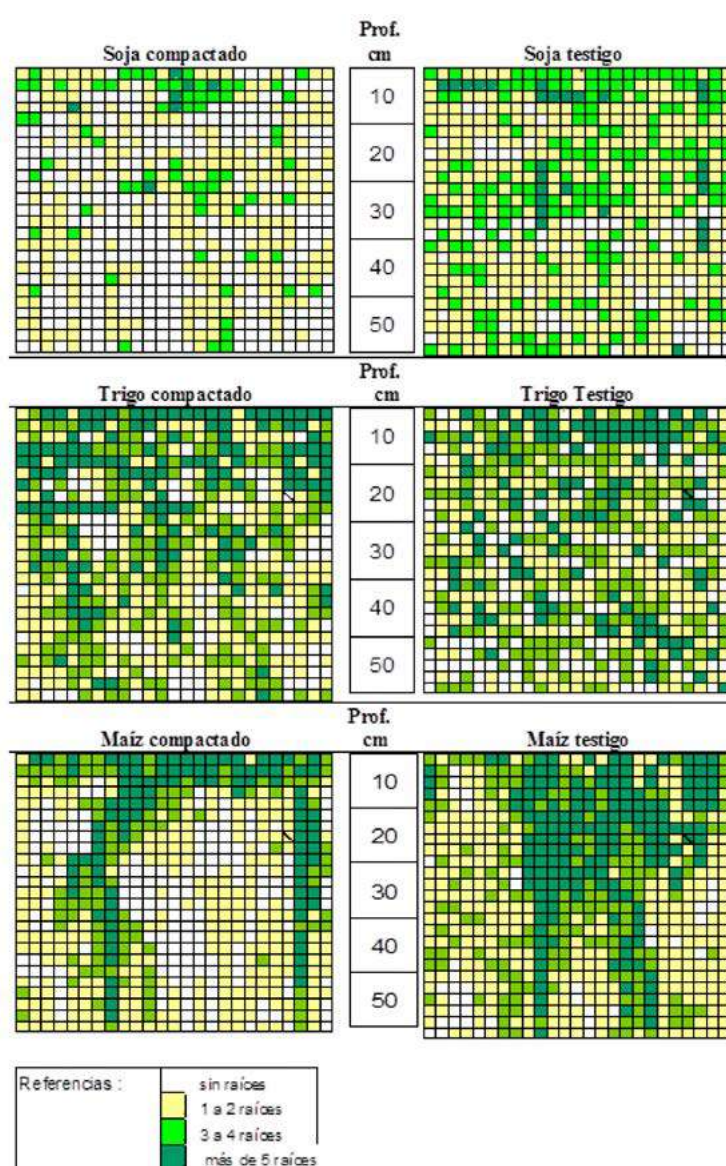


Figura 4: Distribución de raíces de soja, trigo y maíz hasta los 50 cm de profundidad, en suelos compactado y sin tránsito (testigo).

Figure 4: Distribution of soybean, wheat and corn roots up to 50 cm deep, in compacted and non-trafficked soils (control).

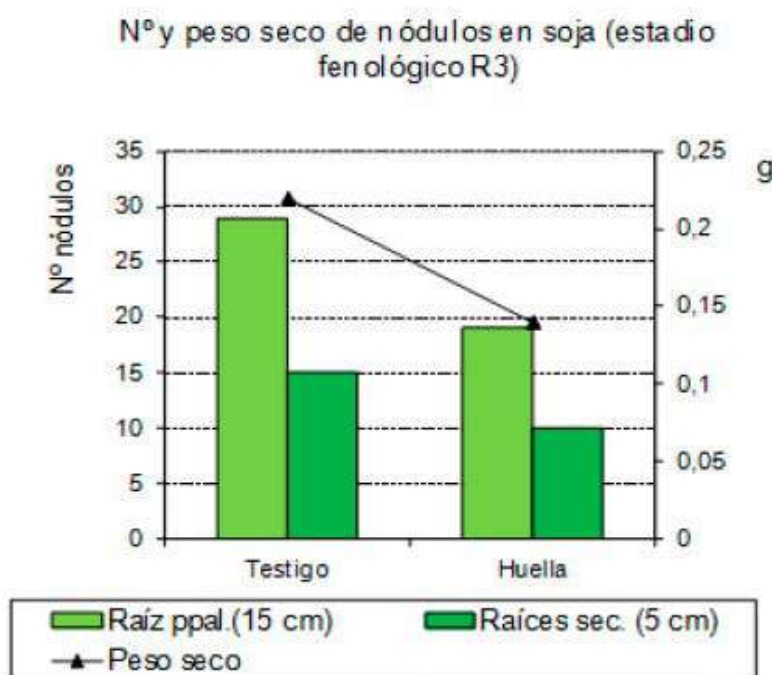


Figura 5: Número y peso de nódulos (*Bradyrhizobium japonicum*), aislados de raíces de soja creciendo sobre suelo compacto (Huella) y suelo sin transitar (Testigo).

Figure 5: Number and weight of nodules (*Bradyrhizobium japonicum*), isolated from soybean roots grown on compact soil (Footprint) and soil without transit (Control).

En la **Figura 4** se puede observar, además, que los cultivos de soja, maíz y trigo tienen diferente capacidad de exploración radical en sectores de suelo densificados. El cultivo que presenta mayor dificultad de explorar zonas compactas es la soja, el maíz si bien logra superar los sectores densos presenta una distribución de raíces desuniforme, mientras que el trigo muestra una exploración radical en los sectores compactos similar al testigo sin transitar.

En el manejo de la compactación por tránsito, existen dos momentos claramente identificables, el primero es cómo prevenirla, o al menos minimizarla y luego, en caso de lotes que por diversos motivos han sufrido los efectos del tránsito en húmedo, qué estrategias utilizar para recuperar su capacidad productiva.

Como prevenir o reducir la compactación

Algunas alternativas para prevenir o reducir la compactación son, **el tránsito controlado**; el **ordenamiento de la circulación de la maquinaria** dentro de los lotes, definiendo **sectores de tránsito intensivo** y **la reducción de la presión específica de la maquinaria sobre el suelo** mediante el uso de rodados especiales.


Tránsito controlado: consiste en ajustar las trochas de los equipos agrícolas para que sean coincidentes en la misma huella. De esta manera, el efecto de la compactación por tránsito se concentra en una menor superficie del lote. El fundamento de esta técnica se basa en que el 70 % de la compactación es originada por el primer pasaje del rodado, mientras que el pasaje sucesivo sobre la misma huella aporta el 30 % restante (Jorajuría, 2005).


Dada las características de la tenencia de la tierra en la región pampeana, su aplicación es muy limitada, ya que más del 60 % del área se trabaja en campos alquilados, con contratos anuales y resulta habitual además, la contratación de servicios de siembra, pulverización y cosecha, por lo cual la aplicación de este sistema se limita a establecimientos que dispongan de maquinaria propia y puedan controlar en forma sistemática el tránsito de los lotes. Para esta situación, el uso de la agricultura de precisión es una alternativa que permite un gran avance asegurando el tránsito de los rodados por el mismo lugar, no solo en cada cultivo sino en campañas sucesivas.

Ordenamiento de la circulación de la maquinaria, definiendo sectores de tránsito intensivo en condiciones de alta humedad, como caminos y lugares de descarga de las tolvas durante la cosecha (descarga de la tolva de la cosechadora en cabeceras). Esto reduce un 15 % su capacidad operativa, pero utilizar esta alternativa en condiciones de falta de piso resulta altamente beneficiosa.

La reducción de la presión específica sobre el suelo, mediante la utilización de maquinaria de menor peso por eje y/o adecuación de los rodados. Respecto al primer aspecto, es preocupante la tendencia de los últimos años a la utilización de cosechadoras y tolvas con mayor capacidad de trabajo y mayor peso, por lo cual, el uso de neumáticos, o el uso de orugas de goma, 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 una mayor superficie de contacto.

Con el objetivo de evaluar el uso de rodados alternativos en tolvas auto-descargables, Gerster & Bacigaluppo (2012), trabajaron sobre un suelo Argiudol ácuico serie Armstrong, con una historia de más de veinte años de agricultura y ocho años en siembra directa continua, comparando el tránsito con rodados convencionales y radiales.

Algunos resultados observados luego del paso de ambos rodados, mostraron **Figura 6A**  que el rodado convencional presentó valores más elevados de resistencia mecánica a la penetración en estratos superiores del perfil del suelo (10 - 20 cm), mientras que con el rodado radial, los valores más elevados se encontraron a mayor profundidad (20 - 30 cm). Estas observaciones coinciden con las realizadas por Voorhess *et al.* (1986) y Jorajuría (2005) quienes determinaron que superficialmente el efecto negativo del tránsito está asociado a la presión ejercida por el neumático, mientras que a nivel sub-superficial depende más del peso total del equipo utilizado.

También se observó **Figura 6B** , que la presencia de densificaciones superficiales por tránsito con rodado convencional, limitó el crecimiento de raíces en todo el perfil, con rodado radial en cambio, hubo un mejor enraizamiento en profundidad incluso en estratos con valores más elevados de resistencia mecánica a la penetración. Sin dejar de tener en cuenta que el área sin tránsito siempre presentó mayor abundancia de raíces en todo el perfil.

Si bien los neumáticos radiales favorecieron el desarrollo radical de los cultivos, en relación a los convencionales, su efecto para atenuar la degradación física del suelo es limitado, ya que generan densificaciones a mayor profundidad que los neumáticos convencionales.

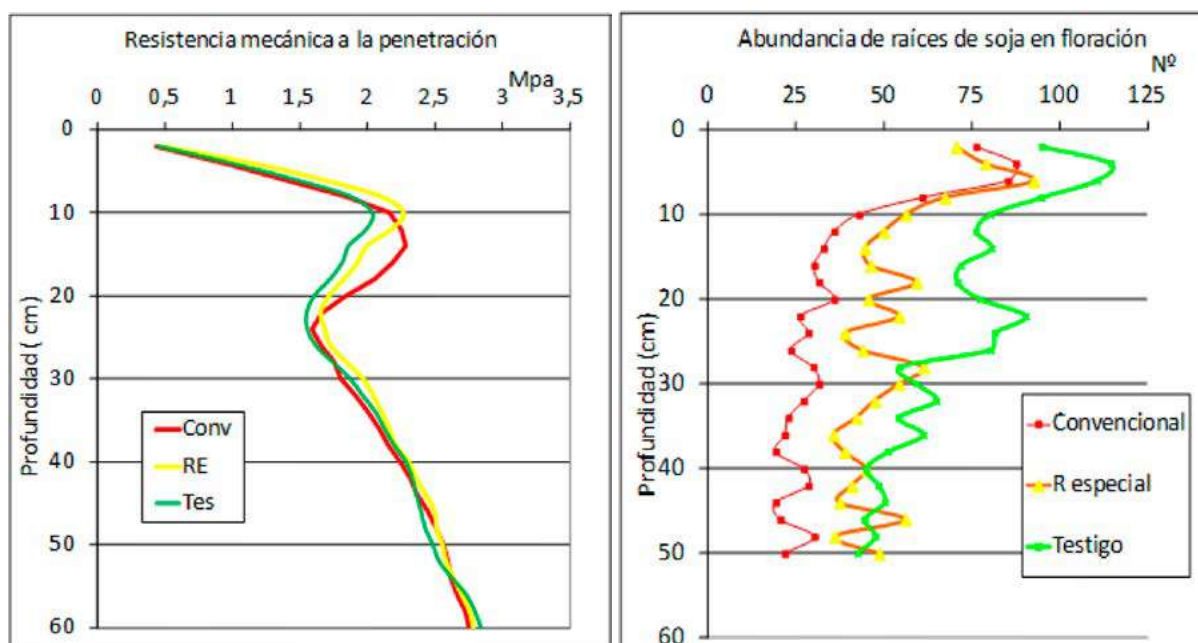


Figura 6A: Resistencia mecánica a la penetración de un suelo Argiudol ácuico hasta los 60 cm de profundidad, luego del tránsito con rodados radiales o especial (RE), rodados convencionales (Conv) y suelo sin transitar (Tes); **B:** abundancia de raíces del cultivo de soja creciendo sobre los mismos tratamientos.

Figure 6A: Mechanical penetration resistance of an aquic Argiudol soil up to 60 cm depth, after transit with radial or special tire (RE), conventional tire (Conv) and without transit (Tes) soil; **B:** abundance of soybean roots growing on the same treatments.

Estrategias para recuperar la porosidad de suelos compactados por tránsito

Es importante analizar a la estructura del suelo desde su punto de vista dinámico, ya que hay factores que contribuyen a su degradación (compactación por tránsito en húmedo, por ejemplo) y otros que contribuyen a su regeneración. Los factores que facilitan la recuperación de la porosidad del suelo son la **aptitud de fisuración**, la **actividad biológica** (mesofauna) y las **raíces** (especialmente de gramíneas). Por lo tanto, el estado estructural de un suelo dependerá del balance entre ellos.

En los suelos del sur de Santa Fe, la **aptitud de fisuración** es una característica importante en el horizonte B2, pero resulta muy limitada en los A y B1, que es precisamente donde se generan los sectores densificados, dada la presencia de arcillas no expansivas.

Por otro lado, con el proceso de "agriculturización" de los últimos veinticinco años, con escasa rotación de cultivos, se observan actualmente en la zona, valores promedio de materia orgánica de 2,5 %, pH cercanos a 5,7, una baja disponibilidad de Ca y Mg en los horizontes superficiales, fósforo disponible por debajo de las 10 ppm. En estas circunstancias la **actividad biológica (mesofauna)** es reducida, y la **actividad de raíces** se limita sólo al cultivo de soja. Por lo cual, diversificar el sistema de producción, incrementando la presencia de gramíneas en la rotación, con una adecuada fertilización, parecería ser el camino indicado para recuperar porosidad, promoviendo con ello la actividad biológica del suelo.

Las gramíneas de invierno presentan ventajas respecto al maíz, en que por un lado son cultivos densos, con mayor cantidad de plantas por superficie (menor distancia entre líneas de siembra y entre plantas), presentando por lo tanto un sistema radical con más frentes de avance. Por otra parte, encuen-

tran normalmente durante su implantación, el suelo húmedo por periodos prolongados, teniendo por lo tanto, mayores posibilidades de explorar los sectores compactados **Figura 4** ☉². Este hecho está asociado a las características de las lluvias otoñales que al ser de baja intensidad y larga duración permiten humedecer todo el perfil, incluso los sectores compactos. El cultivo de maíz en cambio, no siempre se desarrolla con buenas condiciones de humedad en el perfil, por lo cual no logra explorar con tanta facilidad estos sectores. Pero sí tiene la capacidad de generar poros de mayor diámetro, que contribuyen a lograr una mayor velocidad de infiltración de agua.

En una experiencia de larga duración implantada sobre un suelo Argiudol típico, en la Estación Experimental INTA Oliveros (32° 32' S; 60° 51' O), se observaron al cabo de nueve años, distintas condiciones edáficas en los perfiles de diferentes secuencias agrícolas evaluadas.

El perfil inicial del lote mostraba una severa degradación estructural **Figura 7** ☉, producida antrópicamente por un inadecuado manejo, que alcanzaba un 36% de la superficie de los horizontes A + B1, ocupada por bloques compactos (Masivos Δ). Superficialmente se encontró un predominio de estructura laminar, donde se observó el desarrollo de raíces en forma horizontal.



Figura 7: Perfil cultural inicial, ensayo de larga duración en la EEA INTA Oliveros, octubre 2006. Bloques delimitados con rojo corresponden a estructuras masivas con ausencia de macroporosidad.

Figure 7: Initial cultural profile, long-term experiment at the INTA Oliveros Research Station, October 2006. Red delimited blocks correspond to massive structures with absence of macroporosity.

A partir esta situación, se evaluó su evolución contrastando el monocultivo de soja versus diferentes secuencias de cultivo con distinto grado de participación de gramíneas, como cultivo de cobertura (trigo) y/o como cultivo de grano (trigo y maíz), en siembra directa continua.

Luego de nueve años, se observaron importantes diferencias entre los distintos tratamientos **Figura 8** ☉, así el perfil del monocultivo de soja (Soja-Soja), continuó tal como había partido de la situación inicial, presentando un piso continuo con bloques masivos del 39 % del área. Mientras que en el resto de los perfiles de suelo, se observaron cambios notables. En el perfil edáfico de la secuencia que incluyó al trigo como cultivo de cobertura (soja-cultivo de cobertura-soja), por ejemplo, los bloques compactos disminuyeron a un 22%. En la secuencia donde participaron el maíz y el trigo como cultivos de grano (Maíz-Soja-Trigo/soja), los estados masivos se observaron sólo en un 18% de la superficie del

perfil. En tanto la secuencia donde participaron trigo y maíz con mayor intensidad (Maíz-Trigo/soja), la presencia de sectores densificados se redujo al 14%.

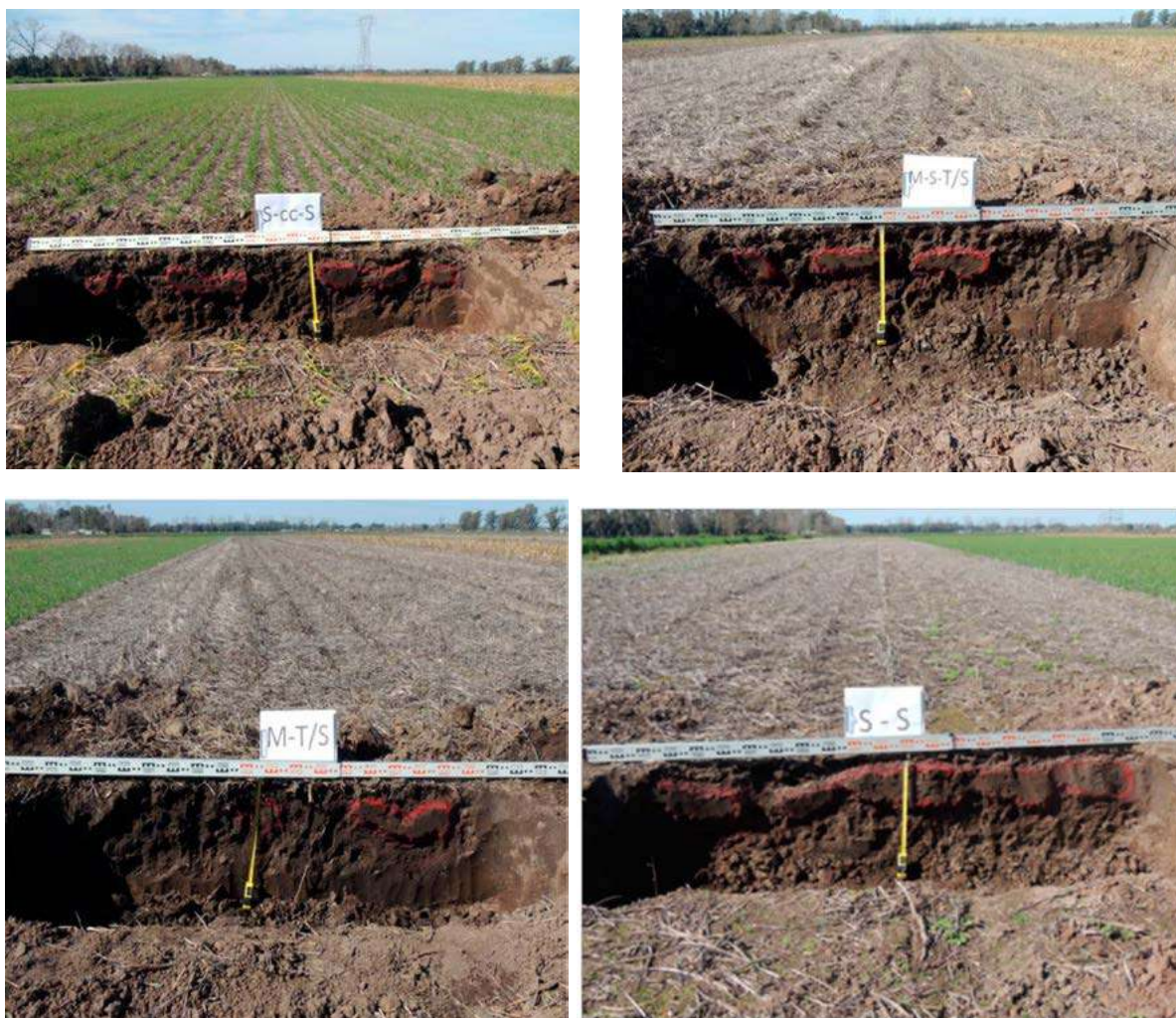


Figura 8: Perfiles de suelo luego de 9 años de diferentes secuencias agrícolas, ensayo de larga duración en la EEA INTA Oliveros. Bloques delimitados con rojo corresponden a estructuras masivas con ausencia de macroporosidad. S: Soja; cc: cultivo de cobertura (trigo); M: Maíz; T: Trigo.

Figure 8: Soil profiles after 9 years of different crop sequences, long-term experiment at the INTA Oliveros Research Station. Red blocks delimited correspond to massive structures with absence of macroporosity. S: Soybean; cc: cover crop (wheat); M: Maize; T: Wheat.

Estos resultados muestran claramente la aptitud de la actividad radicular de las especies gramíneas, como una alternativa válida para recuperar porosidad en suelos compactados.

■ CONCLUSIONES

Los suelos del centro-sur de Santa Fe, característicos por estar constituidos con una alta proporción de limo en sus horizontes superficiales, son muy susceptibles a la compactación por el tránsito en húmedo. Esto provoca efectos adversos en el suelo, que interactuando con el clima, afectan el crecimiento de los cultivos (Bacigaluppo *et al*, 2011). Resulta entonces necesario, prevenir y/o reducir el impacto de la densificación del suelo, mediante una estrategia que combine el tránsito controlado y el uso de rodados de mayor superficie de apoyo y menor presión específica.

La intensificación de los sistemas agrícolas con gramíneas, con una adecuada fertilización, constituye una herramienta primordial para mantener altos niveles de cobertura y porosidad, mejorando a su vez el balance de materia orgánica y nutrientes en el suelo. El sistema radical de estos cultivos es el principal factor de regeneración de la estructura del suelo afectada por el tránsito. La recuperación de la macroporosidad mejora notoriamente la velocidad de infiltración del agua, aumentando la capacidad del suelo para captar agua durante precipitaciones intensas. Esta situación permite por un lado, reducir el escurrimiento superficial y los procesos erosivos, favoreciendo el balance hídrico del suelo. Por otro lado, la reducción de las impedancias físicas en el perfil, favorece una mayor exploración radical, en especial de cultivos sensibles, mejorando la captación de nutrientes de baja movilidad y la absorción de agua en profundidad. Esto evita que el cultivo manifieste síntomas de estrés hídrico durante períodos con ausencia de precipitaciones, obteniendo mayor estabilidad en el rendimiento.

■ BIBLIOGRAFÍA

- Bacigaluppo, S; ML Bodrero; M Balzarini; GR Gerster; JM Andriani; JM Enrico & JL Dardanelli. 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Europ. J. Agronomy* 35: 247– 254.
- Barbosa, O; M Taboada; M Rodríguez & D Cosentino. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 15: 81-86.
- Cosentino, D & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- De Battista, JJ; A Andriulo & C Pecorari. 1993. El Perfil Cultural: un método para la evaluación de sistemas de cultivo. *Ciencia del Suelo* 10-11: 89-93.
- Gerster, GR; D Vidal; O Gudelj & JJ De Battista. 1996. Análisis del efecto de las labranzas sobre el estado físico de un Argiudol típico. Informe Técnico N° 119. EEA INTA Marcos Juárez 15 pp.
- Gerster, GR & S Bacigaluppo. 2004. Consecuencia de la densificación por tránsito en Argiudoles del sur de Santa Fe. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 303
- Gerster, GR & S Bacigaluppo. 2012. Manejo del suelo. En: El cultivo de soja en Argentina. Ed Agroeditorial, 175:188.
- Gil, R. 2001. El comportamiento físico-funcional de los suelos. Primer seminario de AAPRESID para estudiantes: 19-29.
- Jorajuría, D. 2005. Compactación del Suelo Agrícola inducida por tráfico vehicular. Reología del suelo Agrícola bajo tráfico. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata: 39-56
- Michelena, R; C Irurtia; A Pittaluga; F Vavruska & M de Sardi. 1988. Degradación de los suelos en el sector Norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 6: 60-66.
- Mosconi, F; L Priano; N Hein; G Moscatelli; J Salazar; T Gutiérrez & L Cáceres. 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA-MAG 216 pp
- Pecorari, C. 1988a. Características físicas de las fracciones granulométricas de los horizontes superficiales de un Argiudol típico (serie Pergamino). Informe Técnico N° 220. INTA Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino 18 pp.
- Pecorari, C. 1988b. Inestabilidad estructural de los suelos en la región de la EEA Pergamino. Informe Técnico N° 216. INTA Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino 16 pp.
- Plá Sentis, I & S Nacci. 1990. Técnicas y equipos simplificados para evaluar propiedades físicas importantes para el manejo de suelos en los trópicos. XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo: 199-217
- Senigagliesi, C & M Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. International crop science I. *Crop Science Soc. of America*, Madison USA: 27-35
- Silva Rossi, M. 2005. Impacto de la compactación sobre la calidad de los suelos en el sur de Santa Fe. Para Mejorar la Producción N° 30. EEA INTA Oliveros: 94-98.

- Taboada, M & F Micucci. 2002. Fertilidad física de los suelos. Ed. Facultad de Agronomía UBA 79 pp
- Venialgo, C; N Gutiérrez; J Gutiérrez; J Petkoff & D Drganc. 2002. Porosidad en suelos con distintas secuencias de cultivos. XIII Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. Facultad de Ciencias Agrarias – UNNE.
- Vorhess, W; W Nelson & G Randall. 1986. Extend and persistence of subsoil compaction with heavy axle loads. *Soil Science Society of America Journal* Madison. 50: 428-433.